

## Vg3 Romteknologi

### Fagstoff til eksamen

Innhold på ndla.no er nå tilgjengelig i PDF- eller ePub-format som hjelpe midler til eksamen. Disse filene kan lagres på egen datamaskin og leses i digitalt format, eller de kan skrives ut og tas med til eksamen. Dette er automatisk genererte filer som ikke er manuelt bearbeidet.

Dette dokumentet er en tekstuutgave av det digitale læreverket for faget slik det forelå på ndla.no april 2015. For å se det komplette læreverket, slik det er sammensatt av ulike medietyper og interaktive elementer, gå til <http://ndla.no>.

Ved eksamen vil man ikke ha adgang til Internett, og dermed vil i hovedsak kun tekst og bilder være tilgjengelig. Animasjoner, simuleringer, lydfiler og video er interaktive ressurser som krever tilkobling til nett.

*Sentralt gitt skriftlig eksamen i Kunnskapsløftet følger to hovedmodeller for hjelpe midler. I modell 1 er alle hjelpe midler tillatt. Unntak er Internett og andre verktøy som tillater kommunikasjon. For norsk og fremmedspråkene er heller ikke oversettelsesprogrammer tillatt.*

*Modell 2 er en todelt eksamen. Der er det i del 1 tillatt med skrivesaker, passer, linjal og vinkelmåler. I del 2 er alle hjelpe midler tillatt med unntak av Internett eller andre verktøy som tillater kommunikasjon.*

*Disse fagene følger modell 2 for hjelpe middel bruk uten forberedelses del; matematikk i grunnskolen, matematikk i grunnskoleopplæringen for voksne, matematikk, fysikk, kjemi og biologi i videregående opplæring.*



# Innholdsfortegnelse

<b>Innholdsfortegnelse</b>	<b>2</b>
<b>Fjernanalyse og GIS</b>	<b>10</b>
Fjernanalyse	10
Fjernanalyse og jordobservasjon	12
Prinsippene for jordobservasjon	13
Prinsipper for jordobservasjon ved bruk av radar	16
Jordobservasjonssatellitter – kort historikk	18
Radarsatellitter - kort historikk	20
Informasjon fra jordobservasjonssatellitter	22
Satellittovervåkning av vulkaner og vulkanutbr..	24
Digitalt og analogt bilde	26
Satellitter kartlegger og overvåker rasfare, n..	29
Satellittsamarbeid hjelper ved katastrofer	31
Korrigering og kalibrering av satellittbilder	33
Tolking av satellittbilder	34
Bruk av farger og klassifisering av satellitt..	37
Geografiske informasjonssystemer	40
Hva er GIS	41
Kort om historien	43
Hvorfor GIS?	45
GIS, begreper	48
Oppbygging av GIS	50
Data i GIS	51
Vektormodell	52
Rastermodell	54
Fordeler og ulemper med vektor- og rastermodell..	55
GIS og databaser	57
Valg av geodatabaser	60
Hva er ArcGIS?	62
Dataanalyse i GIS	64
Datakvalitet og feilkilder	68
Dataformater for GIS	71
Visualisering av kart, satellittbilder og flyf..	73
Hvordan skaffe og tilrettelegge digitale bergartskart	75
Tilrettelegge berggrunn over nordlige Andøya s..	77
Utvikle en fil-geodatabase med bruk av ArcCatalog	79

Legge en shape-fil i geodatabasen	80
Legge et satellittbilde i geodatabasen	81
<b>Datafangst</b>	<b>82</b>
Datafangst og datainnsamling	83
Landmåling	84
Manuell digitalisering av eksisterende kartmat..	85
Skanning	87
Fotogrammetri	88
Flybåren laserskanning	90
Navigasjonssatellitter	92
Hva er EGNOS?	94
<b>Kart og kartografi</b>	<b>97</b>
Kart og kartografi	98
Stedfesting og standarder	100
Ellipsoide og geoide	101
Kartprosjektjon	103
UTM-koordinatsystem	105
<b>Satellitteknikk</b>	<b>107</b>
Om satellitter - og hva de brukes til	107
Historikk	109
Ut i rommet	111
Oppdrag og nyttelaster	113
Standarder for romvirksomhet	115
<b>Romtransportsystemer</b>	<b>117</b>
Funksjoner	118
Rakettligningen	120
Rakettdrivstoff	122
Flertrinnsraketter	126
Eksempel på bæreraketter	127
ARIANE versjon 1 til 4	128
Ariane 5	130
VEGA	132
Påkjenning på nyttelast under oppskyting	134
<b>Satellittbaner</b>	<b>136</b>
Satellittbevegelse i sirkulære baner	138
Satellittbevegelse i elliptiske baner	139
Sammenheng mellom baneparametre	141

Referansesystem i verdensrommet	143
De klassiske baneparametrene	144
GEO (Geostationary Earth Orbit)	146
LEO (Low Earth Orbit)	148
Solsynkrone baner	150
HEO (Highly Inclined Earth Orbit)	152
MEO (Medium Earth Orbit)	154
Satellittkonstellasjoner	155
TLE - Baneparametre på standard form	157
Juliansk dato	159
Retning og avstand til satellitter	161
<b>Miljøet i rommet</b>	<b>163</b>
Magnetfeltet rundt jorda	165
Nøytral atmosfære	166
Ionisert atmosfære, plasma	168
van Allenbeltene	170
Varmestråling	171
Romsøppel	172
<b>Satellittplattformer</b>	<b>174</b>
Plattformtyper	175
Mekanisk konstruksjon	177
Rotasjonsstabilisering	179
Treaksestabilisering	182
Gradientstabilisering	184
Fremdriftssystemer	185
Generering av energi i rommet	187
Termisk kontroll	190
Telemetri og fjernkontroll (TT&C)	192
Eksempel på satellittplattformer	195
<b>Satellitanvendelser</b>	<b>197</b>
Former for satellittkommunikasjon	198
Systemer for satellittkommunikasjon	201
Hvordan fungerer en telesatellitt?	203
Mobil satellittkommunikasjon	205
Satellitelefon	208
Satellittkringkasting	210
Satellittnavigasjon	213
Instrumenter for jordobservasjon	215

Utforskning av verdensrommet	219
Vektløshet (micro gravity)	222
Spin-offeffekter	223
<b>Telemetri</b>	<b>225</b>
Telemetrifaget	225
Andøya Raketttskytefelt og NAROM	226
Raketter ved ARS	228
Raketter ved ASC / fagstoff	228
Ballonger ved ARS	229
Måling av atmosfæriske parametre med ballong	230
Sender- og mottakersystemer	231
Senderside	232
Mottakerside	233
Sikkerhet ved rakettoperasjoner	234
Senderside	236
Sensorer	237
Informasjonsteori	239
Informasjonsteori / fagstoff	239
A/D-omformer	241
Samplingsrate	246
Aliasing	247
Signalmultipleksing	248
Enkoder – databehandling og kontroll	249
PCM-datablokk	251
Koding	253
Telemetrisenderen	255
Modulasjon av sender	257
Antenner på nytelast	259
Kort innføring i modulasjon og RF-teknikk	262
Mottakersystem	263
Frekvensbånd for telemetri	264
Mottakerantenner	267
Mottakerantenner karakteristiske egenskaper	268
Antennetyper	271
Automatisk målfølging	275
Fra fødeelement til mottaker	278
Simulering av satellittbaner ved bruk av STK	280

Følging av satellitter med monopuls målfølgend..	281
Mottakeren	282
Diversitetskombinering	284
Bitsynkronisering	285
Dekoding	287
Mottakersystemets egenstøy	290
Nedlasting av værbilder fra NOAA-satellittene	291
<b>Linkanalyser</b>	<b>292</b>
Strekningsdempning	293
Systemstøy	295
Overføringsmargin og tap	297
Prosessering og presentasjon av data	299
Presentasjonsformer	300
Etterbehandling av data	302
VTS - System for dekoding, lagring og sanntids..	305
<b>Datalagring og arkivering</b>	<b>307</b>
Analog og digital lagring	308
Magnetbånd og analog lagring	309
Digital lagring på magnetbånd	314
<b>Baneberegning</b>	<b>316</b>
Dopplereffekten	318
Skråavstandsberegning ved hjelp av fasemåling	320
Skråavstandsberegning basert på tidsforsinkels..	322
Baneberegning basert på antennepokevinkler og ..	324
TPS – Baneberegningssystemet på ARS	327
Måling av skråavstand ved hjelp av fasemeter	329
<b>Romfysikk</b>	<b>330</b>
Romfysikk – det spennende fysikkfaget	330
Kort om innholdet i romfysikken og historie	331
Jordas magnetfelt	332
Nordlyset	333
Ionosfæren - den øvre atmosfære	336
Relativitetsteorien	337
Romfysikk	338
Vårt nye verdensbilde	340
<b>Mekanikk</b>	<b>343</b>
Skalarer og vektorer	344

Rettlinjet bevegelse	346
Fart	347
Akselerasjon	350
Bevegelseslikninger ved konstant akselerasjon	352
Krefter	353
Newtons 1. lov (Trehetsloven)	354
Newtons 2. lov (Dynamikkens grunnlov)	356
Tyngde	357
Newtons 3. lov (Kraft og motkraft)	359
Arbeid og energi	361
Energiformer	363
Bevegelse av planeter og satellitter	365
Keplers lover	368
Newtons gravitasjonslov	370
Frigjøringsarbeid	372
Unnslipningshastighet	373
Fritt fall, vektløshet, mikrogravitasjon	375
Sammendrag: Mekanikk	377
Atom- og kjernefysikk	380
Innledning	380
Materiens oppbygging	381
Emisjons- og absorpsjonsspektre	384
Kvantefysikk	387
Ioniserende stråling	390
Måleenheter for radioaktiv stråling	393
Måling av radioaktiv stråling	394
Halveringstid	396
Masseenergiekvivalens	399
Elektromagnetiske felt og stråling	402
Innledning	402
Elektrisitet	403
Elektrisk strøm, elektriske felt og krefter	404
Coulombs lov	405
Elektrisk feltstyrke	406
Bevegelse av elektroner og ioner i et elektris..	407
Magnetisme	409
Magnetiske krefter og magnetiske felt	410
Elektroner og ioner i et krysset elektrisk og ..	415

Det elektromagnetiske spektrum	416
Sammendrag	418
Elektromagnetisk stråling og partikkelstråling..	419
Karakteristiske størrelser, avstander og regio..	420
Den elektromagnetiske strålingen fra sola	422
Strålingslovene	424
Elektromagnetisk stråling fra forstyrrelser på..	426
Energiproduksjon på sola	428
Absorpsjon av solstrålingen i jordas atmosfære	430
Solas magnetiske felt	431
Partikkelstrålingen fra sola	432
Kosmisk Stråling	434
Solvinden -- en kommunikasjonslinje mellom sol..	435
Atmosfærens sammensetning og egenskaper	437
Innledning	437
Fysikk i gasser - atmosfærefysikk	438
Temperatur	440
Atmosfærens sammensetning opp til ca. 100 km	444
Hvor mye luft er der i atmosfæren?	445
Atmosfærens høydeinndeling basert på temperatu..	446
Barometerformelen - Hvordan varierer trykket o..	448
Atmosfæren over 100 km	451
Tidsvariasjoner i atmosfæren	455
Observasjonsteknikker for studier av den midle..	456
Klima og miljøfysikk	459
Innledning	459
Jordas energiressurser	460
Energilovene	463
Klima	467
Det har vært store forandringer i klimaet	469
Klimaendringer	471
Drivhuseffekten	474
Drivhusgasser og aerosoler	481
Tiltak mot klimaendringer	486
Jordas permanente magnetfelt	488
Innledning og historikk	489
De magnetiske polene	494
Variasjoner i jordas magnetfelt	496

De magnetiske elementene	498
Teoretisk modell av jordas magnetfelt	499
Magnetiske koordinater og tid	503
Magnetiske variasjoner	505
Måleinstrumenter	508
Magnetfeltet utenfor jorda	511
Magnetosfæren - vårt nye verdensrom	513
Strålingsbeltene - van Allen beltene	514
Strukturer og dynamikk i magnetosfæren	516
Nordlysfysikk	518
Historikk	519
Fordypning: Målinger av radioekko fra ionosfær..	521
Den forstyrrede ionosfære	523
Nordlys / Polarlys	524
Nordlysets fordeling i rom og tid	528
Former og struktur i nordlyset	533
Nordlysets høyde	536
Nordlysets intensitet og fargespektrum	540
Nordlyspartikler	543
Rytmen i et nordlysutbrudd	549
Karakteristiske egenskaper ved dagnordlys	551
Bedre kunnskap om nordlyset øker vår forståels..	553
En moderne nordlysteori i populær form	554
Nordlysstudier - et middel til å øke våre kunn..	555
Astrofysikk	556
Kildene til informasjon om universet	557
Hovedtrekkene i stjernenes utvikling	558
Himmellegemenes kjemiske sammensetning	563
Bestemmelse av stjernenes overflatetemperatur	564
Avstander i verdensrommet	566
Bestemmelse av fart: Dopplereffekten	570
Universets utvikling	571
De klassiske spørsmålene	575

# Fjernanalyse og GIS

## Fjernanalyse

Forfatter: Utdanningsdirektoratet

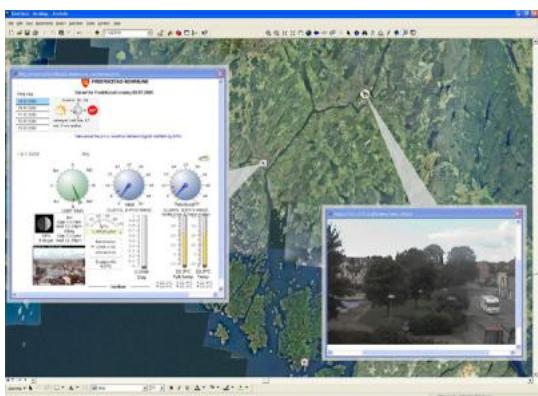
[Fjernanalyse og geografiske informasjonssystemer \(GIS\) \(28069\)](#)



Fjernanalyse og geografiske informasjonssystemer er et programfag som hører til programområde for romteknologi. Romteknologifaget skal fremme kompetanse om utforskning av verdensrommet og utvikling av ny teknologi innen romvirksomhet.

Felles programfag skal gi grunnleggende innsikt i tekniske og miljømessige utfordringer knyttet til ressursutnyttelse og bærekraftig utvikling. Programfagene skal fremme elevens evne til å bruke og reparere elektronisk utstyr knyttet til kommunikasjon og romteknologi, telemetrisystemer og satellittteknologi.

Opplæringen skal legge til rette for internasjonalt samarbeid med romteknologisentre, og deler av opplæringen skal foregå i nært samarbeid med norsk romindustri. Bruk av satellittdata, testing og bruk av fagprogramvare for datainnsamling og analyse og geografiske informasjonssystemer skal vektlegges i opplæringen. Opplæringen skal bidra til å fremme kreativitet, evne til samarbeid og problemløsning og stimulere til innovativ tenkning og utprøving. Opplæringen skal legge grunnlag for videre utdanning innen fagområdet.



Gjøre analyser ved bruk av GIS-programvare.

Opphavsmann: [Geodata AS](#)

Romteknologi består av fem felles programfag. Programfagene utfyller hverandre og må ses i sammenheng. Det vil derfor bli relaterte artikler mellom flere av fagene.

Læreplanen sier at du skal kunne dette for  
faget "Fjernanalyse og geografiske informasjonssystemer"

- bruke nettbaserte læringsressurser
- gjøre rede for anvendelser av GIS og fjernanalyse i ulike fagområder
- forklare grunnleggende teknikker i GIS og anvende dem i praksis

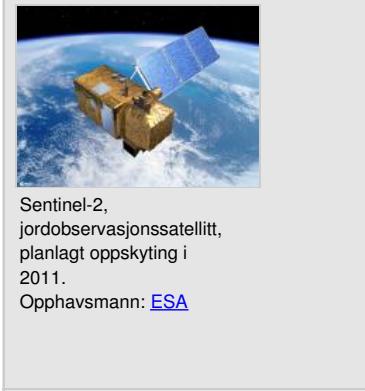
- bruke standard programvare for GIS og bildebehandling
- arbeide selvstendig med ulike typer av geografiske data i et GIS
- beskrive ulike kartprojeksjoner og koordinatsystemer
- forklare ulike datafangstmetoder og vurdere anvendelsen
- bygge opp en database og gjøre rede for ulike databasesystemer og datakomprimering
- bruke ulike analysemetoder basert på raster- og vektordata
- gjøre rede for interferometri
- utføre tredimensjonale analyser
- visualisere analyseresultater
- gjøre rede for datakvalitet og metadata
- beskrive ulike navigasjons- og posisjoneringssystemer
- beskrive prinsippene for fjernanalyse
- forklare aktive og passive sensorer og deres bruksområder
- utføre ulike analyser av fly- og satellittbilder
- korrigere satellittbilder, slik at de kan brukes sammen med kart
- beskrive anvendelser av fjernanalyse av jorda og utenfor jorda
- bruke GIS-kompetanse i inn- og utland
- gjøre rede for hvordan GIS brukes for å vise global miljøstatus og kan bidra til bærekraftig utvikling
- bruke internetsider og -portaler som er basert på GIS og fjernanalyse

# Fjernanalyse og jordobservasjon

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Fjernanalyse og jordobservasjon \(52751\)](#)

Fjernanalyse skjer ved registrering av overflater fra fly og satellitter. I ordboken for kart og oppmåling står følgende definisjon: "Fjernanalyse er en metode til å kunne skaffe informasjon om overflater eller objekter uten at måleinstrumentet er i fysisk kontakt med objektene. Det kan nytties elektromagnetisk stråling, andre kraftfelt eller mekaniske vibrasjoner, osv".



Sentinel-2,  
jordobservasjonssatellitt,  
planlagt oppskyting i  
2011.

Opphavsmann: [ESA](#)

Begrepene fjernanalyse og fjernmåling brukes noe om hverandre. På engelsk heter det Remote Sensing, som direkte oversatt blir fjernmåling. Derimot heter det fjärranalys på svensk, og det er vel egentlig et bedre begrep enn fjernmåling, siden denne fagdisiplinen i stor grad omfatter analyse og tolking av data. Om vi skulle sette et skille, kunne fjernmåling defineres som innhenting av data (dvs. bilder) om jordoverflata fra en plattform (f.eks. fly eller satellitt), mens fjernanalyse kunne defineres som analyse og tolking av fjernmålingsdata.

I ordboken for romvirksomhet anbefales bruk av uttrykket fjernmåling i stedet for fjernanalyse. I ordboken finner vi følgende definisjon på fjernmåling: "Innsamling av informasjon om overflater eller objekter uten fysisk kontakt mellom måleinstrument og objekt. Innsamlingen kan for eksempel skje ved hjelp av forskjellige typer kameraer eller avanserte radarsystemer."

Innenfor anvendt romvirksomhet brukes uttrykket jordobservasjon eller Earth Observation i betydningen satellittfjernmåling. I denne sammenhengen er det gitt eller underforstått at en observerer fra satellitt, men et poeng er at en observerer nedover mot jorda. Ordboken beskriver jordobservasjon som all virksomhet knyttet til innsamling av informasjon om jordens overflate eller atmosfære ved hjelp av instrumenter i romfartøy. Jordobservasjon omfatter dessuten bruk av slik informasjon.

Med fjernanalyse i denne sammenheng vektlegges analyse av fjernmålte data innenfor definisjonen av begrepet jordobservasjon. Teknikken som benyttes, er i hovedsak analyse av elektromagnetisk stråling. Satellittsensorer opererer innenfor et eller flere av områdene langs det elektromagnetiske spekteret. De vanligste områdene er innen det synlige og infrarøde i tillegg til mikrobølgeområdet. Flybilder er også en nyttig informasjonskilde ved fjernanalyse, men vil bli omtalt i forbindelse med datafangst.

# Prinsippene for jordobservasjon

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Prinsipper for fjernanalyse \(52831\)](#)

Prinsippene som beskrives, har fokus på fjernanalyse brukt til jordobservasjon. For å kunne forstå anvendelsen av satellittdata, er det nødvendig med informasjon om f.eks. lys, stråling, instrumenter og tilgjengelighet av data.

Elektromagnetisk stråling er energi overført gjennom det tomme rom eller et gjennomtrengelig medium ved elektromagnetiske bølger.

Bølgene kan variere over et vidt område i bølgelengde fra gammastråler (omkring ca.10-6 µm) til langbølget radiostråling (omkring ca.108 µm). Området mellom de to ytterpunktene kalles det elektromagnetiske spekteret.

Omtrent midt i spekteret, fra 0,4 til 0,7 µm, ligger et felt der det menneskelige øye oppfatter strålingen som lys. Like under 0,4 µm ligger den ultrafiolette strålingen, over 0,7 µm den infrarøde. Imellom registrerer nervecellene i øyet f.eks. 0,4 µm som fiolett og 0,7 µm som rødt.

## Synlig lys

Fargen til et legeme vil altså avhenge av overflatens evne til å dels absorbere, dels reflektere elektromagnetisk stråling innenfor området for synlig lys. En hvit overflate vil reflektere all stråling, mens en sort vil absorbere alt. En gul flate vil reflektere synlig stråling av den bølgelengden øyet oppfatter som gult.

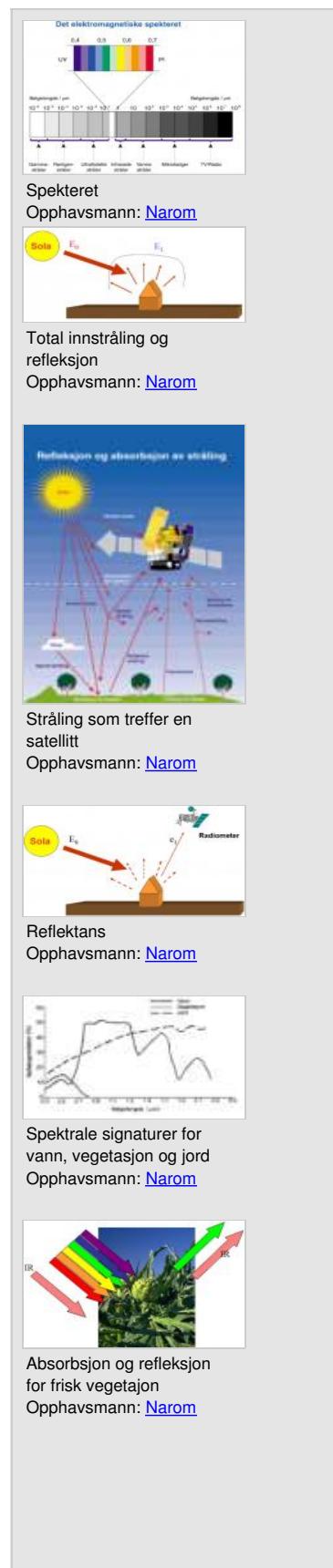
Alle legemer reflekterer noe av strålingen som den mottar. Forholdet mellom strålingen som reflekteres, og den totale strålingen, kalles albedo  $E_1/E_0$ .

## Refleksjon og absorpsjon av stråling

Den strålingen som treffer en satellitt, kan være direkte sollys, stråling reflektert fra atmosfæren eller stråling sendt ut eller reflektert fra jorda. Den reflekterte strålingen kommer fra hav, land, skyer eller atmosfæren. Noe av strålingen fra jorda blir absorbert av skyene, og noe blir absorbert av atmosfæren.

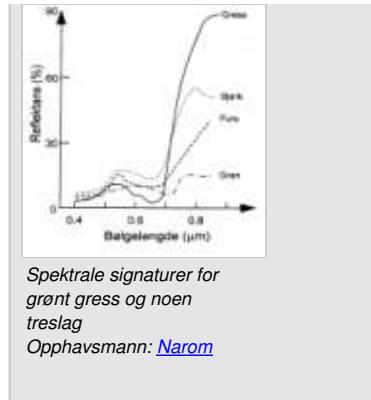
Ved jordobservasjon er vi interessert i refleksjonene fra bakken, fordi den reflekterte strålingen vil inneholde informasjon om overflaten, og om stoffene i atmosfæren som har absorbert strålingen på vei opp.

## Reflektans



Innen jordobservasjon med passive instrumenter (optiske sensorer) er den relative mengden av stråling som reflekteres i en viss retning – i dette tilfelle i retning av instrumentet ( $e_1/E_0$ ) –, betegnet som reflektans.

Sendes hvitt lys mot en grønn plante, blir mesteparten av den røde og blå delen absorbert, mesteparten av den grønne delen reflektert. Derfor ser planten grønn ut i hvitt lys. Sendes rødt lys mot planten, vil mesteparten av lyset bli absorbert. Dermed ser planten mørk ut. Sendes grønt lys mot planten, vil en liten del av lyset bli absorbert og mesteparten bli reflektert slik at den ser grønn ut. Reflektansen er den andelen av strålingen i en bølgelengde som reflekteres. Hvis kun 10 % av den røde strålingen blir reflektert, er reflektansen 10 %. Hvis 30 % av den grønne strålingen reflekteres, er reflektansen 30 %.



### Spektrale signaturer

Kartlegges reflektansen for grønne planter med stråling av mange bølgelengder, kan vi finne hvordan planten reflekterer lys for de forskjellige bølgelengdene. Da er det vanlig å fortsette med stråling også i den infrarøde delen av spekteret. Tegner vi reflektansen som funksjon av bølgelengden, får vi en kurve som er typisk for grønne planter. En slik kurve kalles en reflektanskurve eller en spektral signatur. Forskjellige grønne planter har forskjellig reflektanskurve.

Ulike overflatetyper kan skjelnes fra hverandre ved at de har forskjellige absorpsjons- og refleksjonsegenskaper som funksjon av bølgelengde.

Vi merker oss at vann er en total absorbator for bølgelengder over  $0,8 \mu\text{m}$ . Fordi vann i vegetasjon absorberer stråling med bølgelengdene  $1,4 \mu\text{m}$ ,  $1,9 \mu\text{m}$  og  $2,7 \mu\text{m}$ , kommer dette frem på reflektanskurvene for vegetasjon. Figuren for spektrale signaturer viser tre minima nettopp for disse bølgelengdene. Dette signaliserer plantens vanninnhold. Når reflektanskuren for en plantetype måles fra satellitt, får vi altså informasjon om vanninnholdet i plantene, dessuten om veksttilstanden for vegetasjonen. Videre merker vi oss at frisk vegetasjon absorberer rødt og blått lys, mens grønt blir reflektert. Dette skyldes klorofylls egenskaper.

Går vi et skritt videre, finner vi at forskjellige plantetyper absorberer ulike mengder stråling. Det er altså ikke bare fellesbegrepet planter som har en egen signatur. Hver enkelt plantegruppe har sin spektrale signatur. Dermed er det også mulig å skaffe informasjon om hvilken vekstfase plantene er i, eller om plantene har sykdommer.

Det at de spekrale signaturene for grønt gress og ulike treslag er forskjellige, gjør det mulig å skjelne mellom, dvs. klassifisere, forskjellige vekster. I illustrasjonen legger vi spesielt merke til at ulike refleksjonsegenskaper i det røde og nærinfrarøde området er viktige for å skjelne mellom ulike vekster. Hver plantesort vil dessuten ha en årssyklus, og det vil være mulig å bestemme om planten kan være utsatt for sykdomsangrep.

Satellittene registrerer den elektromagnetiske strålingen fra jordoverflaten mens de beveger seg utenfor jordens atmosfære. Instrumentene mäter med andre ord bare lyset som slipper gjennom atmosfæren.

Molekylene i atmosfæren absorberer strålingen. Hvilke bølgelengder som blir absorbert, avhenger av luftens kjemiske sammensetning. Stort sett er det vann, karbondioksid, ozon og metan som absorberer hver sine bestemte bølgelengder. I tillegg til molekylene i atmosfæren vil stov, skyer og dis svekke strålingen til og fra bakken.

Satellittbilder som er dannet basert på mottatt refleksjon til instrumentet om bord på en satellitt, betegnes som et optisk bilde. Selve instrumentet betegnes som et optisk eller passivt instrument. Passivt fordi instrumentet selv ikke sender noe stråling fra seg, men kun mottar reflektert stråling.

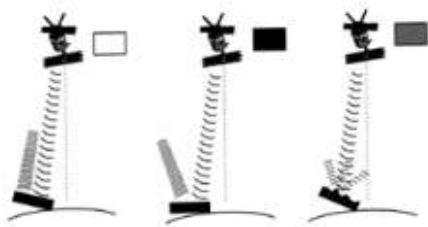
# Prinsipper for jordobservasjon ved bruk av radar

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Prinsipper for jordobservasjon ved bruk av radar \(54422\)](#)

Ved optiske sensorer er det mulig å benytte spektral informasjon for å skille mellom ulike typer overflater. For en mikrobølgeradar er det spredningstverrsnittet som inneholder informasjon om objektet, og som gir oss mulighet til å skjelne mellom forskjellige typer objektoverflater.

Et radar-instrument om bord på en satellitt sender radarsignaler på skrå ned mot jordoverflaten. Det betyr for eksempel at et speilblankt hav sender radarsignalene vekk, slik at ikke noe stråling kommer tilbake. Da blir radarbildet svart. Hvis det er ujevnhet på overflaten, for eksempel bølger, vil vi få noe refleksjon tilbake til instrumentet. Da blir bildet mer eller mindre grått, avhengig av hvor store havbølgene er. Hvite bilder betyr at en stor del av radarstrålene kommer tilbake til satellitten.



Radarinformasjon

Opphavsmann: [Narom](#)

Illustrasjonen viser at tilbakespredning øker med ruheten til overflaten. Den glatte overflaten vil gi refleksjon vekk fra radar-instrumentet og blir derfor usynlig for instrumentet.

Dersom vi studerer radarinformasjonen fra åpent hav, vil tilbakespredningen avhenge om havet i de øverste 2-3 cm er rolig eller opprørt. Det er kapillarbølgene (bølger på havoverflaten med noen få centimeters bølgelengde) som er viktigst for tilbakestråling fra havoverflaten.

Dette benyttes også til klassifisering av ulike istyper ved bruk av radar-instrument. De viktigste faktorer for tilbakespredning av mikrobølger er isens overflatestuktur, alder og saltinnhold.

Nylagt is gir også en totalrefleksjon vekk fra satellitten, og informasjonen kan derfor ikke skilles fra en speilblank havoverflate. Når isen tykner til, dannes frostrosor som øker tilbakespredningen. Brytes isen opp i isflak, dannes mange uregelmessige flater med gode refleksjonsegenskaper. Tilbakespredningen vil deretter avta etter hvert som isflakene vokser seg større.

Mot sommeren vil vann på isen gjøre det umulig å aldersbestemme isen. Det er også registrert at flerårsis har bedre tilbakespredningsegenskaper enn førsteårsis. Dette skyldes at radarbølgene trenger lengre ned i gammel is da øvre del har mindre saltinnhold. Dette fører til spredning fra et større volum. Havisbildet er et opptak gjort av radarsatellitten ERS-2. Opptaket er gjort øst for Svalbard 24. februar 2010.



Havis øst for Svalbard

Opphavsmann: [ESA](#)

Det er vanskelig å basere klassifisering av istyper på radarbilder alene da informasjonen ikke er entydig. Optiske bilder er nyttig tilleggsinformasjon sammen med kontroll ute i felten.

Radarsatellitten CryoSat-2

Den europeiske romorganisasjonen ESA sin issatellitt CryoSat-2 som ble skutt opp i april 2010, har som oppgave å finne ut hvor mye is vi har på jorda, hvor tykk den er, og hvordan den forandrer seg.

CryoSat-2 har et radarinstrument som skal skaffe presise målinger av tykkelsen på flytende havis, slik at årlege variasjoner kan oppdages. Det andre målet er å undersøke overflaten på iskappene slik at man her også kan oppdage små forandringer.

I tillegg har CryoSat-2 en radarbasert høydemåler om bord som kalles SAR/Interferometric Radar Altimeter (SIRAL). Instrumentet måler for eksempel tykkelsen på flytende havis ved å måle høyden som stikker opp over vannet. Når denne høyden er kjent, kan hele istykkelsen måles så lenge forskerne vet hva isens tetthet er.



CryoSat-2  
Opphavsmann: [ESA](#)

# Jordobservasjonssatellitter – kort historikk

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Jordobservasjonssatellitter – kort historikk \(52821\)](#)

Den moderne romalderen startet i oktober 1957 da en liten metallkule med lange antenner ble sendt opp i verdensrommet. Denne 83 kg tunge sovjetiske satellitten Sputnik-1 var verdens første kunstige satellitt.

Sputnik-1 var en enkel satellitt. Den besto av en halvmeter stor metallkule som inneholdt en radiosender, samt fire radioantenner. Ved hjelp av radiosignalene kunne folk verden over følge satellittens ferd. Siden satellitten var blank, kunne den også sees som en "stjerne" på himmelen.

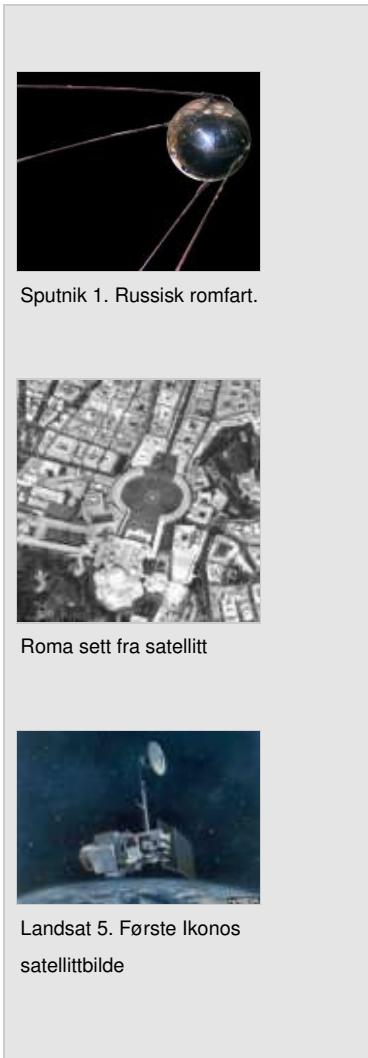
Nyheten om Sputnik vakte enorm oppsikt verden over, akkurat som forventet. Amerikanerne, som hadde trodd at de var fremst i verden når det gjaldt teknikk, måtte finne seg i at Sovjetunionen ble sett på som best i verden på dette området. Amerikanerne ville ikke finne seg i dette. De begynte straks å forberede sin egen satellitt, og politikerne bevilget langt mer penger til romforskning. Oppskytingen av Sputnik-1 førte faktisk til at amerikanske skoleelever fikk mer undervisning i naturfag. Politikerne i USA ble redde for at landet skulle bli liggende etter Sovjetunionen på det tekniske området. De mente at den beste måten å unngå dette på var å gi skoleelevene bedre naturfagundervisning.

## Satellitter med optiske sensorer

I løpet av et par år ble det utviklet teknologi for å fotografere fra satellitter og hente ned film fra verdensrommet. Utallige slike militære satellitter ble skutt opp, både av USA og Sovjetunionen. Denne type satellitter gikk relativt lavt (200 km høyde) og kunne bare brukes så lenge de hadde film igjen om bord. Typisk levetid var noen uker. Sputnik-1 hadde en ferd på 57 dager før den falt inn i jordens atmosfære. Den minste detaljen man kunne observere (oppløsning) på satellittbildet i 1960, var på 8 m, mens man kunne studere objekter på 2 m i 1967. Etter 1972 og frem til i dag har den militære satellitteknologien blitt utviklet videre med digitale sensorer som gir en oppløsning ned til 10 cm. Dagens satellitter går noe høyere enn de første og har en levetid på mange år.

Sivil bruk av satellitter var begrenset på 60-tallet. Teknologien som lå bak de militære satellittene, ble ikke frigitt, og problemet var at bildene var for gode til å bli sluppet ut på et fritt marked. Den militære teknologiutviklingen på satellittsiden førte allikevel til nyvinninger i den sivile sektor, og allerede i første del av 60-årene sendte de første amerikanske værsatellittene bilder tilbake til jorden. På disse bildene kunne en tydelig studere skyformasjoner. Teknologien i værsatellittene ble etter hvert utviklet til de systemene vi har i dag: de europeiske METEOSAT- og amerikanske GOES- og NOAA-satellitter.

Den første sivile bildedannende satellitt ERTS-1 (Landsat 1) ble skutt opp i bane rundt jorden i 1972. Hensikten var å registrere naturressurser. Landsat ble betegnelsen på det amerikanske satellittprogrammet, og fire satellitter kom etter Landsat 1 i årene 1975, 1978, 1982 og 1984. Landsat 6 ble skutt opp i 1993, men noe gikk galt med satellitten, og man mistet kontakt med den. Landsat 5 sender fortsatt fine bilder ned til jorden. Dette er ganske unikt da den forventete levetiden for Landsat 5 var tre–fire år. Landsat 7 ble satt i bane i midten av april 1999, og kommersiell drift har vært i gang siden. Et omfattende test- og kalibreringsprogram har vært gjennomgått både for satellitten, instrumentet og for bakkesegmentet, der ny programvare til produksjon av bilder og ordrebehandling er tatt i bruk.



Sputnik 1. Russisk romfart.



Roma sett fra satellitt



Landsat 5. Første Ikonos satellittbilde

Det franske SPOT-programmet ble startet operativt ved oppskyting av SPOT-1 i 1986. Landsat og SPOT-programmene viste seg å være godt egnet til å kartlegge i målestokk 1:50.000 og mindre. Både kartlegging og overvåking av luftforurensningsskader på vegetasjonen er blitt utført med bra resultater både i Finland, Norge og Russland.

Satellitter som Landsat og SPOT med en oppløsning på 10–30 m viste seg snart ikke å strekke til med hensyn til mer detaljert kartlegging i byområder samt kartlegging og taksering av skogsområder.

Fra begynnelsen av 1990-tallet kom det russiske satellittbilder på markedet med en oppløsning på 2 og 5 m (SPIN-2/KVR-1000 og KFA-1000). Men disse bildene har vært dyre i innkjøp og viste seg å være svært utilgjengelige.

Den indiske satellitten IRS-1C som ble skutt opp i slutten av 1995, har rettet på savnet av høyoppløselige satellittbilder ved at en nå kan kjøpe satellittdata med en oppløsning på 5 m over 70 x 70 km store områder til en overkommelig pris for kommersiell anvendelse. Høsten 1998 skjøt inderne opp IRS-1D som er en kopi av IRS-1C, slik at repetisjonsfrekvensen, dvs. tiden det tar for at satellitten er på samme sted igjen, er forbedret.

Etter at USA i 1994 åpnet for kommersiell utnyttelse av militær satellitteknologi, er det blitt mulig å kjøpe skarpe, digitale satellittbilder med én meters oppløsning. Overvåkningssatellitten Ikonos, som kom på plass i bane rundt jorden 24. september 1999, er den første sivile såkalte énmeterssatellitt.

Det skulle vært to like Ikonos-satellitter i bane rundt jorden. Den første ble sendt opp 27. april 1999, men mekanismen som skulle fjerne den vel 600 kg tunge beskyttelseshetten rundt satellitten, sviktet. Dermed ble lasten for tung for det siste trinnet i raketten som fraktet satellitten, og den første Ikonos styrtet i Stillehavet øst for New Zealand.

Den største kundegruppen for anvendelse av satellittinformasjon fra Ikonos er militær, men bildene egner seg godt både til kartlegging i byområder og i kyst- og skogsområder. Bildene fra satellitten er også ment brukt til for eksempel nødhjelpearbeid, oppdatering av kart over katastrofeområder og til å finne den beste plassering av flyktningleirer. Satellittbildene fra Ikonos gir et bedre bilde av en del miljøforhold enn man kan se med det blotte øye. De viser både synlige lys og en del av det infrarøde spekteret, der vegetasjonen har sin høyeste refleksjon. Ved hjelp av bildene kan det utarbeides oversikt over elgbeite og multemyrer, og omfang av skader på skog og tørke i jordbruksområder kan kartlegges.

## Radarsatellitter - kort historikk

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Radarsatellitter – kort historikk \(53305\)](#)

Instrumenter om bord i radarsatellitter sender aktivt ut radarstråler mot jordoverflaten. Den første satellitten av denne typen, Seasat, ble utviklet i USA av NASA. Den var aktiv i ca. 3 måneder i 1978 og lagde svært interessante radarbilder (SAR). Deretter gikk det ca. 13 år før en ny sivil radarsatellitt kom i bane. Men en amerikansk militær radarsatellitt med kodenavnet Lacrosse ble skutt opp allerede i 1988.

Sommeren 1991 ble den første europeiske radarsatellitten (ERS-1) skutt opp. Norge var deltager i programmet og medeier i satellitten. Etter at Norge ble fullverdig medlem av European Space Agency (ESA) i 1987, ble en større utbygging av Tromsø satellittstasjon (TSS) iverksatt. På grunn av skydekke- og lysproblemene i nord, var det naturlig for Norge å satse på bruk av radarsatellitter, som ved hjelp av mikrobølger kan observere uavhengig av atmosfæriske forhold.

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) startet omfattende utviklingsarbeider innen behandling av signaler fra satellitter utstyrt med syntetisk aperturradar (SAR). Dette er et prinsipp hvor rådata fra satellittens radar sendes ned til bakken og bearbeides på en slik måte at det tilsvarer en syntetisk antenn i verdensrommet, flere km lang og med god bildeoppløsning. Utstyr for SAR-prosessering som var utviklet ved FFI, ble industrialisert og levert til TSS.

I årene 1992–93 gjennomførte FFI, i samarbeid med bl.a. Statens forurensningstilsyn (SFT), omfattende utprøving og demonstrasjon av denne satellittens evne til å oppdage oljeforurensning på havoverflaten. Som et resultat av dette, ble verdens første rutinemessige oljesølovervåkning ved hjelp av radarsatellitt etablert ved TSS i 1994.

ERS-1 ble etterfulgt av den nesten identiske ERS-2 i 1995.

ERS-satellittene går i bane ca. 800 km over bakken, veier et par tonn, har store solpaneler som gir strøm, og en rekke antenner for observasjon og kommunikasjon.

Den kanadiske satellitten Radarsat-1 ble skutt opp høsten 1995. Den har en mer fleksibel radarantenne enn ERS-satellittene. Radarsat-bilder leses ned og behandles (prosessereres) ved TSS. Det å ivareta iskartlegging var begrunnelsen for at Radarsat ble skutt opp. En viktig anvendelse av bildene i Norge i dag er en grov kartlegging av fartøyaktivitet i Barentshavet forut for tokt med Orion-fly.



ESAs siste radarsatellitt Envisat, ble skutt opp 1. mars 2002 med en Ariane 5-rakett. SAR-instrumentet om bord i Envisat har flere nye egenskaper, som bl.a. gir mulighet for bedre å påvise menneskelagde objekter. Den vil imidlertid ikke gi noen bedre oppløsning enn sine forgjengere.

Det 70 m<sup>2</sup> store solpanelet er bygd for å produsere en strøm på 6600 W. For kontinuerlig drift trenger instrumentene tilgang til 1700W. Satellitten overvåker blant annet skipstrafikk, fiske, isforholdene i arktiske strøk, oljefelt, alger, havstrømmer og bølgehøyde. I tillegg gir instrumentene om bord i satellitten informasjon om klimagasser og dynamikken i atmosfæren.

Følgende er hentet fra ESAs Envisat-program. Programmet skal

- sikre kontinuitet i observasjonene som startet med ERS-1- og ERS-2-satellittene, særlig de radarbaserte observasjonene
- forsøke å forbedre disse observasjonene, spesielt hav- og is- observasjonene
- øke antall observasjonsparametre, for på denne måten å øke kunnskapen om de faktorene som er avgjørende for miljøet
- gi et betydelig bidrag til miljøforskningen, spesielt innen atmosfærelekjemi, havstudier (inkludert marinbiologi) og den faste jords fysikk
- søke en mer effektiv overvåkning og styring av jordas ressurser, både fornybare og ikke fornybare

Canada skøyt opp Radarsat-2 i desember 2007 og Radarsat-3 med 3 meters oppløsning. Disse satellittene kjører parallelt og gir bedre dekning i tid og rom. Radarsat-2 vil gå i bane i minst 7 år.

# Informasjon fra jordobservasjonssatellitter

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Informasjon fra jordobservasjonssatellitter \(52755\)](#)

Satellittdata gir ny og verdifull informasjon knyttet til både lokale, regionale og globale problemstillinger. Når satellittinstrumentene gjør opptak, gjør de det like enkelt i sentrale strøk som fjerne og utilgjengelige strøk.

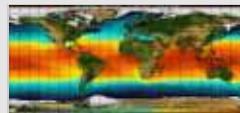
Avhengig av instrumentene om bord innsamles alt fra detaljerte data over relativt små områder til grove data som gir oversikter over store områder. Styrken til satellittdataene er at de gir systematiske og relativt hyppige opptak over relativt store områder med enhetlige metoder. Data kan være tilgjengelig hos brukere bare noen få timer etter opptak.

Observasjoner fra satellitter gjøres uavhengig av landegrenser, og observasjonene kan gjøres i stadig større detalj. Det utvikles også nye typer instrumenter som gir muligheter for andre og mer spesielt tilpassede observasjoner enn de som finnes i dag.

De ulike satellittobservasjonene kan utnyttes på mange måter, både i forskning for å øke forståelsen av prosesser, i forvaltning for å fremstaffe oversikter som grunnlag for planlegging og i operativ drift for å overvåke endringer, for eksempel i landskapet eller i havet. Det har vist seg svært nyttig å integrere satellittdata med andre typer data. Da kommer ofte fordelene med en hyppig dekning av relativt store områder til syne. Dersom satellittdata brukes alene, må de være testet mot bakkemålinger og være representative i tid og rom.

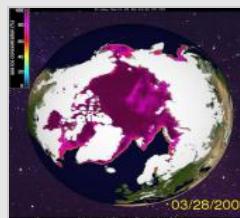
De ulike måtene å bruke satellittdata på stiller forskjellig krav til kunnskap, tilgjengelig teknologi, produkter, tjenester og økonomi.

Bruk av satellittdata



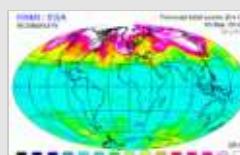
Havoverflatetemperatur fra satellitt.

Opphavsmann: [Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison](#)



Snødekket og havis på nordlige halvkule 28. mars 2008. Bildet er basert på NOAA-data.

Opphavsmann: [University of Illinois at Chicago](#)



Global ozonkonsentrasjon 26.03.2010.

Opphavsmann: [ESA](#)

Utviklingen siden den første jordobservasjonssatellitten ble skutt opp i 1960, har gradvis gjort det mulig å utnytte denne type data til stadig nye anvendelser. Det er karakteristisk innen de fleste anvendelsene at satellittinformasjon bare er en del av datagrunnlaget, men ofte en relativt vesentlig del.

Å utarbeide moderne værvarsler er i dag helt utenkelig uten bruk av satellitter. Vær- og skysystemer beveger seg hurtig rundt kloden, de endrer fort retning og er ofte store i utstrekning. Basisgrunnlaget for å utarbeide værvarsler er systematiske målinger på jordoverflaten, ballongslipp i atmosfæren, matematiske modeller og ulike typer satellittobservasjoner.

Forskning og forvaltning i store, utilgjengelige områder som i Arktis og Antarktis utnytter satellittdata for eksempel i produksjon av kart, overvåking av isbreer, iskant og havsens utbredelse.

I 1980-årene kunne vi første gang observere ozonhullet over Antarktis fra satellitt. Tidligere fantes bare punktmålinger fra bakken. Målingene viste ikke den arealmessige utbredelsen av ozondekket. Til gjengjeld gir disse punktmålingene en god beskrivelse om ozon i de ulike lagene av atmosfæren, mens satellitmålingene bare viste total konsentrasiøn gjennom hele atmosfæresøylen.

Golfstrømmen kan også observeres fra satellitt. Instrumenter om bord i satellitter kan registrere overflatetemperaturer i havene med én grads nøyaktighet. Golfstrømmen starter i Mexicogolfen og beveger seg nordøstover i Atlanterhavet før den når helt opp til nord for Svalbard. Det varme vannet i Golfstrømmen blander seg med det relativt kalde kystvannet langs landområdene og lager store virvler. Golfstrømmen er viktig både for bosettingen og næringsgrunnlaget for befolkningen i Norge. Jordobservasjonssatellitter har nå gjort det mulig til å overvåke Golfstrømmen.

Oppdatert bilde som viser havoverflatetemperaturen registrert fra satellitt, finnes for eksempel på nettsiden til Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison.

I vårt samfunn er forurensning et tiltagende problem. Også her kan satellitter være til hjelp, enten ved å oppdage forurensning av ulike slag tidlig, vise omfanget og virkninger av utslipps samt angi mulig kilde, spesielt fra faste installasjoner. Tilsig fra elver til havene kan i enkelte kystområder gi ulike typer forurensninger, og satellittdata kan bidra til å følge slik forurensning over tid.

# Satellittovervåkning av vulkaner og vulkanutbr..

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Satellittovervåkning av vulkaner og vulkanutbrudd \(54389\)](#)

Det fins tusenvis av vulkaner rundt om i verden. Hvert år er det omkring 60 vulkaner som har utbrudd. Bakkebasert overvåkning gjøres i dag bare for et begrenset antall vulkaner. Opp til nylig har mange vulkaner i øde områder ikke vært overvåket. Men ved bruk av satellitter er dette i ferd med å endre seg.

Det er en rekke værsatellitter og forskningssatellitter i bane som kan gi bildeinformasjon om utslip fra vulkaner. Geostasjonære værsatellitter som Europas Meteosat og amerikanske GOES kan gi nærmest kontinuerlig dekning, men den romlige oppløsningen er dårlig. Også de polare værsatellittene (MetOp, NOAA AVHRR) har nokså grov oppløsning (omkring 1 km).

Forskingssatellitter som NASAs Terra og ESAs ENVISAT har optiske instrumenter som kombinerer stor sporbredde med noe bedre romlig oppløsning (ca. 300 m). Dette er forløpere til neste generasjon vær- og miljøovervåkingssatellitter som amerikanske JPOESS og europeiske Sentinel-3. Det fins også en rekke satellitter i bane som tar bilder med detaljoppløsning rundt 20 meter, men med vesentlig mindre synsfelt (sporbredde). Noen satellitter kan også registrere varmestråling, slik som ASTER-instrumentet på NASAs satellitt Terra. Da kan man tydelig se lavaen dersom det ikke er for mye skyer.

## Kjemi fra verdensrommet

Noen satellitter har instrumenter som er spesialisert for måling av SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vanndamp eller ozon. Det er imidlertid ingen satellitter i dag som er skreddersydd for avbildning av aske- og svovelskyer fra vulkaner, men ved kombinasjon av flere satellitmålinger kan man likevel hente ut mye informasjon.

NASAs satellitter Aqua og Aura har instrumenter som er særlig godt egnet til å detektere SO<sub>2</sub> og kan dermed bidra til overvåkning av vulkanutslipp. Også ESAs ENVISAT og EUMETSATs MetOp-A kan gi verdifull informasjon om atmosfærrens klima.

## Bedre vulkanvarsling for luftfarten

I 1995 ble det opprettet en del regionale Volcanic Ash Advisory Centres (VAACs) for å samle informasjon om vulkansk aske og vurdere mulig fare for luftfarten. Norske forskere er i dag sentralt involvert i utviklingen av neste generasjon overvåkingssystemer for luftfarten.

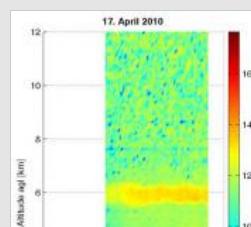
NILU leder det viktige ESA-prosjektet SAVAA (Support to Aviation for Volcanic Ash Avoidance), som fokuserer på etablering av nye metoder for VAAC-ene når det gjelder nærmest tids bruk av satellitmålinger og numerisk modellering av spredning. Det legges særlig vekt på bruk av infrarøde observasjoner fra satellitter i dette prosjektet.



ENVISAT-bilde av vulkanrøyken på Island 19. april 2010



Satellittbilde fra NASAs ASTER-instrument viser både røyk og lava



Lidar-måling fra ALOMAR  
17. april 2010



ESAs satellitt ADM-Aeolus skal måle vind og partikler fra 2012

I dag eksisterer det ingen standard satellittdataprodukter for vulkansk aske og vulkansk gass (i hovedsak SO<sub>2</sub>). Man har heller ikke internasjonale standarder på plass for satellittbaserte vulkanprodukt, eller trygge grenser for luftfart nær vulkanske skyer i atmosfæren. Standardisert satellittbasert informasjon om injeksjonshøyden til vulkansk materiale vil være essensielt for å få på plass dette.

Lidar (laser-radar) er et meget effektivt instrument for å detektere støv i atmosfæren, og kan i tillegg bestemme i hvilken høyde støvlaget ligger, og dets tykkelse. Dette forutsetter imidlertid at det er fri sikt mellom laseren og støvpartiklene som skal måles. I Norge gjøres slike målinger fra laser-observatoriet ALOMAR på Andøya. ALOMAR brukes mye for å verifisere andre målinger fra satellitt, slik at satellittinstrumentene kan finjusteres.

For de luftlagene som er aktuelle for flytrafikk, vil det imidlertid ofte være skyer mellom bakken og området som skal studeres. I prinsippet ville det derfor vært svært ønskelig å kunne gjøre lidar-målinger fra satellitt. Dette har imidlertid vist seg å være en betydelig teknologisk utfordring, og bare et par eksperimentelle lidar-satellitter har vært i bane så langt. ESA har i øyeblikket to slike satellitter under bygging:

- ADM-Aeolus, som skal skytes opp i 2012, har en stor laser som primært skal måle vindhastigheten i ulike atmosfærerelag ved måling av doppler-effekt på refleksjonen fra partikler i atmosfæren. Deteksjon av aerosoler vil være en annen mulig anvendelse av denne satellitten.
- EarthCARE, som skal skytes opp i 2014, er et samarbeidsprosjekt mellom ESA og den japanske romorganisasjonen JAXA for studiet av viktige klimaprossesser. Satellitten vil ha en rekke sensorer, deriblant aerosol-lidar og sky-radar, samt instrumenter for å måle innstråling fra sola og utstråling fra jorda.

Følg lenken til ESAs forskningsprogram Living Planet for å hente mer informasjon om fremtidige forskningssatellitter.

## Bruk av radar

Radarsatellitter kan se igjennom skyer og dessuten observere om natten. De fleste radarsatellittene er dessuten så stabile i sin bane at man kan sammenlikne fasefronten for målinger gjort på ulike omløp. Dette kalles SAR-interferometri. Det såkalte InSar-systemet (Interferometric Synthetic Aperture Radar) registrerer forandringer i jordplaten som er for små til at seismiske instrumenter registrerer dem som rystelser. InSAR er spesielt egnet for å oppdage aktivitet rundt "sovende" vulkaner.

Denne teknikken gjør det mulig å måle endringer på noen få millimeter i terrenget over uker eller måneder. Denne måten å observere på har de siste årene gitt store framganger innen kartlegging av fjellskredfare, jordskjelv og analyse av nedsynkning av bygninger, gruver og tuneller.

Mange av verdens farligste vulkaner følges nå også jevnlig med SAR-interferometri. Man kan se hvordan fjellsiden beveger seg etter hvert som det indre magma-trykket øker eller avtar. Denne teknikken fungerer best der hvor det er tørt og lite vegetasjon. Den er ikke så godt egnet på de deler av fjellet hvor det er isbreer og snø. En alternativ måte for satellitt-seismologiske målinger er utplassering av nøyaktige GPS-mottakere ved vulkanen. Disse vil vise nøyaktige bevegelser der hvor de er plassert. Kombinasjonen av SAR-interferometri og GPS-stasjoner gir et særdeles godt bilde av bevegelsene i fjellsiden.

## Digitalt og analogt bilde

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Digitalt og analogt bilde \(56787\)](#)

Under tolkning av flybilder arbeides det med fotografier som er et eksempel på hva vi kaller analoge bilder. Med dette menes bilder som er direkte representert ved en fysisk størrelse, f.eks. lysintensitet, fargestoffer eller et videosignal. Digitale bilder skiller seg fra de analoge ved at de er representert ved tall i stedet for en fysisk størrelse. Det kan være flere grunner til at vi ønsker bilder på digital form. For satellittbilder er det oftest slik at opptak og bildeoverføring skjer digitalt. Digitale bilder er lettere å forbedre med tanke på tolkning eller presentasjon, og det er mulig å utføre omfattende prosessering for avansert analyse.

Digitale fjernmålte bilder kan oppnås på to måter, enten direkte under opptak, eller indirekte ved digitalisering av fotografier eller video. Direkte digitale opptak er typisk for jordobservasjons-satellittene, men slike opptak foregår også fra lavere plattformer, f.eks. fly. Her vil strålingen fra jordoverflata digitaliseres direkte. En indirekte måte er å digitalisere et flybilde, der strålinga fra jordoverflata er representert som svertning på filmen. Graden av svertning kan måles ved hjelp av et instrument som mäter optisk tetthet eller lysabsorpsjon (densitometer), som sveiper (skanner) over bildet.

Innen fjernmåling arbeides det med både analoge og digitale bilder. Som regel har dette sammenheng med om opptaket har skjedd digitalt eller fotografisk. Dersom det gjøres en sammenligning mellom fotografier og digitale opptak, vil ofte fotografiene bli foretrukket på grunn av mye bedre geometrisk (romlig) oppløsning i forhold til opptakshøyden. Derimot vil digitale opptak gi bedre spektral (skille mellom ulike bølgelengder) oppløsning både ved at informasjon fra en større del av spekteret er tilgjengelig, og ved at flere spektralbånd innenfor den fotografiske delen av spekteret (synlig og nær-IR) kan bli målt samtidig. Digitale opptak har også en bedre radiometrisk (stålingsstyrke) oppløsning ved at en med dagens sensorer kan skille mellom flere intensitetsnivåer enn ved fotografering. Satellitter kan ta bilder over samme område langt oftere enn fly, og kan lettere sende ned digitale bilder enn fotografier. Derfor vil digitale satellittbilder kunne ha en mye bedre temporal (tidsmessig) oppløsning enn andre opptak.

Instrumenter om bord på den europeiske værsatellitten Meteosat registrerer samtidig innen ulike deler av det elektromagnetiske spekteret. Resultatet er produkter innen ulik anvendelse.

Ved fotografering dannes det et latent bilde på filmen ved at filmens kjemiske egenskaper endres der den har blitt eksponert for lys. Filmens radiometriske responskurve (følsomhet for ulike frekvenser) vil kunne variere noe fra filmrull til filmrull på grunn av ulik kvalitet på filmrullene samt valg av framkallingsmåte. Dette gjelder særlig for infrarøde opptak.

Ved digitale opptak blir strålingsnivået målt av sensorer og konvertert til digital form. Disse dataene danner også et latent bilde, men her i form av en datafil. Hvor mye informasjon som ligger i dataene, er i hovedsak bestemt av sensorens nøyaktighet, av konverteringen til digital form, og av hvor store datamengder som kan overføres eller lagres. Sensorene om bord i satellittene gir stort sett mer stabil respons enn fotografisk film.

Et latent bilde må framkalles for å bli synlig. I framkallingsprosessen vil bare deler av den latente radiometriske informasjonen komme med. Siden det latente bildet forsvinner fra filmen i den fotografiske framkallingsprosessen, vil noe av den radiometriske informasjonen gå tapt. Valg av framkallingsmåte vil dermed avgrense hvilke intensitetsnivåer som vil komme med på filmoriginalen. Det digitale bildet kan derimot framkalles gang på gang på en bildekjerm uten at det latente bildet forsvinner. Avhengig av formålet med bildetolkingen kan bildet framkalles på skjermen på ulike måter uten varig tap av informasjon. Riktignok ligger det ofte noe mer informasjon på en fotografisk film enn hva øyet kan oppfatte, og filmen kan kopieres på ulike måter for å hente fram den skjulte radiometriske informasjonen. Det er ofte hensiktsmessig å digitalisere bildene for å utføre omfattende bildeforbedring.

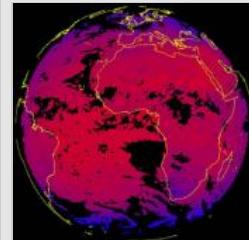
Fotografiske og digitale opptak inneholder som beskrevet over ulike typer informasjon. Når det gjelder tolkning av bildene, kan dette foregå ved en skjerm eller på papirbilder. Dette er i prinsippet uavhengig av opptaksmåte, for digitale bilder kan plottes ut og eventuelt tas med ut i felt, og fotografier kan projiseres på en skjerm.

Bilder fra satellitter er som nevnt ikke fotografier i vanlig forstand, men digitale data som er behandlet slik at de fremkommer som bilder. Et digitalt bilde er representert med tall hvor bildet er inndelt i et gitt antall elementer, piksler (picture elements), som hvert er assosiert med en tallverdi. Jo større pikslene er desto mer grovkornet blir bildet å se til.



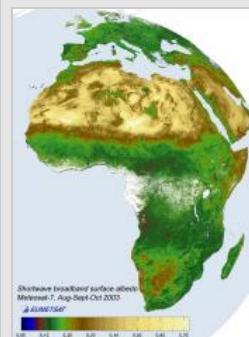
Infrarødt bilde fra Meteosat-

7



Stråling fra klar himmel

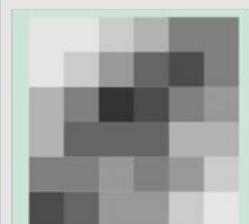
(Clear Sky Radiances)



Gjennomsnittlig albedo

basert på informasjon fra

Meteosat-7 EUMETSAT



1	1	2	3	5	5
1	2	4	6	7	5
3	5	8	7	5	4
3	6	6	6	3	3
5	5	4	5	4	2
7	6	4	4	2	1

1	1	2	3	5	5
1	2	4	6	7	5
3	5	8	7	5	4
3	6	6	6	3	3
5	5	4	5	4	2
7	6	4	4	2	1

Digitalt gråtonebilde

representeres ved tall -

NAROM

Pikselverdien er et tall som representerer intensitetsverdi eller gråtonen i bildet. De fleste satellitter produserer bilder som inndeles i 256 intensitetsnivåer for hvert bildelement (pixel). Dette kalles bildets gråtoneskala. Skalaen viser oversettelsen mellom pikselverdi og gråtone. Dette kalles en LUT, - Look Up Table. En LUT er en oversettelsesskala fra bildeelementenes 256 verdier til aktuelle gråtoner. Dersom et dataprogram har tilgjengelig 16 gråtoner, betyr det at enhver heltallsverdi fra 0 til 255 er tilpasset en verdi fra 0 til 15.

Dataprogram har også en standard (default) LUT når det gjelder tilgjengelige farger. Den samme fordelingen av verdier som skjer for gråtoner gjelder også for farger. Denne fordelingen gir oss en standard fargeskala (palett). De fleste billedbehandlingsprogram gir brukeren mulighet for å endre paletten.

Digital bildebehandling er et vidt og omfattende felt som benyttes i betydelig omfang innen for eksempel medisin, seismikk og jordobservasjon.

## Satellitter kartlegger og overvåker rasfare, n..

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Satellitter kartlegger og overvåker rasfare og nedsynking \(55198\)](#)

De største naturkatastrofene i Norge har vært knyttet til ulike typer skred. Statistisk sett kan vi forvente rundt ti store fjellskred, leirskred og snøskred i løpet av de neste hundre årene. Vi kan ikke hindre slike naturkatastrofer å finne sted, men kartlegging og overvåking gjør det mulig å redusere skadevirkningene, samt redde liv.

Rasfare kan best overvåkes i to trinn, med en grov, satellittbasert, heldekkende kartlegging av rasfarlige områder, og med mer nøyaktig oppfølging av utsatte områder der den grove kartleggingen viser at det kan være rasfare. Flere rasfarlige områder er identifisert, som Åknes/Tafjord i Møre og Romsdal og Lyngen i Troms.

Med radarinstrument om bord på satellitt er det mulig å kartlegge bevegelser i fjellparti på millimeternivå. Dette er en ny og unik mulighet til å utnytte satellittdata til samfunnsviktig formål. Foruten å kartlegge rasfarlige områder, kan metoden brukes til å måle nedsynking og bevegelse på bakken. En styrke ved satellittbasert kartlegging er at den gir mulighet til å gjøre opptak over store geografiske områder. Det er dermed ikke nødvendig å kjenne til utsatte områder på forhånd, og ofte kan slik satellittbasert kartlegging avsløre nye utsatte områder som det kan være behov for å følge utviklingen til.

### Bruk av satellittdata til kartlegging av rasfare og nedsynking

Det første fokus på bruk av satellittdata for å kartlegge geologiske forhold var med bruk av optiske satellittdata (Landsat-data) for å kartlegge sprekker i jordskorpa, noe som kunne være svakhetssoner ved større konstruksjoner som dammer, bruer og tunneller. Bruksområdet var avgrenset til større overflate-observasjoner.

Dagens metode, der en kartlegger rasfare og nedsynking ved SAR-interferometri, er en ny og unik bruk av satellittdata. SAR (syntetisk aperturradar) interferometri – InSAR – betyr at to eller flere radarbilder av samme punkt kombineres slik at det kan foretas meget nøyaktige målinger av landjordas bevegelser mellom forskjellige datainnsamlinger.

Den europeiske satellitten Envisat har en bane som repeteres hver 35. dag, noe som gir unike muligheter til å overvåke jordas overflate. Dersom et punkt på bakken har forflyttet seg mellom avbildningene, så kan dette måles med svært høy nøyaktighet.

Det planlegges rutinemessige og systematiske opptak med den kanadiske satellitten RADARSAT over aktuelle områder i Norge. En slik tidsserie vil legge grunnlaget for å gjøre en kartlegging av alle potensielle rasfarlige områder i Norge.



RADARSAT-2 er en bedre satellitt enn RADARSAT-1 for SAR-interferometri, og den europeiske forskningssatellitten Sentinel-1 vil bli en bedre satellitt enn Envisat.

# Satellittsamarbeid hjelper ved katastrofer

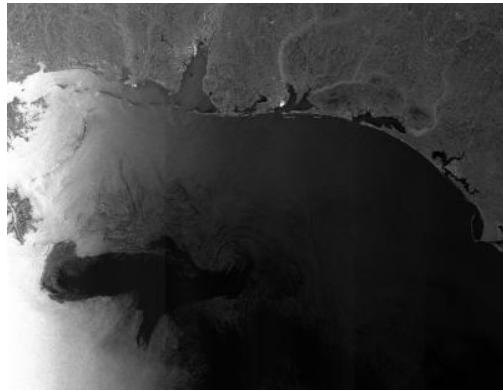
Forfatter: Birgit Strømsholm

[Satellittsamarbeid hjelper ved katastrofer \(60202\)](#)

En internasjonal avtale om samarbeid gjør det mulig for katastroferammete land å få satellittbilder raskt og gratis. Disse er vitale for hjelpearbeidet.

Ved store naturkatastrofer er det svært viktig å få en oversikt over områdene som har blitt rammet. Det gjøres raskest og enklast ved hjelp av satellitter. De kan nemlig se store områder på kort tid, uavhengig av vær og dagslys.

The International Charter for Space and Major Disasters sørger for at land og områder som har blitt rammet av katastrofer, får tilgang til satellittdata. Det ble f.eks. aktivert av USA i april 2010 i forbindelse med oljesøl i Mexicogolfen. Det var USGS (U.S. Geological Survey) som sendte forespørsel på satellittdata på vegne av U.S. Coast Guard.



Oljeutslipp utenfor Mexicogolfen, registrert av radarinstrument om bord på Envisat-satellitten 29. april

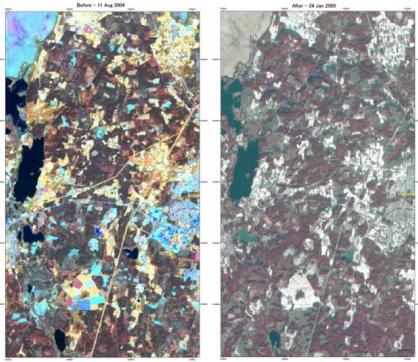
2010

Opphavsmann: [ESA](#)

The International Charter for Space and Major Disasters er et samarbeid mellom flere av verdens romorganisasjoner og ulike eiere av satellitter. Normalt sett vil de fleste romorganisasjoner og satellitteiere ikke kunne iverksette så raskt. Det er som oftest kø på bestilling av satellittdata. I tillegg er slik informasjon svært kostbar. Samarbeidsavtalen gjør at satellittdata som normalt ville ha en høy kostnad og en lang bestillingstid, blir gratis, bestilt umiddelbart og får prioritet.

I hvert land som er med på avtalen, finnes det en organisasjon som har muligheten til å aktivere avtalen. Når avtalen blir aktivert, får medlemslandene hjelp til å velge hvilken type satellittdata de trenger. Satellitten med de rette instrumentene blir så bedt om å samle inn den nødvendige informasjonen. Fra aktiveringen skjer til dataene foreligger, går det ca. 24 timer.

I forbindelse med den kraftige orkanen sør i Sverige i januar 2005 så ble avtalen aktivert av Statens räddningsverk (SRV) 14.01. 2005. Illustrasjonen viser SPOT-satellittbilder av områder som ble rammet før orkanen (11. august 2004) og etter orkanen (24. januar 2005). Norge har ennå ikke hatt behov for å aktivere avtalen.



Orkan i Sverige i januar 2005.

Opphavsmann: [ESA](#)

Norge er med på samarbeidsavtalen gjennom sitt medlemskap i den europeiske romorganisasjonen ESA. Fra europeisk side er det stort sett bilder fra miljøsatellitten Envisat som brukes til anskaffelse av data for samarbeidet. Envisat har radar og kan ta optiske bilder, men med relativt grov oppløsning. Med de nye GMES-satellittene vil ESA kunne levere bedre data raskt ved store katastrofer.

FN har vært medlem av charteret siden 2003. Siden den gang har alle aktiveringene gått via FN og FN-organisasjonen UNOSAT i Sveits. UNOSAT er det operasjonelle kontaktpunktet for satellittdata for de ulike FN-organisasjonene. Når det trengs, er det UNOSAT som ber om at charteret blir aktivisert. Organisasjonen samordner så hjelpearbeidet. De ser hvilke data som trengs, og bestiller disse via charteret. Basert på disse dataene produserer UNOSAT så kart og analyser til bruk i felten.

Charteret er helt klart viktig for redningsarbeidet. Med årene har samarbeidet blitt bedre og bedre. FN bruker bilder fra charteret ved så å si hver eneste naturkatastrofe. Det har blitt helt integrert i måten FN jobber på. Det er også mulig å aktivere charteret i forkant når man har helt klare tegn på at en katastrofe kommer til å skje. I fremtiden vil UNOSAT få inn bruk av charteret som en del av systemet for tidlig varsling av naturkatastrofer forårsaket av klimaendringer.

UNOSAT samarbeider også med norske KSAT (Kongsberg Satellites Services) for å få bedre satellittbilder og raskere tilgang. I Norge er det hovedredningssentralen i Bodø, på vegne av Justisdepartementet, som kan aktivere ordningen for Norge.

# Korrigering og kalibrering av satellittbilder

Forfatter: Birgit Strømsholm

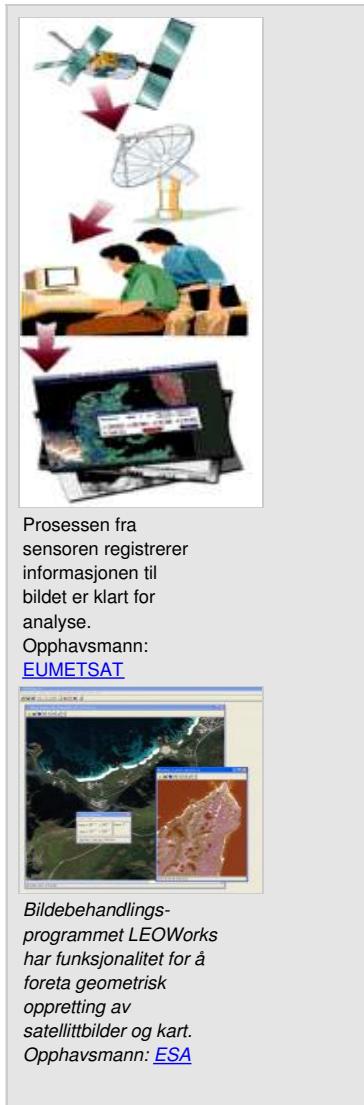
[Korrigering og kalibrering av satellittbilder \(56788\)](#)

Før det nedleste bildet (rådata) tolkes, er det behov for bildekorreksjon for å gi et mest mulig representativt bilde av jordoverflaten.

Da vanndamp og andre drivhusgasser i atmosfæren absorberer og sprer elektromagnetisk stråling, vil strålingen bli bremset, og en del av strålingen når derfor ikke frem til satellittens sensorer. Det foretas derfor en radiometrisk korreksjon for å justere for denne feilkilden. Radiometrisk korreksjon av måleverdiene (radiometrisk verdi) er også viktig for å kunne sammenligne flere datasett og dermed fremskaffe endringsdata.

I tillegg er det nødvendig med en geometrisk korreksjon (geometrisk oppretting) da opptaksprosessen gjør at bildet blir noe forvrengt i forhold til de korrekte geografiske koordinatene. Skjevheten kommer hovedsakelig av at jorda roterer fra vest mot øst når bildet bygges opp. Dette fører til at hver ny linje i bildet starter på et punkt lengre vest enn det foregående.

En vanlig prosedyre for geometrisk oppretting er å identifisere noen kontrollpunkter i bildet og spesifisere de geografiske koordinatene til disse. Raffinerte bildebehandlingsprogram har da innebygd en omregningsfunksjon hvor et sett omregningskoeffisienter beregnes ut fra de angitte kontrollpunktene, og bildet blir automatisk korrigert og tilpasset en valgt kartprojeksjon. Geometrisk korreksjon er nødvendig for å kunne bruke data sammen med kart eller andre geografiske data.



Det er viktig å presisere at det alltid er behov for å kontrollere informasjonen fra satellitten mot virkeligheten på jorden (bakkesannhet, ground truth). Dette skjer i praksis ved at man foretar kontrollmålinger på jorden i utvalgte lokaliteter samtidig med at satellitten skanner bildet. I forbindelse med vegetasjonskartlegging kan man høste biomassen og veie den, samt registrere hvilke vekster som er på de ulike feltene eller jordteigene. Disse informasjonene korreleres med satellittdata for de samme lokalitetene. Korrelasjonen uttrykker sammenhengen mellom det satellitten observerer, og det som er observert på bakken. Ved gjentatte målinger over en hel vekstssesong er det mulig å få oversikt over sesongens samlede biomasseproduksjon, ikke bare i kontrollpunktene, men også over større områder hvor satellitten observerer.

Deretter kan et bildebehandlingprogram benyttes for å manipulere satellittbildet slik at bakkeinformasjonen tolkes inn i bildet.

# Tolking av satellittbilder

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Tolking av satellittbilder \(56791\)](#)

Digital bildebehandling er et vidt og omfattende felt, men vi skal her nøyne oss med en kort innføring av metoder og teknikker som blir hyppig brukt ved tolking og analyse av digitale satellittbilder.

Ulike bildebehandlingsprogram benyttes for å kunne trekke ut den aktuelle informasjonen fra satellittbildet. De fleste brukere av satellittdata benytter seg av kommersiell programvare istedenfor programmer de har laget selv. Det eksisterer mange forskjellige bildebehandlingsprogram på markedet, og de kjører under forskjellige operativsystemer. Programmene er mer eller mindre avanserte med hensyn til brukergrensesnitt og funksjonalitet.

## Kontrast og histogram



Et bilde kan karakteriseres bl.a. ved kontrast og intensitet. Disse kvalitetene ved bildet kan det være hensiktsmessig å forbedre, enten det nå er fordi bildet generelt har for dårlig kontrast, eller fordi det ønskes å framheve kontrastene i et bestemt delområde av bildet.

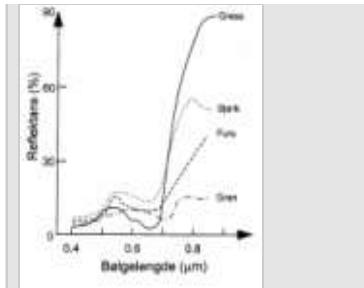
Før man starter analyse av satellittbildet, kan kontrastmanipulasjon iverksettes. Dette gjøres ved en justering av forholdet mellom pikselverdi og gråtone slik at interessante kontraster i bildet blir fremhevet. Kontrastmanipulering gjøres ofte i forbindelse ned analyser for å utnytte øyets evne til å skille mange intensitetsverdier. De to mest brukte kontrastforbedringsmetodene er lineær kontraststrek og histogramutjevning. Et histogram viser hvordan pikslene i bildet er fordelt på de forskjellige gråtonene.

Lineær strekk er en svært enkel form for kontrastforbedring. Overføringsfunksjonen er en lineær funksjon, dvs.  $y = ax + b$ , med en rettlinjet graf. En slik funksjon beskrives av to parametre, her  $a$  og  $b$ , men kan også defineres ved f.eks. to punkt på linjen. Graden av kontrastforbedring beskrives av stigningstallet  $a$ . Forbedring av kontrasten krever at  $a > 1$ , for når  $a < 1$ , vil kontrasten dempes. Høyere verdi tilsvarer brattere graf og gir større kontrast (hardere kontrast i bildet). Av to funksjonsgrafer med samme stigningstall vil grafer lengst til høyre gjøre bildet mørkere enn venstretilte grafer vil gjøre.

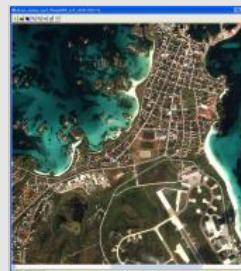
Ved lineær kontraststrek endres histogrammet. Pikselverdiene innenfor et bestemt intervall ( $\text{min.} < x < \text{maks.}$ ), strekkes mest mulig, dvs. fordeles over hele kontrastområdet, 0–255. Her vil valget av 'min.' og 'maks.' entydig bestemme funksjonen. Vi får selvsagt ikke flere pikselverdier enn før, men ubrukete pikselverdier spres innimellom. Dermed kan vi visuelt lettere oppfatte den informasjonen som ligger i dataene.

Med kontrastmanipulasjon spres histogramstolpene utover på et størst mulig antall gråtoneverdier. Dette er en standardfunksjon innebygget i de fleste billedbehandlingsprogrammer. Ved histogramutjevning gjøres nettopp dette, slik at en får en så god spredning av pikselverdiene som mulig, dvs. at alle pikselverdier skal være like sannsynlige.

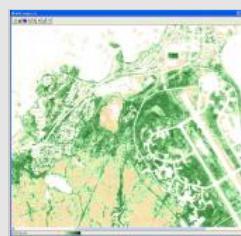
#### Valg av spektrale bånd



*Spektrale signaturer for ulik type vegetasjon - NAROM*



*QuickBird fargebilde.  
Oppaket er gjort 5. august  
2009. NAROM*



*NDVI-bilde beregnet av røde og nær-infrarøde spektrale bånd av instrumenter om bord på QuickBird-satellitten.  
Mørkeste grønne farge er områder med større vegetasjonsaktivitet enn de lysere fargene. NAROM*

Ved tolking av satellittbilder velger man kanal eller kanalkombinasjoner av satellittbildet avhengig av hvilken informasjon man ønsker. I denne sammenheng kan det være nyttig å studere ulike overflatetypes spektrale profil. Mengde og spektral fordeling av den reflekterte energi er anvendt innen jordobservasjon for å få frem informasjon om den reflekterende overflatens egenskaper (spektral responskurve).

Vanligvis vil en satellittsensor måle elektromagnetisk stråling i flere bølgelengdområder (spektrale bånd) samtidig. Hver piksel får da en verdi for hvert spektralt bånd, som tilsvarer strålinga fra bakkeelementet i disse bølgelengdene. Fra dette datasettet kan vi lage et bilde for hver kanal. Disse enkeltbildene kan behandles hver for seg, eller de kan kombineres på ulike måter, f.eks. ved at det dannes et sammensatt fargebilde av tre enkeltkanaler. På en fargeskjerm dannes et slikt bilde ved at de tre enkeltbildene vises samtidig i henholdsvis rødt, grønt og blått.

En måte å undersøke informasjonen i et satellittbilde på er å kombinere to eller flere kanaler for å lage et nytt bilde. Verdiene i hver piksel i det nye bildet er avhengig av hvordan bildene er kombinert. Det fins to typer kombinasjon, aritmetisk (benytter addisjon, subtraksjon, multiplikasjon og divisjon) og logisk (benytter logiske uttrykk som AND, OR, NOT). Det er mulig å kombinere disse to metodene.

Multibåndsmanipulasjon er en hyppig brukt metode for å overvåke vegetasjonen. Metoden baserer seg på forskjellen i samspillet mellom vegetasjon og elektromagnetisk energi i de røde og nær infrarøde (NIR) bølgelengdene. Reflektanskurven for grønn vegetasjon i vekst viser lav refleksjon i det røde området, da plantene utnytter spesielt rødt lys i fotosyntesen. NIR-lys er ubrukelig for plantene og reflekteres effektivt. Forskjellen mellom refleksjonen i det nær infrarøde og det visuelle området er derfor stor i områder som er dekket av grønne planter i vekst, og kan brukes som et uttrykk for fotosyntesen og veksten i plantene.

En vanlig metode for å hente informasjon om biomassen og vegetasjonens tilstand er å bruke vegetasjonsindeks, som er kombinasjoner av de to spektrale båndene rødt (R) og nær-infrarødt (NIR). I litteraturen er det foreslått en rekke varianter av vegetasjonsindeksen.

Ved hjelp av bildebehandlingsprogram er det mulig å beregne bildets NDVI-verdi, Normalisert Differens VegetasjonsIndeks. Den normaliserte vegetasjonsindeksen NDVI =  $(\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})$  er i utgangspunktet en differanse mellom kanalene (IR – R), men korrigert for varierende belysning gitt ved (IR + R). Dette forholdet vil gi høye verdier for frisk vegetasjon og lave verdier for lite aktiv vegetasjon. Resultatet av brøken refereres gjerne til som en vegetasjonsindeks (NDVI).

## **Bruk av farger og klassifisering av satellittb..**

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Bruk av farger og klassifisering av satellittbilder \(56792\)](#)

For å tolke og analysere et satellittbilde er det ofte hensiktsmessig å benytte fargefremhevingsmetoder. Bildene bearbeides interaktivt ved skjermen for å lage fargebilder som best mulig fremhever de temaene en ønsker å kartlegge. Dette kan være dyrket mark, snaujell, barskog, lauvskog.

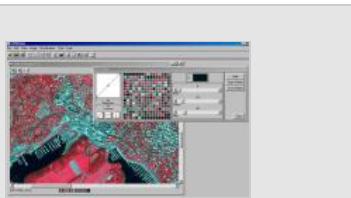
Det skiller mellom pseudofarger og sammensatte fargebilder. Pseudofarger er egentlig gråtonebilder der man har tilordnet hver gråton en oppslagstabell (LUT, Look Up Table). Pseudofarger er ikke en kanalsbilde. Det er separate overføringsfunksjoner som tilordner pikselverdi en ny verdi i henholdsvis rødt, grønt og blått. Dette kan vi definere praktisk talt enhver farge til en bestemt verdi. En slik tredobbel oppslagstabell kalles en pseudofarget. En slik tredobbel oppslagstabell kalles en pseudofarget til å framheve forskjeller i pikselverdi enda mer enn det en vanlig gråtonebilde gjør.

En annen variant er å la fargene løpe kontinuerlig gjennom spekteret. Et termisk satellittopptak kan en på denne måten legge blå farge på kalde havoverflater og rødt på varme havoverflater. Det følger at fargene gjennom spekteret, og la rødt representere varme havoverflater.

Ved kalibrering av et termisk satellittbilde er det hensikt med å få frem temperaturen i havoverflatene. Et slike bilde kalles et satellittbilde over havoverflaten (SST-bilde). Det er utviklet standardmetoder for å få fram havoverflatetemperaturer fra satellittdata.

Sammensatte fargebilder lages ved at tre av kanalene blir brukt som primærfarge. For Landsat TM-bilde er kanal 1–3 ideelt til dette. De vises som grønt, grått og rødt. De andre kanalene ligger i hver sin grafiske hukommelse. Ved hjelp av teknologi kan hver kanal forbedres uavhengig av de andre kanalene. Dette gjør at samme bilde kan ha mange flere kanaler enn en gråtonebilde. Siden hver kanal kan ha 256 verdiene, kan sammensatte fargebildet teoretisk kunne ha  $256^3 = 16\text{ millioner}$  verdiene (16 bit).

## Klassifisering



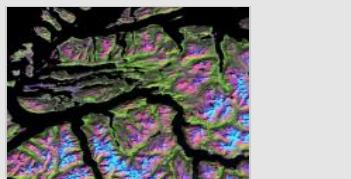
Pseudofargebilde.  
Satellittbilde over Oslo  
havn  
Opphavsmann: [Narom](#)



Satellittbilde som viser  
havoverflatetemperatur  
(SST-bilde). Bildet er  
et termisk opptak fra  
28.06. 2010  
Opphavsmann:  
[Wetterzentrale.de](#)



Naturlig fargebilde,  
Landsatbilde over  
Sunnmøre  
Opphavsmann: [Narom](#)



Falskfargebilde,  
Landsatbilde over  
Sunnmøre  
Opphavsmann: [Narom](#)

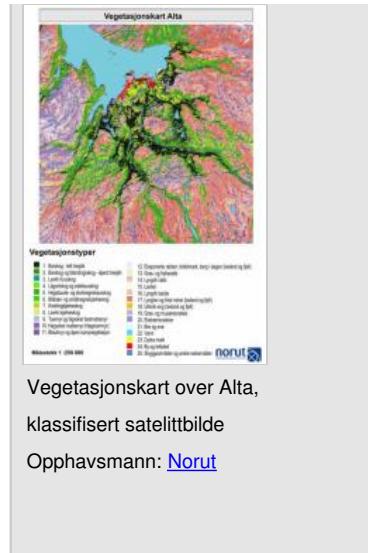
Kanalene er ikke  
RGB, men mellom-IR,  
nær-IR og rød, altså  
falske farger

I tillegg er det mulig ved hjelp av bildebehandlingsprogrammer å klassifisere vegetasjonen. I den forbindelse er det viktig å kjenne til at forskjellige type overflater som vann, sand, skog, korn og gress har forskjellig spektral respons. Det at forskjellige overflatetyper reflekterer sollys ulikt, muliggjør klassifisering av multibånds satellittbilder.

Målsettingen for klassifisering av et digitalt satellittbilde er å tilordne hver piksel i bildet til en klasse. Det finnes to hovedtyper klassifisering: styrt og ikke-styrt klassifisering.

Styrt klassifisering er det mest vanlige verktøyet for analyse av satellittbilder. Det finnes flere ulike typer styrt klassifisering, og den praktiske prosessen kan generelt beskrives i fem steg:

1. Bestem informasjonsklassene, som f.eks. vann, dyrket mark, skog, osv.
2. Finn representative piksler for hver klasse. Disse pikslene kalles treningsdata og kan f.eks. bestemmes ved hjelp av feltarbeid eller fra eksisterende kart.
3. Bruk treningsdataene til å bestemme parameterne i den aktuelle klassifiseringsalgoritmen.
4. Klassifiser hvert piksel i bildet ved hjelp av klassifiseringsalgoritmen.
5. Presenter resultatet av klassifiseringen, f.eks. som tabeller eller temakart.



Ved ikke-styrt klassifisering tilordnes pikslene i et digitalt bilde til spektrale klasser uten at brukeren på forhånd vet informasjonsinnholdet i disse klassene. Identifikasjonen av klassene skjer ved at brukeren sammenlikner piksler i hver klasse med referansedata, f.eks. kart eller informasjon fra feltarbeid. En slik fremgangsmåte kan være nyttig når man ikke på forhånd vet hvilke informasjonsklasser man er ute etter. Denne teknikken kalles også clusteranalyse.

# Geografiske informasjonssystemer

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Geografiske informasjonssystemer \(GIS\) \(28053\)](#)

Læreplanene for programfaget fjernanalyse og geografiske informasjonssystemer (GIS) omfatter den teoretiske bakgrunnen og den praktiske bruken av GIS med alle steg fra datafangst med ulike metoder, databasebygging, ulike analysetyper til presentasjon og vurdering av kvaliteten. Det dreier seg i stor grad om bruk av datakraft, satellittinstrumentering og satellittdata. Videre handler det om samfunnsfunksjoner som planlegging, ressurskartlegging, meteorologi og ulike typer overvåking.

Læreplanen sier at du skal kunne dette når det gjelder GIS

- bruke nettbaserte læringsressurser
- gjøre rede for anvendelser av GIS og fjernanalyse i ulike fagområder
- forklare grunnleggende teknikker i GIS og anvende dem i praksis
- bruke standard programvare for GIS og bildebehandling
- arbeide selvstendig med ulike typer av geografiske data i et GIS
- beskrive ulike kartprojeksjoner og koordinatsystemer
- forklare ulike datafangstmetoder og vurdere anvendelsen
- bygge opp en database og gjøre rede for ulike databasesystemer og datakomprimering
- bruke ulike analysemetoder basert på raster- og vektordata
- utføre tredimensjonale analyser
- visualisere analyseresultater
- gjøre rede for datakvalitet og metadata
- bruke GIS-kompetanse i inn- og utland
- gjøre rede for hvordan GIS brukes for å vise global miljøstatus og kan bidra til bærekraftig utvikling
- bruke internettssider og -portaler som er basert på GIS og fjernanalyse

Enkelte av læreplanmålene er knyttet til konkrete oppgaver med bruk av egnet programvare. Det gjelder for eksempel følgende kompetansemål

- forklare grunnleggende teknikker i GIS og anvende dem i praksis
- bruke standard programvare for GIS og bildebehandling
- arbeide selvstendig med ulike typer av geografiske data i et GIS
- bygge opp en database og gjøre rede for ulike databasesystemer og datakomprimering
- bruke ulike analysemetoder basert på raster- og vektordata
- utføre tredimensjonale analyser
- visualisere analyseresultater

Tilretteleggingen med bruk av digitale kartdata og satellittbilder er tilpasset egnet GIS-programvare.

# Hva er GIS

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Hva er geografiske informasjonssystemer? \(10416\)](#)

Det finnes mange forklaringer på hva geografiske informasjonssystemer (GIS) er. Her gis det en beskrivelse av hoveddelene som GIS består av.

Geografiske informasjonssystemer (GIS) kan beskrives som IT-baserte systemer for innsamling, bearbeiding, analyse og presentasjon av geografiske data.

## Ulike definisjoner av GIS

Det finnes i dag ikke noen felles internasjonal definisjon. Ulike definisjoner av GIS brukes i forskjellige fagmiljø, men det er blitt svært vanlig å benytte begrepet GIS for en gruppe IT-systemer som fungerer som hjelpemiddel for utdrag og sammenstilling av geografisk informasjon fra geografiske data. Den definisjonen kan dekkes i Bernhardsen (Bernhardsen 2000) sin definisjon, som sier: "Geografiske informasjonssystem er et EDB-system som håndterer geografiske data, opplysninger om egenskaper og relasjoner til objekter som er entydig geografisk stedfestet."

En annen anerkjent definisjon ble skrevet av et tretalls spesialister i 1989. (Hentet fra N. Chrisman, Exploring Geographical Information Systems, 2002, s. 12).

"A system of hardware, software, data, people, organizations and institutional arrangements for collecting, storing, analyzing and disseminating information about areas of the earth."

GIS framstår i dag som et resultat av en teknologisk utvikling innen flere fagområder. Pådriverne til denne utviklingen finner vi i miljøer innen digital kartografi, grafisk databehandling, multimedia og databasesystemer. Grunnleggende kunnskaper om metodene er avgjørende for å kunne utnytte mulighetene denne teknologien gir. GIS forener tradisjonelle geografiske redskaper som kart og kartanalyse med bruken av informasjonsteknologi for raskt å behandle store datamengder.

Det skiller i utgangspunktet mellom geografiske data og geografisk informasjon. I et GIS er det en forutsetning at man har tilgang til data som beskriver noe om hva som finnes hvor. Det kan være kart, egenskapsdata eller bilder.

Med *geografisk informasjon* mener sammenstilte data om objekter som kan stedfestes, og som gir mening og/eller ny kunnskap. Det kan være informasjon om områder på jordas overflate, kunnskap om hvor noe er, kunnskap om hva som er i en gitt lokasjon. Geografisk informasjon kjennetegnes av: - kan være svært detaljert, - er ofte statisk, - krever mye lagringsplass.

## Geografiske data



*Geografiske data*, derimot, er hvilke som helst opplysninger om egenskaper og relasjoner til objekter som er entydig geografisk stedfestet. Geografiske data er vanligvis presentert på kart i form av geometriske elementer (symboler, streker og farger). Koblingen mellom de geometriske elementene og deres egenskaper angis i kartets tegnforklaring. Samtidig som kartet er et effektivt presentasjonsmedium, fungerer det også som en grafisk databank for lagring av data. I det ligger også kartets begrensninger. De lagrede dataene er bearbeidet og presentert på en bestemt måte, ofte for et bestemt formål. Det er ikke enkelt å presentere informasjonen på andre måter. Kartet gir bare ett bestemt og statisk bilde av geografien. I tradisjonell (analog) kartproduksjon måtte mesteparten av materialet produseres på nytt hvis man ønsket å forbedre kartet, lage et nytt produkt eller oppdatere kartet.

Den største forskjellen mellom kart og GIS er at i kart er lagring og presentasjon en og samme sak, mens i GIS er lagring og presentasjon av dataene atskilt. I GIS kan de samme dataene presenteres og analyseres på mange forskjellige måter, og tidkrevende operasjoner kan automatiseres.

Ved å bruke geografiske informasjonssystemer bringes en forenklet verden inn i datamaskinen. GIS-pyramiden viser de ulike nivåene i GIS-prosessen (fritt etter Tor Bernhardsen).

# Kort om historien

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Kort om historien \(10524\)](#)

Et geografisk informasjonssystem (GIS) er i dag et sentralt verktøy for alle som arbeider med kart og stedfestet informasjon, men GIS er et ungt fagområde.



Kolerautbrudd i London i 1854

Opphavsmann: [Narom](#)

GIS har sitt utgangspunkt i tradisjonell temakartografi. Framskrittene innen kartografi, fotogrammetri og datateknologi ga grunnlaget for utvikling av de første GIS i Canada og USA på midten av 60-tallet.

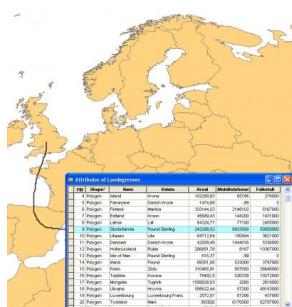
De første systemene ble utviklet med tanke på spesielle anvendelser, særlig også innenfor ren kartproduksjon. Det skjedde i Canada på 1960-tallet i forbindelse med et landsomfattende behov for et stort system for datalagring og produksjon av tematiske kart. Det er Canadian Geographic Information System (CGIS) som regnes som det første GIS.

Det var i 1962 i Ottawa, Canada, at verdens første virkelige operative GIS ble utviklet av Federal Department of Forestry and Rural Development. Det var dr. Roger Tomlinson som var ansvarlig utvikler. Systemet ble kalt "Canadian Geographic Information System" (CGIS) og ble brukt til å lagre, analysere og behandle data samlet inn for å kartlegge jordsmønster, landbruk, rekreasjon, dyre- og fugleliv, skogbruk og arealbruk i målestokken 1 : 50 000. Resultatet skulle benyttes i forbindelse med store utbyggingsprosjekter.

CGIS var verdens første "system" og var en forbedring i forhold til "kartleggings"-programmer da det ga mulighet for kartlag, måling og digitalisering/skanning. CGIS støttet et nasjonalt koordinatsystem som strakte seg over kontinentet, kodete linjer som "buer" hadde en ekte innebygd topologi, og egenskapsdataene ble lagret i separate filer. Resultatet av dette er at Tomlinson er blitt kjent som "far til GIS".

Forskning og undervisning på området har utviklet seg raskt. GIS er en møteplass for mange fag, og GIS som vitenskapsfag er blitt utviklet i parallelle fra de mer tradisjonelle disciplinene geografi, kartfag og informatikk.

Generell programvare var først tilgjengelig på 70-tallet. De første programpaklene som kalte seg GIS, la hovedvekten på den grafiske presentasjonen av kartdata, og hadde sitt grunnlag i DAK-systemer (Datamaskin Assister Konstruksjon). Slik programvare ble opprinnelig utviklet for å representerer 3D-modeller.



Kart og tabelldata i et GIS.

Opphavsmann: [Narom](#)

Utviklingen av GIS har etter hvert skilt lag med DAK-systemer. Den ikke-grafiske delen av informasjonen har også etter hvert blitt en viktig del av GIS. God presentasjon av kartdata stiller dessuten andre krav til den grafiske programvaren enn hva som er vanlig i tradisjonell datagraffikk. Kartpresentasjon krever som regel stor nøyaktighet og stor oppløsning i skjerm eller plotter. Dette har ført til at GIS-verktøy i dag framstår som selvstendige programpakker utviklet spesielt for lagring og analyse av stedfestet informasjon.

Kjernepunkter i GIS er stedfesting og forhold mellom stedfestede objekter og fenomener.

Systemene fikk ikke betegnelsen GIS før på 70-tallet, samtidig med at kommersiell programvare for GIS ble tatt i bruk. I denne perioden begynte flere land arbeidet med å overføre manuelle eiendomsregister til elektroniske registre. Et eksempel på dette er vårt nasjonale GAB-register. Det er et IT-basert register for alle grunneiendommer (G), adresser (A) og bygninger (B). G-delen forteller om eiendommen, eier, virksomhet, areal og koordinater mens A-delen forteller om eiendommens adresse og hvilken valgkrets, skolekrets og grunnkrets eiendommen hører til.

I det norske markedet ble GIS introdusert som ny teknologi i 1987. Den gang var det svært få institusjoner som hadde kompetanse, data og

en organisasjon som kunne ta teknologien i bruk. Den største utfordringen var at det omtrent ikke fantes digitale data som var brukbare. En stor jobb i 1990-årene var å digitalisere papirkartene og legge dem på harddisken som filer. Flybilder ble også lagret digitalt etter hvert. De første årene gikk derfor med til å samle inn data, men det var lite struktur i dataene. Perioden tidlig i 1990-årene var også preget av mange konkurrerende programvareløsninger og lite standarder.

# Hvorfor GIS?

Forfatter: Birgit Strømsholm

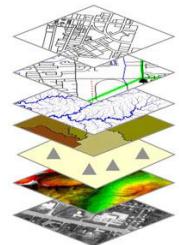
[Hvorfor GIS? \(24044\)](#)

Geografiske informasjonssystemer er i rask utvikling. Det anvendes både i humanistisk og samfunnsvitenskapelig forskning, næringsliv, offentlig forvaltning og samfunnsplanlegging.

Det kan være ulike grunner til at en organisasjon tar i bruk GIS. Den viktigste årsaken kan være å rasjonalisere.

Tilgangen til offentlige geografiske databaser f.eks. innen miljøvern eller veibygging kan medføre raskere og mer effektiv planlegging.

Tidligere måtte man først bruke papirkart for å finne de aktuelle områder, og så måtte man finne de rette registre i forskjellige arkiver. Det førte til masse uoversiktlig papirarbeid og var i tillegg tidkrevende. Ved å legge alt dette inn på data og kombinere det sparer man i første rekke masse papirarbeid, det blir mer oversiktlig, og det går ikke minst raskere.

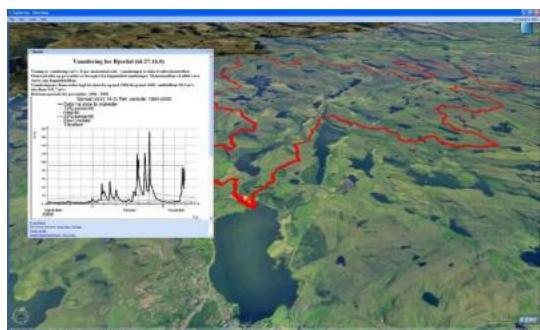


GIS kartlag.  
Opphavsmann:  
[Statens kartverk](#)

GIS anvendes av bedrifter som gjør markedsundersøkelser for sine produkter. Hvor finnes målgruppen, og hvilke tiltak må iverksettes for å nå den? Det er mulig å utnytte GIS for å få rede på om det vil lønne seg å starte opp en ny butikk, for eksempel innen elektrobransjen, i et område.

Et GIS er helt nødvendig for effektiv overvåkning og forvaltning av våre naturressurser. Viktige stikkord for dette er bevaring av biologisk mangfold, tilrettelegging for friluftsliv og turisme, og utøvelse av næring (jordbruk, skogbruk, bergverk, grustak, fiskeoppdrett, beite, oljeutvinning, osv.).

For at samfunnet vårt skal fungere, er vi avhengige av en effektiv infrastruktur (elektrisitet, telefon, vei, bane, vann og avløp) og god arealplanlegging. Et GIS gir mulighet for effektiv infrastrukturplanlegging og -forvaltning og arealplanlegging.



Bruk av GIS for beregning av nedbørsfelt.  
Opphavsmann: [Geodata](#)

Illustrasjonen for nedbørsfelt viser resultatene fra en geoprosesseringstjeneste som kjøres i programvaren ArcGIS Explorer. Tjenesten beregner nedbørsfeltet til et bestemt punkt på grunnlag av en 25 x 25 meters terrenngmodell for hele Norge.

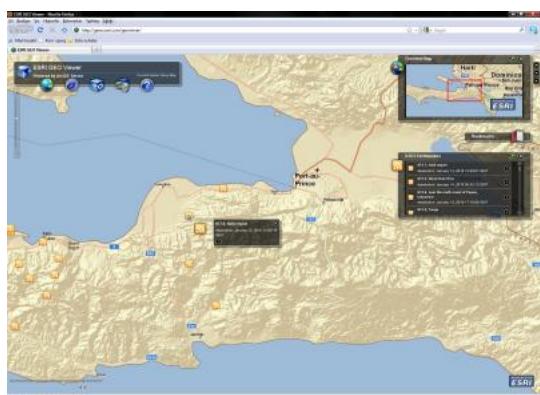


GIS spiller en viktig rolle ved redningsaksjoner som for eksempel ved brann. Hovedredningssentralen er av landets mest avanserte GIS-brukere med kontinuerlig oversikt over plasseringen til alle fartøyer i norsk farvann, alle redningsressurser (skip, fly, biler, snøscootere, mannskaper, redningshunder) og infrastruktur (kart, veinett, løpenett, osv.).

GIS som verktøy ved  
brann.

Opphavsmann: [ESRI](#)

Ved jordskjelvkatastrofen på Haiti i januar 2010 ble GIS applikasjoner tatt i bruk for å få et oversiktsbilde og oppdatert informasjon. I applikasjonen kan man se detaljerte kart over området og legge på tjenester fra ulike kilder.



Jordskjelv på Haiti.

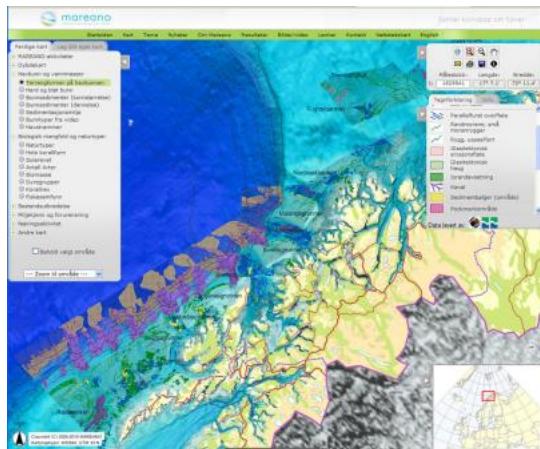
Opphavsmann: [Geodata AS](#)

Effektiv styring av drosjer, ambulanser, brannbiler, politibiler, lastebiler, skip, osv. med vekt på minimalisering av kostnader og høyest mulig kvalitet, er umulig uten et GIS.

Mulighetene for å analysere data og presentere data på nye spennende måter er store med GIS. En oppgave som har blitt løst gjennom anvendelse av GIS, er detaljert havbunnskartlegging som grunnlag for å finne gode lokaliteter for akvakulturanlegg. I forbindelse med automatisert overvåking av norskekysten med ferger i rute er det etablert en webbasert karttjeneste (wms-tjeneste) som er tilgjengelig for aktuelle brukere. Det pågår store kartleggingsprosjekter for marine kysthabitater der GIS og GIS-basert modellering inngår.

Prosjektet MAREANO kartlegger dybde, bunnforhold, naturtyper og forurensning i norske havområder. Resultatene gjøres tilgjengelig som kart, bilder og geografiske databaser. MAREANO ledes av Havforskningsinstituttet i samarbeid med Norges geologiske undersøkelse og Statens kartverk Sjø.

MAREANO har en egen kartinnsynsløsning.



Mareano kartløsning.

Opphavsmann: [Statens kartverk](#)

GIS kan brukes innen mange områder og kan hjelpe oss å finne svar på følgende spørsmål:

- \* Hvor er nærmeste kino?
- \* Er det noen treningssentre i området jeg befinner meg?
- \* Når kommer neste buss i retning Narvik hit?
- \* Hvilke områder i Andøy kommune er best egnet for boligbygging?
- \* Hvor bør en ny pizzarestaurant plasseres for å oppnå størst mulig omsetning?
- \* Hva er optimal plassering for en ny barneskole i kommunen?
- \* Hva er raskeste kjørevei mellom Ålesund og Trondheim?
- \* I hvilke vegetasjonstyper er det mest sannsynlig å treffe på elg i oktober?
- \* Hvor finner jeg en rimelig bolig som ligger i nærheten av barnehage, skole, butikk og friluftsområder?
- \* Hvor bør traseen til den nye fylkesveien gå, forutsatt at vi vil unngå å rive for mange hus, unngå å bruke dyrka mark, ønsker at veien skal ligge pent i terrenget, og ønsker å gjøre utbyggingen så billig som mulig?
- \* Hvilke hytter ligger under 100 meter fra Oslofjorden i Tønsberg kommune?
- \* Hvilke fartøyer er slikt plassert at de raskt kan komme en havarist til unnsetning?
- \* Hvordan organisere en mest mulig effektiv transportjeneste?

# GIS, begreper

Forfatter: Birgit Strømsholm

[GIS og enkelte definisjoner og begrepsavklaringer \(27986\)](#)

Et GIS-system har funksjoner for innlegging, bearbeiding, lagring, analyse og presentasjon av geografiske data. I et operasjonelt GIS inngår en eller flere databaser. Det som er så spesielt med moderne GIS, er at man kan benytte data fra mange ulike kilder, som f.eks. diverse ulike kartdata, digitale bildedata, videobilder, data fra dataassistert konstruksjon, osv.

## Geometrien i GIS

Geometrien i GIS kan i prinsippet representeres på to forskjellige måter:

- vektordata med punkter, linjer og flater, eller
- rasterdata med ensartede og systematisk organiserte flater (celler).

### Vektordata

Vektorrepresentasjon er godt egnet til å lage digitale orienteringskart. Her benyttes de geometriske objektene punkt, linjer og flater/areal for å representere de geografiske objektene som ønskes laget. Eksempelvis vil en stein representeres ved et punkt, en sti ved en linje og et hogstfelt ved en flate. Det knyttes egenskaper til de geografiske objektene. Egenskapene beskriver de geografiske objektene.

For de fleste formål vil et punkt lagres som et koordinatpar ( $x$  og  $y$ ) i et kart. Knyttet til dette koordinatparet vil det lagres egenskaper som beskriver objektet som finnes i punktet. Eksempel på kartobjekter som vanligvis lagres som punkt: liten kolle, liten grop, stein, brønn, lite tårn.

En linje lages gjerne som en punktsekvens. Hvert punkt i sekvensen skal ligge på den linjen som skal representeres, men mellom punktene må det gjøres antagelser om hvor linjen går. Det er vanlig å trekke rette linjer mellom punktene i sekvensen når linjen tegnes ut. Dersom det er for stor avstand mellom punktene på linjen (lav samplingsrate) i forhold til målestokken på det ferdige kartet, vil linjen se hakkete ut når den tegnes ut.

Det er også mulig å tegne ut en glatt kurve som går gjennom punktene. Det er mange måter å gjøre dette på. Linjer kan lagres som parametriske funksjoner. Denne metoden vil kunne gi glatte kurver uten knekkpunkter. Parametriske funksjoner kan være nyttige når for eksempel kurver på veier skal representeres. Det knyttes egenskaper til linjer som sier noe om hva linjen representerer. Eksempel på kartobjekter som vanligvis lagres som linjer: høydekurve, bekk/grøft, sti, gjerde, kraftlinje.

En flate (et areal) lagres gjerne med et sett med grenselinjer. I tillegg kan det lagres et representasjonspunkt som skal ligge inne på flaten. Flater må også ha tilknyttet egenskaper som sier noe om hva slags flate det er. Eksempel på kartobjekter som vanligvis lagres som flater: bruddfelt, åpent sandområde, vann, myr, skog, dyrket innmark, bygning, parkeringsplass. Flateelementer er i databasen representert med polygoner – en lukket, plan figur omsluttet av rette linjer. I praksis benyttes ofte betegnelsen polygon i stedet for flate.

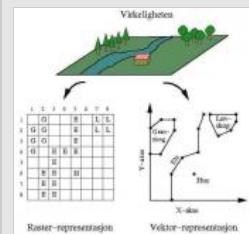
### Rasterdata

Ved rasterdata kan man tenke seg et rutenett som er lagt over et geografisk område.

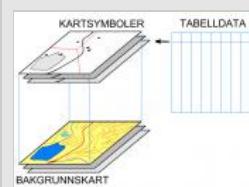
Informasjonen lagres i ett eller flere lag med rutenett. Hvert lag er bygd opp som en matrise av like store celler. Hver celle inneholder en verdi som representerer egenskaper ved det området som cellen dekker. Denne verdien kan for eksempel være fargen som skal benyttes ved uttegning av kartet. Rasterrepresentasjon er spesielt godt egnet til å presentere kontinuerlig varierende fenomen, slik som terrenghøyde, nedbørsmengde, jordtype.



Rasterkart, 1:250 000  
berggrunnskart over deler  
av Andøy. Rasterkartet er  
et digitalt bilde av  
vektordataene.



Virkeligheten presentert i et  
rasterkart og et vektorkart.



Illustrasjonen viser  
tabelldata som oversettes  
til kartsymboler og vises  
oppå eksisterende kartdata.



Logisk kobling mellom  
tabelldata og kart.

Et problem med rasterrepresentasjon er at den ikke er velegnet til å representer linjer. Hvert punkt i rutenettet beskriver som nevnt et geografisk fenomen (vegetasjonstyper, arealbruk, høydedata osv.), og det har i tillegg en kode som kan peke til andre tabeller slik at flere temaer kan knyttes sammen. Siden hvert lite punkt inneholder diverse informasjon, blir det etter hvert store datamengder å håndtere. Et satellittbilde eller et skannet papirkart er kilder til rasterdata.

Vektordata trenger mindre lagringsplass enn rasterdata og er i tillegg lettere å vedlikeholde og redigere, mens arealanalyser går forttere med rasterdata. Vektormodellen er enkel å koble mot eksterne databaser og blir derfor brukt mye innen offentlig forvaltning og andre instanser som produserer kart i forbindelse med beslutningsprosessen.

Geografiske data er stedfestet informasjon (geodata) som kan knyttes til et geografisk avgrenset område, for eksempel grunnkrets, kommune og fylke. Geografiske data kan også knyttes til punkter som er angitt ved koordinater. Disse er ofte basert på rettvinklede koordinatsystem (f.eks. x = nord, y = vest, z = høyde) eller lengde- og breddegrader. Man kan også oppleve at andre referanser som diverse områdeinndelinger, adressesystemer benyttes.

Dataene i et GIS består av to hoveddeler:

- geometridelen (kartdata) som beskriver objektets form og posisjon;
- egenskaper (= attributter) som beskriver hva objektet representerer i den virkelige verden. Egenskapsdata er i form av tekst eller kode og lagres i lesbare tabeller

Objektet kan stedfestes og beskrive virkeligheten. Objektet kan være konkrete fysiske fenomener som blant annet ulike hendelser og aktiviteter (f.eks. bilulykker, oljeutsipp, båter, vannlekkasjer, fabrikker, skoler, veier).

I GIS har hvert enkelt objekt en selvstendig identifikasjon, en id-kode (objektsidentifikator), slik at de enkelte objektene kan skilles fra hverandre. Nummer eller navn (bygningsnummer og stedsnavn) benyttes vanligvis som objektsidentifikator. I praksis skiller en ofte mellom objektsidentifikasjon og tematiske egenskaper. Alt er imidlertid egenskaper, men identifikasjon betraktes som mer grunnleggende enn de andre egenskapene.

Egenskapsdata (attributtdata) beskriver objektet og gir opplysninger om objektets egenskaper, for eksempel navn (skolens navn), byggeår, byggemateriale, størrelse. Egenskapsdata kan også være demografiske data (antall bosatte, aldersfordeling), omsetning til en butikk, akseltrykkbegrensning og fartsgrense på veier.

Egenskapsdata tilknyttet geografiske objekter, er lagret på noenlunde samme måte som koordinater. Egenskapsdata lagres som ulike sett av tall og/eller alfanumeriske verdier. Egenskapsdata for en skole nevnt over, lagres i databasen i et definert tabellformat. En slik databasefil kalles en egenskapsdatatabell.

Egenskapsopplysninger kan også være informasjon om relasjoner til andre objekter. Aktuelle relasjoner kan være hva objektet består av, for eksempel at et land består av fylker, at et fylke består av kommuner. Andre relasjoner kan være hva objektene tilhører, for eksempel hvilke adresser som er knyttet til en vei, hvilke stoppekraner som tilhører de forskjellige vannledningene.

Datamaskinen kan ikke se disse relasjonene direkte og må derfor ha opplysninger om hver relasjon som skal behandles. Det kan være lengden av skoleveien for en elev. Da er det nødvendig å vite hvilke veier henger sammen og krysser hverandre.

Tabelldataene kan oversettes til kartsymboler og vises sammen med annet kartinnhold, samtidig som en kan gå motsatt vei ved å peke på kartet på dataskjermen og få fram tabellopplysnings om det aktuelle objektet. Av ulike grunner er geometri og attributter ofte skilt både logisk og fysisk i datamaskinen. Med GIS er det også mulig å gjøre koblinger, og se sammenhenger mellom ulike hendelser og objekter på en ny måte, slik at ny informasjon blir tilgjengelig. Koblingen mellom geometri og attributter er basert på at det finnes identiske opplysninger (koblingsnøkler) i geometri- og attributtdataene.

# Oppbygging av GIS

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Oppbygning av et GIS \(49027\)](#)

I GIS er virkeligheten beskrevet ved hjelp av digitale kartdata (geometrien) og tabelldata som inneholder opplysninger om egenskapene til objektene i kartdataene. Tabelldataene kan oversettes til kartsymboler og vises sammen med annet kartinnhold.

For å bygge opp et GIS må man gå gjennom flere faser. Alle fasene er nødvendige for å komme fram til et resultat. Fasene vil omfatte følgende:

- datafangst, innsamling av data som er grunnlaget i et GIS
- tilrettelegging for database både for grafiske data og egenskapsdata
- editering, transformering og oppdatering av dataene
- analyse
- presentasjon av analyseresultater

Geografisk informasjon må tilpasses den digitale teknologien for lagring og bearbeiding i en datamaskin. Dette er en av koblingene mellom informasjonsteknologien og geografiens.

GIS vil som regel ha en innebygd database, men det er også vanlig å tilby grensesnitt til generelle databaseprogrammer. Et slikt grensesnitt kan ha sitt utgangspunkt i et standard spørrespråk (SQL = standard query language).

Egenskapsdata kan være integrert i den grafiske informasjonen eller opptre som en separat database med referanse til terrenginformasjonen. Det er mulig å søke i systemet ved hjelp av geografiske koordinater eller bestemte egenskaper. Analysene vil kunne bestå av enkle overlagringsoperasjoner (overlay-) eller avanserte simuleringer avhengig av tilgjengelig programvare. En ny trend innenfor GIS er å legge inn elementer av kunstig intelligens i programvaren for å oppnå raskere søk i store og kompliserte datastrukturer.

GIS kan brukes som et verktøy for automatisk oppdatering og produksjon av kart, men den største utfordringen ligger i hvordan koblingen mellom kartinformasjon og egenskapsdata (tabelldata) utnyttes til analyser og generering av ny informasjon.

# Data i GIS

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Data som brukes i et GIS \(49028\)](#)

Geografiske data består av to hovedkomponenter: geometri og egenskaper. Geometrien beskriver punkter, linjer og flater. Til disse geometriske objektene er det tilknyttet egenskaper som kan være av ulike typer.

Et eksempel på egenskapsdata er størrelsen på en eiendom uttrykt i antall m<sup>2</sup>.

Kartdataene forblir kun en tegning hvis det ikke finnes kobling til egenskapsdata, og egenskapsdata forblir tabeller med tekst uten kobling til kartdata.

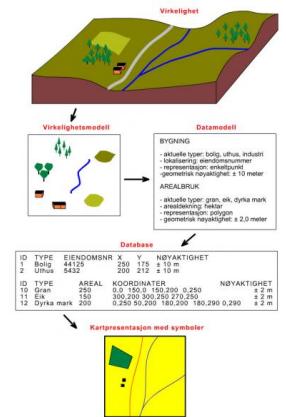
I analoge kart er kartdata og egenskapsdata uløselig knyttet til hverandre. GIS holder disse komponentene fra hverandre, men på en måte som gjør det mulig å koble dem sammen når det er behov for det.

Illustrasjonen viser veien fra virkeligheten over en virkelighetstabell til en database og kartpresentasjon.

Virkeligheten blir kodet i kartsymboler eller geometriske objekter (punkter, linjer, flater). Datamodellen beskriver egenskapene til kartobjektene og deres innbyrdes relasjoner. Datamodellen blir implementert i en database som igjen danner grunnlaget for kartpresentasjonen.

For å bringe en kompleks virkelighet inn i GIS må det lages forenklede modeller av virkeligheten. En slik forenkling kalles en virkelighetsmodell. En virkelig forekomst av typen hus blir tegnet som et firkantsymbol på kartet og lagret som et firkantsymbol i databasen.

For å representere de geometriske objektene digitalt er det blitt utviklet to modeller, vektormodellen og rastermodellen.



GIS-modeller.  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Vektormodell

Forfatter: Birgit Strømsholm

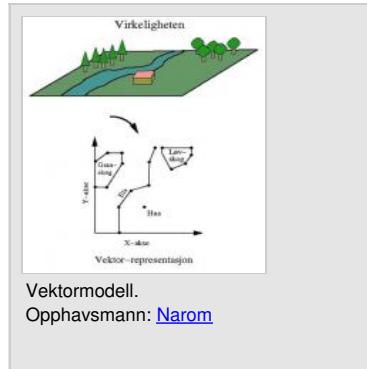
[Vektormodell \(49034\)](#)

Matematisk sett er en vektor "et rett linjestykke med en bestemt retning". Det rette linjestykket mellom to punkter i et koordinatsystem er en vektor. Det er dette som danner grunnlaget for begrepet vektordata. I vektormodellen beskrives objektene med punkt, linje eller flate.

I vektormodellen er det geometriske innholdet organisert som punkter i et rettvinklet koordinatsystem. Alle objekter beskrives ut fra avstander og retning mellom punktene. Vektormodellen velger ut noen få punkter langs en linje og trekker streker fra punkt til punkt (interpolatorer) mellom disse fastpunktene.

Det vil derfor være tilstrekkelig å lagre et begrenset antall punkter/koordinater i databasen.

Dersom en polygon (polygon = flerkant, dvs. en flate) skal defineres ved hjelp av vektormodellen, beskrives disse ved sitt omriss. Egenskapene knyttes til punktene i seg selv eller til vektorene (linjene) som bygges mellom punktene.



Det benyttes to modeller for lagring av vektordata. Den enkleste modellen kalles spaghetti-modellen, mens den mer avanserte kalles topologimodellen. En "spaghetti-datamodell" referer til situasjonen når koordinatstrengene er lagret uten form for informasjon om relasjonen mellom de geometriske objektene. Dette fører til at f.eks. en felles grense mellom to polygoner er lagret to ganger, og romlige relasjoner er vanskelige å beskrive.

I spaghetti-modellen er det ingen spesielle punkter som angir hvor linjene begynner og slutter, eller hvor de krysser hverandre. Det er ingen opplysninger som angir hvilke linjer som logisk hører sammen. Linjene krysser hverandre som i en haug med spaghetti. For å kunne gjøre avanserte analyser på et datasett, må de geometriske elementene inneholde informasjon om relasjoner mellom objektene. Hvis det ønskes å finne avstand mellom to steder, er det nødvendig med informasjon om hvilke veier som henger sammen og krysser hverandre. Spaghetti-data mangler slike relasjoner. Spaghetti-data tar unødvendig mye lagringsplass fordi alle polygoner blir lagret som en selvstendig sekvens av koordinater med dobbeltlagring av alle linjer som er felles mellom polygoner.

I GIS-systemet er det mulig å beskrive objektrelasjoner ved en teknikk som kalles topologi. Topologi beskriver hvordan objekter ligger i forhold til andre objekter, og hvordan de er knyttet sammen. Ved å opprette og lagre topologi oppnås mange fordeler. Data lagres på en mer effektiv måte når en bruker topologi. Topologi gjør det lettere å utføre geografiske analyser, for eksempel slå sammen polygoner (flater) som ligger intil hverandre, og som dessuten har like egenskaper for aktuelle tema. Topologien gjør det også lettere å utføre konfliktanalyser, konsekvensanalyser eller arealanalyser.

I denne teknikken benyttes begrepene linjer (lenker) og knutepunkt. Linjer som henger sammen, og som danner et lukket område, definerer en flate (polygon). Hver polygon består av en liste med linjer, og nabopolygoner deler linjer mellom seg. Med en topologisk datastruktur er det derfor tilstrekkelig at koordinatene for hver linje lagres

bare ett sted, og ikke sammen med hver polygon den tar del i eller er en del av. På denne måten blir datamengden redusert, og man unngår flere linjer over hverandre. Linjene henger sammen i knutepunkter. Hver linje har to knutepunkter, et fra-knutepunkt og et til-knutepunkt. Hver linje og hvert knutepunkt får sin identitet, vanligvis et nummer, og det kan knyttes egenskapsdata til hvert nummer.

Relasjonene kan også beskrive forbindelsene eller sammenhengen internt i et objekt, for eksempel angi hvordan hvert objekt logisk er bygd opp med knutepunkter og linjer.

Den største fordelen med topologi og egenskapsdata, er at det gir mulighet for å identifisere, vedlikeholde og bearbeide topologien mellom objekter som representerer ulike geografiske fenomener. Det gir mulighet for å lage ny informasjon ved at ulike datasett blir slått sammen til et nytt datasett der både objektene og egenskapene fra inngangsdatasettene er ivaretatt, og der ny topologi blir bygd.

Tar en utgangspunkt i et datasett som inneholder eiendommer, og et annet datasett som inneholder jordtype, er det mulig med analyseverktøyene i GIS-systemet å finne hvilke jordtyper det er på en, mange eller alle eiendommene, og areal og beliggenhet for hver jordtype på hver eiendom. Ved arealanalyser, konfliktanalyser og konsekvensanalyser bruker man det som i et GIS kalles topologisk overlagring (overlay).

Relasjonene er ofte svært viktige opplysninger. Skal en for eksempel øke vanntrykket i et område, må en kjenne sammenhengen i ledningsnettet for å vite hvilke ventiler som skal stenges. Vektormodellen har til i dag hatt en dominerende plass i ulike kartsystemer i Norge.

## Rastermodell

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Rastermodell \(49912\)](#)

I rastermodellen brukes en rasterrute (piksel) som den minste enhet. Det er rutestørrelsen som bestemmer kartets nøyaktighet (oppløsning). Rastermodellen representerer virkelighet med et kontinuerlig sett, en matrise, med enhetlig store celler ordnet i kolonner og rader. Matrisen har et koordinatfestet origo som vanligvis ligger øverst til venstre. Kjenner en antall rader og kolonner samt cellenes størrelse, kan hvert punkt innenfor et rasterbasert informasjonslag entydig refereres.

I rasterbaserte data er egenskapene koblet til hver eneste celle, i utgangspunkt med en tallverdi (heltall for kvalitative data). Kvantitative, kontinuerlige data (f.eks. spektral informasjon fra satellittregistrering) kan representeres ved å koble reelle tall til hver celle. Det kan bare knyttes en egenskapsverdi til hver celle. Et objekt med flere egenskaper må derfor angis med flere rasterlag eller temalag, ett lag for hver egenskapstype.

På denne måten vil det, i rastermodellen som i vektormodellen, være lag for topografi, vannsystem, arealbruk, markslag. Men det vil normalt være langt flere lag i rastermodellen siden det må være ett lag for hver egenskap. I vektor-GIS vil hver enkelt egenskap, for eksempel arealet for en barskog, være knyttet til objektet barskog. I raster-GIS må det etableres et barskoglag hvor hver celle tilhørende barskogen gis koden for den aktuelle barskogen. Det må deretter etableres et nytt rasterlag hvor de samme barskogcellene gis den aktuelle arealverdien. Rasterdatabaser for GIS kan dermed inneholde flere hundre temalag.

Detaljeringsgraden som kan representeres med rastermodellen, er avhengig av oppløsningen, og med høy oppløsing øker datamengden betraktelig. Det finnes derfor lagringsmetoder som komprimerer rasterbaserte data. Rasterdata kan foreliggje fra ulike kilder, som manuelt registrerte data, satellittbilder og høydedata på digital form. Ved sammenstilling er det viktig at celler fra forskjellige kilder og datalag korresponderer med hverandre, det vil si at celler med samme linje- og kolonnenummer dekker samme område i terrenget. Visse beregninger for å tilpasse størrelse og form vil ofte være nødvendig.

Celle - nr	Celleverdi
1,1	0
1,2	0
1,3	0
1,4	0
1,5	1
1,6	1
1,7	-
1,8	3
2,1	0
2,2	0
2,3	0
2,4	0
2,5	1
2,6	1
2,7	1
2,8	1
3,1	0
3,2	0
3,3	2
3,4	2
3,5	1
3,6	1
3,7	1
3,8	1
4,1	0
4,2	0
4,3	2
4,4	2
4,5	1
4,6	1
4,7	3
4,8	3
5,1	0
5,2	0
5,3	4
5,4	4
5,5	2
5,6	2
5,7	3
5,8	3
6,1	0
6,2	0
6,3	4
6,4	4
6,5	3
6,6	3
6,7	3
6,8	3
7,1	0
7,2	0
7,3	4
7,4	4
7,5	3
7,6	3
7,7	3
7,8	3
8,1	0
8,2	0
8,3	4
8,4	4
8,5	3
8,6	3
8,7	3
8,8	3

Celleverdi	Tema
0	Barskog
1	Dyktak mark
2	Vann
3	Løvskog
4	Urbant

Lagring av rasterbaserte data med egenskapene koblet til hver eneste celle.  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Fordeler og ulemper med vektor- og rastermodellene..

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Fordeler og ulemper med vektor- og rastermodellene \(49914\)](#)

Fordelen på vektorsiden gjør at vektormodellen er mest brukt innenfor kartbransjen, offentlig forvaltning og andre instanser som produserer kart i forbindelse med beslutningsprosesser. Fordelene på rastersiden gjør modellen velegnet i kvantitativ geofaglig forskning.

## Fordeler og ulemper med begge modellene

### Fordeler med vektormodellen

- dynamisk datastruktur, god representasjon av geometriske objekter med varierende størrelse
- mange ting i samfunnet er relatert til geometriske enheter som punkt, linjer og flater
- høy geometrisk nøyaktighet
- best egnet for linjepresentasjon
- egner seg hvor det finnes mange attributdata
- nøyaktig grafikk
- henting, oppgradering og generalisering av enkelte kartobjekter kan gjøres interaktivt
- godt egnet for nettverksanalyse

### Ulemper med vektormodellen

- tidkrevende og kostbar datainnsamling
- kompleks og dermed komplisert datastruktur
- romlige analyser er mulig, men er komplisert og regnekrevende
- romlige analyser innenfor en polygon er ikke mulig
- vanskelig å generalisere
- teknologien er dyr

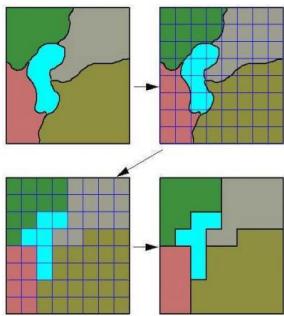
### Fordeler med rastermodellen

- enkel datastruktur
- egner seg til data som er opprinnelig innsamlet i rasterform (f.eks. satellittdata)
- enkelt å kombinere kart med data innhentet fra satellitter
- rask datainnsamling
- romlige analyser er enkle og effektive
- godt egnet for flatepresentasjon
- lett å beregne arealer
- effektiv kobling av data som dekker samme geografiske område
- generalisering er enkel
- mulig å tegne et kart når cellene har fått en verdi
- teknologien er billig og velutviklet

### Ulemper med rastermodellen

- få fenomener i samfunnet er relatert til et slikt rutemønster
- problemer med datatilgang
- rigid datastruktur og dermed ofte store datamengder
- valg av grovere oppløsing for å redusere datamengdene fører til at informasjon går tapt
- grov og unøyaktig grafikk
- vanskelig å beregne omkrets
- uegnet til nettverksanalyser

## Konvertering mellom raster- og vektordata



Selv om dagens analyseverktøy vil håndtere både raster- og vektordata, vil det i noen tilfeller være aktuelt å konvertere mellom disse formatene. Satellittbilder kan benyttes som bakgrunn for vektordata for et område.

Amendor  
Opphavsmann: [Narom](#)  
rasterbilde.

Noen analyser kan kun utføres på rasterdata, mens andre er det mer effektivt å gjøre på vektordata. Vektorisering er f.eks. aktuelt i forbindelse med skanning av kart og vektorisering av grenser basert på en klassifisering av et

Rastrering kan f.eks. være aktuelt dersom informasjon fra et eksisterende vektorkart skal integreres med satellittdata. En slik konvertering mellom systemene vil imidlertid bestandig medføre en svekking av datakvalitet.

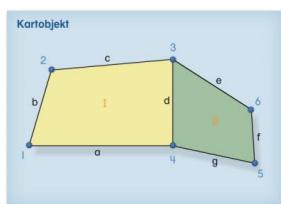
Illustrasjonen viser eksempel på et vektordatasett som konverteres til raster med en gitt oppløsning. Dette gir en svekking av datakvaliteten på grunn av den grove oppløsningen.

# GIS og databaser

Forfatter: Birgit Strømsholm  
[GIS og databaser \(50581\)](#)

GIS-data hentes fra tabeller i store databaser og regneark og omgjør disse til lettleselige kart. Det finnes mange metoder og teknikker for å lagre og organisere data i digital form. Elektronisk lagring krever spesiell organisering og struktur på dataene dersom de skal kunne hentes fram og kobles raskt. I forbindelse med GIS gjelder dette både de geometriske objektene og egenskapene som er knyttet til disse.

Det er utviklet en rekke generelle systemer for elektronisk lagring. Slike systemer kalles databaser. GIS kjennetegnes som regel ved en mer komplisert datastruktur enn generelle databaser.



Fordelen med lagring i databaser er blant annet at dataene er lagret et sted, de er strukturerete, standardiserte og kontrollerte. Data kan raskt hentes frem, de kan kobles og sammenstilles, og de er tilgjengelige for mange.

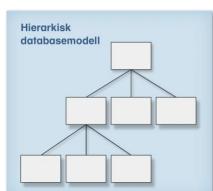
Ulempene, i forhold til manuell lagring, er blant annet at databaselagring krever kompetanse, er relativt kostbart, krever kvalitetssikring og spesielle sikkerhetsrutiner.

Kartobjekt  
Opphavsmann: [Narom](#)

Illustrasjonen viser identifiserte kartobjekter som lagres i ulike databasesystemer.

Når man organiserer data i GIS, er det vanlig å skille mellom tre databasestrukturer: hierarkiske systemer, nettverkssystemer og relasjonssystemer.

## Hierarkisk databasemodell



I denne modellen er dataene lagret i forskjellige nivåer med forbindelse mellom nivåene, men ikke mellom data på samme nivå. Dataene har en-til-mange-forhold til hverandre.

Fordeler ved modellen: enkle å utvide og oppdatere (enkel programmering), vanligvis raske søk i enkel struktur.

Hierarkisk  
databasemodell  
Opphavsmann: [Narom](#)

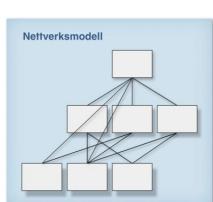
Ulempor ved modellen: store indeksfiler som ofte må vedlikeholdes, dobbeltlagring, databasedesign krever høy kompetanse, begrensede søkermuligheter.

Illustrasjonen viser skisse av hierarkisk databasemodell.

Hierarkisk databasemodell brukes i en del GIS til lagring av de digitale kartdataene.

## Nettverksmodellen

Hensikten med nettverksmodellen er å forbedre fleksibiliteten og redusere dobbeltlagring av data, slik som i den hierarkiske modellen. Dataene har et mange-til-mange-forhold til hverandre. I nettverksmodellen er det forbindelse mellom flere elementer både i nivået over og nivået under, samt til elementer som har en nivåforskjell større enn en. Punkt og linjer blir lagret bare en gang.

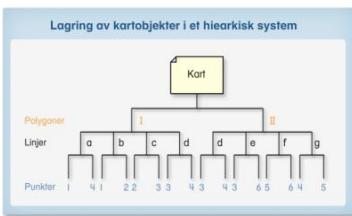


Når en søker, slipper en å gå gjennom alle nivå, men kan ta snarveier. Men mengden av pekedata er større enn i den hierarkiske modellen.

Fordeler ved modellen: reduserer dobbeltlagring, lettare å få knyttet sammen data som rent fysisk ligger lagret på forskjellige steder på disken, bedre søkermuligheter.

Skisse av nettverksmodell  
Opphavsmann: [Narom](#)

Ulempor ved modellen: komplisert å vedlikeholde, vanskelig programmering, mer indeksdata enn i hierarkimodellen, ikke så rask respons som i hierarkisk modell.



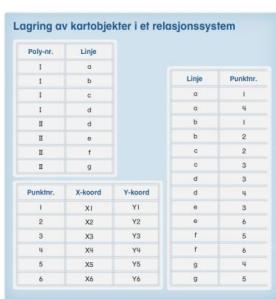
Lagring av kartobjekter i et hierarkisk system  
Opphavsmann: [Amendor](#)

Nettverksmodellen er bedre egnet for lagring av geografiske data enn den hierarkiske modellen, men den har likevel ikke fått spesielt stor utbredelse innen GIS.

Illustrasjonen viser lagring av kartobjekter i et hierarkisk system (Amendor).

### Relasjonsmodellen

En relasjonsmodell består av tabeller (tabelldatabase). I relasjonsmodellen er det mulig å relatere alle objekt og egenskaper til hverandre. Svakheten er at tallet på peketabeller blir svært stort dersom det er mange objekt med kompliserte relasjoner.



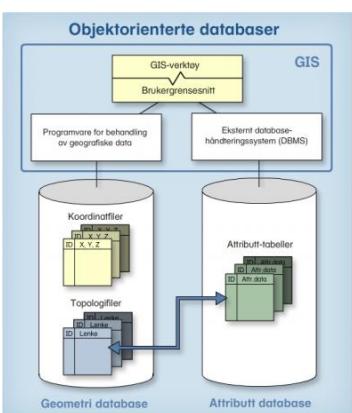
Relasjonsmodell  
Opphavsmann: [Narom](#)

All kommunikasjon mellom tabellene skjer via egne, interne peketabeller. Dette gjør at relasjonsdatabasene lett blir store i volum og noe seine i bruk. Mangelen på egne pekere i hver basistabell gjør at det må gjennomsøkes sekvensielt for å lete frem til riktig post eller felt. Dette gjør at relasjonsdatabaser ikke er så raske som den hierarkiske modellen og nettverksmodellen.

Fordeler ved modellen: enkel og fleksibel oppbygning, store muligheter for manipulasjon av data med standardisert definisjon og søk (SQL, Structured Query Language), takler komplekse relasjoner, lite dobbeltlagring.

Ulemper ved modellen: lang søkertid, kan bli store volum, lavere ytelse (sen respons).  
Illustrasjonen viser lagring av kartobjektene i et relasjonssystem (Amendor).

Relasjonsmodellen er svært populær innen GIS, og da spesielt til attributdata.



Skisse av objektorienterte databaser  
Opphavsmann: [Amendor](#)

Tradisjonelt har GIS-produkter implementert sine egne databaseløsninger. Dette skyldes nok at de tilgjengelige databaseprodukter ikke har vært egnet for geodata eller andre komplekse datatyper. Men utviklingen går raskt når det gjelder teknologi for håndtering av geografiske data i databasehåndteringssystemer.

I de senere år har objektorienterte databaser, og objekt-relasjonsdatabaser endret dette bildet. Objekt-relasjonsdatabaser er en utvidelse til relasjonsdatabaser, først og fremst med støtte for komplekse objekter. I en objektrelasjonsdatabase er den geometriske informasjonen og egenskapene

lagret sammen i objekter. Det vil si at relasjonene (tabellene) kan inneholde egendefinerte komplekse objekter, og at det kan utføres operasjoner på disse.

Programutviklerne kan utvide databasen med nye datatyper tilpasset applikasjonen (f.eks. GIS) og metoder på disse. Viktig for GIS er også nye aksessmetoder (indekseringssmetoder) som støtter romlige indekser.

Kommersielle systemer i dag er såkalte hybride systemer, hvor geometrien og egenskapene er lagret hver for seg med pekere innimellom. Her blir geometrien lagret i en egen database (ofte en nettverksdatabase), mens egenskapene blir lagret i en relasjonsdatabase. Brukeren opererer i begge systemer innenfor det samme brukergrensesnittet.

Det er viktig at databasen som velges, kan tilby effektiv og kontrollert adgang til geodata, selv med mange samtidige brukere og en stor samlet datamengde. Raske søk basert på elementer som er indeksert i rommet, krever ofte elementer av alle systemer som er nevnt over. Databasene i GIS kan derfor ofte kalles hybride DBMS ( DataBase Management Systems).

Den generelle utviklingen av databaser ser imidlertid ut til å skje med basis i relasjonsmodellen eller varianter av denne der elementer av nettverksmodellen og hierarkiske modeller inngår. Det finnes i dag et stort antall relasjonsorienterte produkter på markedet fra PC til

stormaskin. Flere hierarkiske- og nettverksorienterte baser har dessuten kommet med påbygninger som bygger på relasjonskonseptet. I GIS er relasjonskonseptet mest interessant i forbindelse med tabelldata for egenskapene.

# Valg av geodatabaser

Forfatter: Birgit Strømsholm

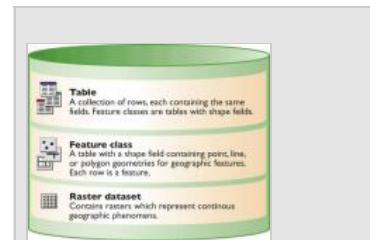
[Valg av geodatabaser \(61739\)](#)

I forbindelse med et GIS-analyseprosjekt er det nødvendig å skape en database som inneholder de geografiske data som er nødvendig for prosjektet. Dette arbeidet kan omfatte digitalisering av kart, hente og oversette elektroniske data fra ulike kilder og format, kontrollere at dataene har tilfredstillende kvalitet for oppgaven, kontrollere at de har samme koordinatsystem og overlager korrekt.

Personlige arbeidskataloger for filbaserte data og personlige geodatabaser kan brukes for å ordne prosjekt-GIS-geodatabaser. Måten som dataene struktureres på, er avhengig av hvor mange personer som skal jobbe med de samme dataene samtidig. Det kan være en mindre gruppe på ett kontor eller flere hundre personer som arbeider på ulike avdelinger, med GIS på ulike måter for å utføre sine daglige oppgaver. En mindre gruppe kan anvende et GIS-program for å strukturere dataene. Et organisasjons-GIS er ofte en del av organisasjonens nettverksstruktur.

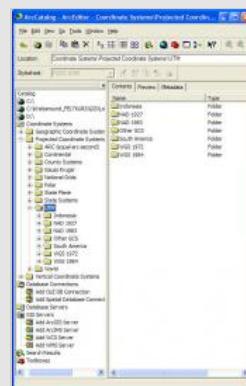
For å tilrettelegge for at mange brukere har samtidig tilgang til GIS-dataene, så lagres organisasjons-GIS-dataene i en såkalt RDBMS (Relational Database Management Systems), f.eks. Oracle, Informix Dynamic Server og Microsoft SQL Server, som er tilpasset for geografiske data ved hjelp av ESRI's ArcSDE-programvare.

Med ArcSDE (SDE står for Spatial Database Engine) kan GIS-data vises og redigeres av flere personer samtidig. Og for å dra maksimalt nytte av mulighetene med et nettverksbasert system, så fordeles mange nøkkelapplikasjoner, f.eks. ArcCatalog, ArcMap og ArcToolbox, til datamaskiner omkring i organisasjonen.



Datasett i en geodatabase

Opphavsmann: [ESRI](#)



Lagring av geografiske data og databaser i ArcCatalog

Opphavsmann: [ESRI](#)

Parcels feature class					
Shape	ID	PIN	Area	Addr	Code
	1	100-000-001	8.000	240 Cherry St., UNIT 101	101
	2	100-000-002	8.000	240 Cherry St., UNIT 102	102
	3	100-000-003	18.000	240 Cherry St., UNIT 103	103
	4	100-000-004	8.000	240 Cherry St., UNIT 104	104
	5	100-000-005	8.000	240 Cherry St., UNIT 105	105
	6	100-000-006	8.000	240 Cherry St., UNIT 106	106
	7	100-000-007	8.000	240 Cherry St., UNIT 107	107
	8	100-000-008	8.000	240 Cherry St., UNIT 108	108
	9	100-000-009	8.000	240 Cherry St., UNIT 109	109
	10	100-000-010	8.000	240 Cherry St., UNIT 110	110

Geodata i en

relasjonsdatabase

Opphavsmann: [ESRI](#)

## Tre typer av geodatabaser

GIS programvaren ArcGIS støtter tre typer geodatabaser: fil (\*.gdb), personlig (\*.mdb) og ArcSDE (\*.sde).

For en person eller små arbeidsgruppeprosjekter, er fil-geodatabase det beste valget. Den har ingen begrensninger på størrelsen. Den personlige geodatabasen er fortsatt i bruk, men dette er en eldre filtype og har begrensninger på 2 GB på filstørrelsen.

ArcSDE-geodatabasen er for store arbeidsgrupper. Den er ikke tilgjengelig med en standard ArcGIS-lisens. Denne type geodatabase utvikles og administreres av en GIS-administrator som bl.a. ivaretar oppbygging og vedlikehold av geodatabase-topologien (bygge og sette egenskaper for topologi, definere passende topologiske regler, fikse topologiske feil, redigere topologiske data) og lager geodatabaseskjema (lage tabeller, geoobjektklasser og geoobjektdatasett). SDE har noen store fordeler. Filer kan bli låst slik at de ikke kan endres av forskjellige brukere og sikrer dermed å opprettholde dataintegritet. SDE kan lagre og presentere rasterdata, som flyfoto og satellittbilder, svært effektivt. En annen viktig del er at flere brukere kan arbeide, og til og med redigere data samtidig. Dette er ikke mulig i en filbasert og personlig geodatabase.

# Hva er ArcGIS?

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Hva er ArcGIS Desktop? \(61867\)](#)

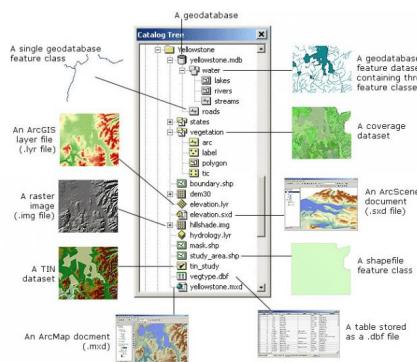
I dag brukes GIS av et stort antall ulike organisasjoner og enda flere enkeltbrukere for å organisere og analysere mange typer geografiske data.

GIS-programvaren ArcGIS fra ESRI er en programvarefamilie som dekker GIS-behovene i hele organisasjonen. ArcGIS er designet som et skalerbart system som kan passe inn i de fleste organisasjoner, fra én enkelt PC til et globalt distribuert nettverk av mennesker. ArcGIS inneholder programvare for desktop (PC), server, web og mobilt. Det er et verktøy for GIS-eksperter, saksbehandlere, beslutningstagere, feltarbeidere samt studenter og skoleelever.

ArcGIS-produktene baserer seg i størst mulig grad på åpne standarder (IT og GIS), samt tilbyr en rekke grensesnitt for utviklere. ArcGIS ver. 9.3 inneholder desktop-applikasjonene ArcCatalog og ArcMap.

## ArcCatalog

ArcCatalog er en applikasjon for å organisere og administrere geografiske data og databaser samt for innsamling og visning av metadata. Dette omfatter GIS-informasjon som datasett, modeller og metadata. Med ArcCatalog er det mulig å søke etter, forhåndsvise, dokumentere og ordne geografiske data og utvikle avanserte geodatabaser for datalagring.



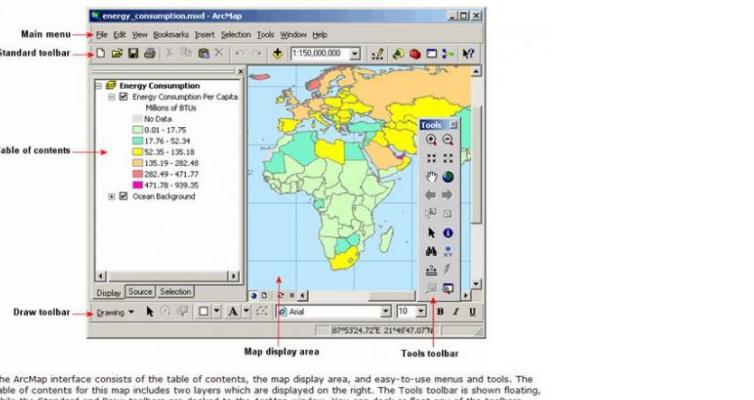
ArcCatalog med mappestruktur og eksempel på innhold

Opphavsmann: [ESRI](#)

ArcCatalog brukes for å ordne mapper og filbaserte data ved utvikling av prosjektdatabaser på PC-en. Det er mulig å utvikle personlige geodatabaser på PC-en og bruke verktøy i ArcCatalog for å tilrettelegge eller importere geoobjektklasser og tabeller. Det er også mulig å vise og oppdatere metadata.

## ArcMap

Et kart er kanskje det vanligste verktøyet for å forstå geografisk informasjon. Uansett om det er analyser eller redigering, produksjon av veggkart eller illustrerende rapporter, så er arbeid med GIS et arbeid med kart. Med ArcMap er det mulig å arbeide med alle typer geografiske data i kart, uansett format og plassering på underliggende data. Med ArcMap er det mulig å utvikle et kart fra forhåndsdefinerte lager, eller legge til data f.eks. fra temalag, shapefiler, geodatabaser, satellittbilder og tabeller med koordinater eller adresser.



Eksempel på visning i ArcMap

Opphavsmann: [ESRI](#)

ArcMap brukes for alle kart- og redigeringsoppgaver samt for kartbaserte analyser. Det er mulig å bruke geografiske data for enkelt å finne og forstå relasjoner blant forskjellige geoobjekt. Det er mulig å bruke ulike symbol, lage diagram og rapporter.

I tillegg til ArcCatalog og ArcMap er ArcToolbox et viktig og integrert verktøy i ArcGIS. ArcToolbox har funksjonalitet for konvertering av data og geobearbeiding.

# Dataanalyse i GIS

Forfatter: Birgit Strømsholm

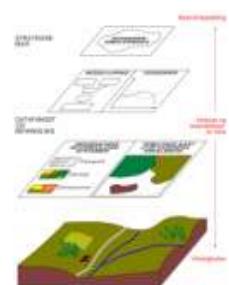
[Dataanalyse i GIS \(51128\)](#)

GIS-verktøyet gir mulighet for å koble stedfestet informasjon og transformere den, for eksempel ved å benytte matematiske formler. I tillegg til å være et uttegnings- og lagringsverktøy, er GIS også et analyseverktøy.

Også tradisjonelle kart kan brukes til analyse. Eksempler er beregning av ulike typer skog innen en kommune eller å finne berørte arealer i forbindelse med bygging av ny vei ved å tegne det planlagte veiareal på et topografisk kart.

Slik enkel overlagring av informasjon kan sammenfattes i begrepet "tradisjonell kartanalyse". Dette er automatisert i forbindelse med GIS under begrepet "kartografisk analyse" eller "digital kartanalyse".

Digital kartanalyse gjør det mulig å analysere store datamengder og komplekse sammenhenger, analyseoppgaver som var uoverkommelige med tradisjonelle metoder.



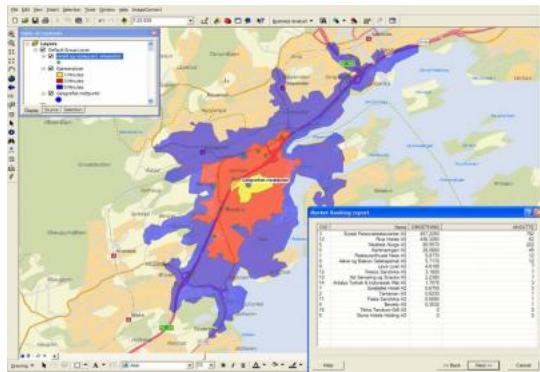
GIS-analyse.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Beskrivelsene under viser eksempel på prinsipper for kartografiske analysemetoder.

## Kartografisk analyse

Den generelle fremgangsmåten for kartografisk analyse er at en bruker har et problem som skal løses ved hjelp av informasjon som er lagret i kartdatabasen. Denne informasjonen skal brukes på en eller annen måte. Dette skjer via en kobling mellom kartdatabasen og den ønskede kartografiske fremstillingen av problemet. Mellom kartdatabasen og resultatet kan det ligge

- \* en matematisk modell, hvor informasjonen fra kartdatabasen benyttes som innverdi eller parametre
- \* matematiske ligninger som kobler informasjonen fra to temalag (aritmetiske operasjoner, funksjonssammenhenger og lignende)
- \* et utvalg av egenskaper (søking, boolske sammenhenger)
- \* omarbeidning eller redefinisjon av egenskaper



Etablering av ny hotell- og restaurantvirksomhet. Kartanalyse som viser resultatet av rangerte konkurrenter etter omsetning innenfor 5 min kjøreavstand fra nye lokaler.

Opphavsmann: [Geodata AS](#)

Det antas at dataene er lagret i ulike temalag, og at lik informasjon legges på en fil eller et filområde, f.eks. elver på en fil og veier på en annen fil. Analysen lages deretter ved å trekke ut informasjon, kombinere og eventuelt rekalkulere egenskapsverdiene (koblingen). Avhengig av problemstillingen kan koblingen gjøres ved logiske (boolske), aritmetiske, geometriske og statistiske operasjoner eller en kombinasjon av disse.

Eksempel på bruk av logiske operasjoner:

1. SELECT egenskap 1 = 'x' AND egenskap 2 = 'y'
2. CALCULATE egenskap 3 = 'x × y'

Resultatet av en analyse kan da presenteres i kart eller tabellform avhengig av hva som er mest hensiktsmessig.

Koblingen av data er bestandig knyttet til romlige enheter. Eksempel på dette er enkle lokaliteter (posisjon av et enkelt objekt), et direkte naboskap rundt et objekt, en sone definert som en polygon (vektor) eller en sone med lik verdi (raster) eller hele området datasettet dekker.

Forutsetningen for digital kartanalyse er en etablert kartdatabase med relevant stedfestet informasjon som er lagret på en hensiktsmessig måte. For vektorbaserte kartdata må topologien være opprettet feilfritt.

### Datahenting og datarekoding

Den enkleste type romlig analyse som kan gjøres, er å velge ut bestemte datasett og reklassifisere dem. I praksis går en inn i kartdatabasen og "spør" etter bestemte egenskaper ved hjelp av logiske operasjoner, boolske operasjoner.

### Topologisk dataoverlagring

Generell dataoverlagring beskriver en kombinasjon av ulike kartegenskaper.

I praksis er dette en

kombinasjon av to eller flere temalag, knyttet sammen med en eller annen form for funksjonsammenheng. Dersom det er kvalitative eller kvantitative data som foreligger i vektorformat, vil en overlagring bety en kombinasjon av både geometrien og attributtene som er knyttet sammen ved hjelp av en topologisk datamodell.

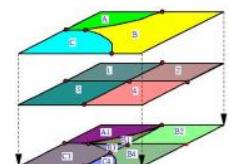
Denne analysen kalles topologisk overlay. Her blir altså ikke bare linjer eller polygoner kombinert i et nytt temalag, men også egenskapene fra utgangstemalagene blir tatt med når topologien av det nye temalaget bygges opp. Illustrasjonen viser topologisk overlagring av to datasett bestående av polygoner. Grensene og egenskapene arves til resultatet.

Etter overlagring kan resultatet reklassifiseres basert på en logisk operasjon.

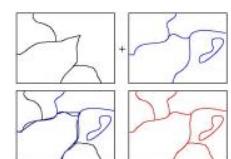
Topologisk overlagring i

vektorsystemet er en relativt komplisert prosess. Overlagres polygoner med omtrentlig samme grense, vil det oppstå masse små polygoner uten noen mening.

Det illustreres i skissen (Overlagningsprosessen) nederst til venstre. Gode GIS-systemer har moduler som fjerner slike små polygoner. Resultatet vises i skissen.



Topologisk overlagring av to datasett.  
Opphavsmann: [Narom](#)

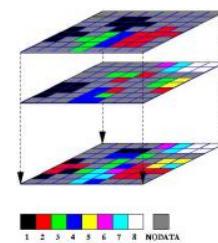


Overlagningsprosessen.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Overlagring av kvalitative data med arving av egenskapene er også mulig i rastersystemet, og her kan det gjennomføres mye raskere.

Det forutsetter at cellestørrelsen er lik i alle datasett.

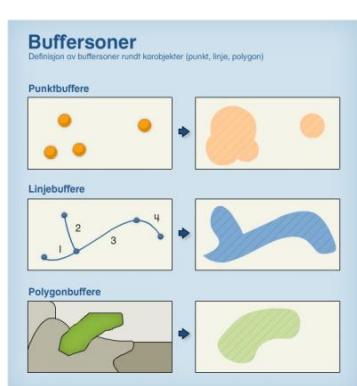
Prinsippene vises i figuren "Overlagring med rasterbaserte data". Her blir hver celle sammenlignet individuelt.



Overlagring rasterbaserte data.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Ved topologisk overlagring lages det en egenskapstabell som for hver celle inneholder verdier for de to datasett som ble kombinert. Framgangsmåten er ellers den samme som for vektorbaserte data.

### Buffersoner



Definisjon av buffersoner rundt kartobjekt.  
Opphavsmann: [Amendor](#)

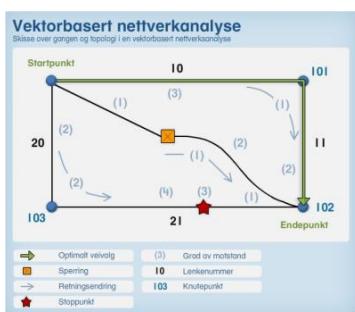
Et viktig analyseprinsipp som er mye brukt i offentlig planlegging og forvaltning, er å lage en bufferson rundt ein polygon, linje eller punkt. Illustrasjonen viser definisjon av buffersoner rundt slike kartobjekter (Amendor).

Det er mulig i GIS-systemet å angi bredden av buffersonen direkte eller be systemet om å bruke visse egenskapsverdier til å definere bredden av buffersonen.

Metoden kan for eksempel nytties i planleggingen av en veitrasé der man ønsker å finne ut hvilke arealer

som berøres i en viss omkrets av den planlagte veien.

## Nettverksanalyse



Skisse over gangen og topologien i en vektorbasert nettverksanalyse.  
Opphavsmann: [Amendor](#)

karakterisere forbindelsen mellom to punkt.

Det er enkelt for et GIS å beregne den geometriske avstanden mellom to punkter A og B. Det er dermed ikke sagt at denne avstanden virkelig er den korteste når en skal bevege seg fra punkt A til B. Dette illustreres ved startpunkt og endepunkt i figuren. Figuren viser eksempel på en skisse over gangen og topologien i en vektorbasert nettverksanalyse.

Mellom punktene kan det ligge et fjell, og det letteste kan da være å gå rundt. I en nettverksanalyse ville en i et slikt tilfelle kunne finne den letteste vei mellom punktene. Nettverksanalyse handler om å

Et nettverk i et vektorbasert GIS er definert som et system av sammenhengende linjer som er

tilknyttet en spesiell topologi. Strekket mellom to punkter kalles lenker. Det tilordnes egenskaper til disse lenkene, som forteller om hvor lett det er å bevege seg langs denne lenken.

I biltrafikken kan det være lyskryss, hastighetsbegrensninger o.l. som forsinker flyten, eller sperringer som hindrer gjennomgang fullstendig. Ved å tildele realistiske egenskaper (kjøretid, kostnader o.l.) til lenkene, kan det simuleres realistiske situasjoner.

Også i rasterbaserte systemer er det mulig å simulere nettverksanalyse. Men her er det mye mindre fleksibilitet. Et spesiell tilfelle av nettverksanalyse i rasterbaserte system er å finne avløpsveier for vann basert på en høydemodell. I denne analysen brukes først en algoritme som finner retningen vannet renner i, basert på helningen av overflaten. Deretter beregnes antall celler som drenerer til hver celle. Et eksempel på dette er analyse av issmelting og hvilke konsekvenser det vil medføre. I sine analyser for å overvåke breene, benytter Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) ulike metoder og modeller hvor bruk av GIS er et viktig verktøy.



Smelting av Storbreen.  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Kartalgebra

Kartalgebra krever rasterbaserte datasett som er delt inn i ulike temalag. Datasettene skal inneholde helst kvantitative, kontinuerlige verdier (for eksempel et satellittbilde). Prinsippet er nå at en kan kombinere ulike datasett ved å koble hver celle innenfor datasettet med samme geografiske posisjon ved hjelp av algebraiske operasjoner/funksjoner, f.eks. addisjon, subtraksjon, trigonometriske funksjoner o.l.

Kartalgebra er en overlay-operasjon som gjør det mulig å behandle kartdatasett (altså 2-dimensjonale datasett) som variabler eller konstanter innenfor en matematisk funksjonssammenheng. Prinsippene her er de samme som ved beregning av vegetasjonsindeksene i fjernanalyse.

## Resultatet av kartanalysen

Resultatet av analysen presenteres på en hensiktsmessig form (kart eller rapport). Kartanalyser kan gjennomføres med både rasterbaserte og vektorbaserte kart. Noen analyser lar seg lettere gjennomføre i rastersystemet (f.eks. kartalgebra), andre i vektorsystemet (f.eks. nettverksanalyser). Hvilke type kartanalyse som velges til ulike formål, er også i høy grad avhengig av hvilke datatyper en har lagret i kartdatabasen.

Generelt kan en si at datahenting, reklassifisering, topologisk overlagring og etablering av buffersoner er mest anvendt på vektorbaserte data. Nettverksanalyser brukes mye, både på vektor- og rasterbaserte system, mens kartalgebra er hovedsakelig anvendt på kontinuerlige, rasterbaserte kartdata.

# Datakvalitet og feilkilder

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Datakvalitet og feilkilder \(51481\)](#)

Datakvalitet og feilkilder i GIS er nevnt i ulike sammenhenger. I forbindelse med datafangst blir det sagt at dette er en avveining mellom behov for kvalitet og kostnader. I forhold til kostnader, er det viktig på forhånd å vurdere brukerbehovene for å fastsette kvalitetskravene til GIS. Hensynet til kostnadene kan medføre at det velges dårligere datakvalitet enn det som ville vært optimalt ut fra brukerens behov.

Kunnskap om datakvalitet er svært viktig i forbindelse med kartografiske analyser. Gjennom analysegangen vil kvaliteten forandre seg og normalt svekkes. Data med lav kvalitet vil gjennom en analyse resultere i like lav eller lavere kvalitet.

De viktigste feilkildene kan generelt beskrives som feil knyttet til geometrien og posisjoneringen av et objekt, og feil i egenskapene som er knyttet til objektet eller en celle. Ved bruk av GIS er det derfor viktig å være klar over feilene som gjøres, og ta potensielle feilkilder i betraktning når GIS brukes.

## Metadata

I tillegg kan informasjon om dataenes opprinnelse og formål være nyttig for å vurdere hvordan dataene bør anvendes. Denne type informasjon om de geografiske dataene betegnes som metadata. Metadata er data om data. I denne sammenheng informasjon om geografiske data.

Metadata kan for eksempel gi informasjon om hvordan og når dataene er innsamlet, format, nøyaktighet, hvem som har samlet inn dataene, eller eier, formålet med innsamlingen og hva slags informasjon som finnes i dataene.

Gjennom metadata vil brukerne kunne vurdere om de data som er tilgjengelige er egnet til sitt bruk og sitt formål.

## Originale feilkilder uavhengig av GIS-behandling

Det er her snakk om feilkilder som kan være oppstått ved registreringer og målinger i felt, ved bearbeiding av dataene, ved endringer i felt eller på grunn av manglende fullstendighet og opplosning i dataene.

Dette omfatter feil og unøyaktigheter i måleinstrumenter som GPS og satellittsensorer. Videre oppstår det feil under selve kartfremstillingen. Dette omfatter unøyaktighet i kartkonstruksjonsinstrumenter eller i forbindelse med rentegning av kart. Det er viktig å være oppmerksom på om kartet er oppdatert. Kartet gir vanligvis øyeblikksbilder, mens virkeligheten er i stadig forandring. Feil kan oppstå ved at nye fenomener oppstår i felt, fenomener som ikke er ivaretatt i kartet.

Eksempel på en slik feil kan være ved endring av veiadresser etter at kartet er tilrettelagt. I det tilgjengelige kartet er denne veiadressen plassert med en nøyaktig geografisk posisjon på opprinnelig sted. Den nøyaktige posisjonen er oppgitt i egenskapsdataene (attributtene). Dersom kartet brukes i forbindelse med ambulanseutrykning eller ved brann, så kan dette få store konsekvenser.

## Feil oppstår i samband med GIS-behandlingen



GIS kartlag.  
Opphavsmann: [Statens kartverk](#)



Kartdata brukes i forbindelse med brann.  
Opphavsmann: [ESRI](#)

Ofte er et strekkart utgangspunktet for de digitale kartdata. Under den digitale datainnsamlingsprosessen vil unøyaktigheter i posisjoneringen av geometriske objekter forplantes videre. Et vanlig mål for posisjonsnøyaktighet er middelfeilen. Dette er et statistisk mål som avgrenser et område. Innenfor dette området er det en viss sannsynlighet for at det virkelige punktet befinner seg.

Digitaliseringsbord og -plater skal gi nøyaktig posisjonering for manuell digitalisering fra analoge kart, tegninger og bilder. Men i praksis kan følgende feilkilder oppstå:

- \* interne defekter i digitaliseringsbordet
- \* feil i elektronikken i digitaliseringsbordet (f.eks. interpolasjonsrutiner)
- \* eksterne elektromagnetiske felter (kraftlinjer, magnetiske objekter, dataskjermmer og annet datautstyr)
- \* magnetiske partikler eller andre forstyrrende partikler på tegningen, bildet eller kartet (blyantstreker kan forstyrre digitaliseringsbord)

Under prosesseringen av kartdata i datamaskinen vil nye feil oppstå og eksisterende feil forplantes og forsterkes. Et GIS-system antar imidlertid at datakilden er entydig, digitaliseringen skjer feilfritt, grenser er klart definerte, feilfrie, riktig tegnet og at eventuelle definerte intervaller for klasser er de beste og like riktige over hele kartbladet.

Brukeren av geografiske data må derfor kunne vurdere feilene, særlig under prosesseringen og analyseprosessen. Denne kunnskapen om feilforplantning er avgjørende for å kunne vurdere kvaliteten av et digitalt kartprodukt.

De viktigste feil som skjer under prosesseringen er:

**1. Geometriske feil som oppstår under digitaliseringen.** Hovedkildene er feil i kildekartene (målestokk, strektykkelse) og med den digitale representasjonen av digitaliserte linjer. Rette linjer kan digitaliseres med små feil, mens det i sterkt kurvede linjer innføres mye feil, avhengig av hvor mange punkter som registreres.

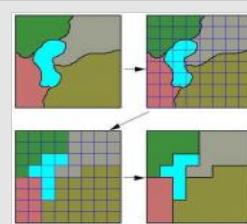
**2. Geometriske feil som oppstår under rastrering eller vektorisering.** Eksemplet er et vektordatasett som konverteres til raster med en gitt oppløsning. Dette gir en viss svekking av datakvaliteten på grunn av den grove oppløsningen. Det vektoriserte rasterbilde fremtrer som et meget generalisert kart i forhold til utgangspunktet.

**3. Geometriske feil som oppstår ved overlagring av polygongrenser.** Ved overlay-prosesser vil det dannes en mengde små polygoner som er resultat av feil i de opprinnelige temalagene.

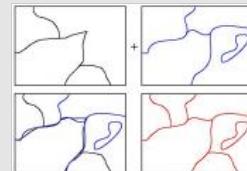
**4. Problemer med grensesettingen.** En virkelig skarpt definert grense eksisterer ikke i mange sammenhenger. Det skyldes hovedsakelig at naturlige variasjoner er kontinuerlige, mens vi vanligvis bare greier å ta prøver eller observere i diskrete punkter. Det er ofte vanskelig å vite hvordan grensene som er funnet, skal trekkes. En rett linje i en liten målestokk vil gjerne bli til en hakkete linje i en større målestokk hvor flere detaljer kan fremstilles.

**5. Egenskapsfeil som oppstår under en digital kartanalyse.** Eksempel på dette kan være at hovedkilden av feil i en folie er posisjoneringsfeil og feil innenfor egenskapstabellen, det vil si at enkelte polygoner har fått tilordnet feil egenskap. Dette kan også uttrykkes som sannsynligheter, nemlig sannsynligheten for at en bestemt verdi ved en bestemt lokalisering i et temalag henholdsvis er korrekt eller ikke korrekt.

Det er viktig å huske at all kartlegging er en forenkling av virkeligheten. I virkeligheten er de fleste grenser mellom arealkategorier uklare og flytende. Dette skaper et problem i forhold til digital fremstilling, som gjerne er en svart-hvit-fremstilling med klare grenser mellom kategoriene. De innsamlede grunnlagsdataene har også en usikkerhet knyttet til seg. Som kritisk bruker er det viktig å legge opp faste kontrollrutiner underveis i prosessen. Først og fremst fordi datamodeller gir et misvisende forenklet bilde av virkeligheten. Dette innebærer at data fremstilles som mer presise og sikrere enn de egentlig er, noe som fører til at en kan tillegge datamodellen større pålitelighet enn det egentlig er grunnlag for.



Konvertering av vektordatasett til raster.  
Opphavsmann: [Narom](#)



Små polygoner uten mening oppstår under overlagringsprosessen.  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Dataformater for GIS

Forfatter: Birgit Strømsholm  
Dataformater for GIS (59521)

Tradisjonelt har leverandørene av GIS-programvare benyttet egne interne lagringsformater og spesielle eksportformater. I praksis kan de bare produseres av systemet selv og kalles derfor for proprietære formater.

Mange formater er likevel dokumentert, slik at andre kan lage rutiner for å lese hele eller deler av datainnholdet. Begrensete muligheter til å produsere og lese formatene har i lang tid ført til vanskeligheter ved overføring av data fra ett system til et annet. Innføringen av det åpne og standardiserte SOSI-formatet i Norge er et forsøk på å gjøre hverdagen enklere for brukerne. Men fortsatt er det slik at en relativt ofte må forholde seg til en rekke proprietære formater når en jobber med digitale reguleringsplaner. Noen av formatene er likevel så mye benyttet at de kan betraktes som industristandarder.

SOSI-formatet

SOSI er den nasjonale standarden for modellering og utveksling av geodata, og står for "Samordnet Opplegg for Stedfestet Informasjon". SOSI-standarden utarbeides av ulike arbeidsgrupper hvor deltagelse er frivillig og selvfinsansiert, og hvor alle vedtak vedtas etter konsensusprinsippet (dvs. at alle må være enige). Geodata favner i dag svært vidt, f.eks. fra administrative data og persondata i GAB (nasjonalt register for grunneiendommer, eiere, adresser og bygninger) til koordinatdata for høydekurver i topografiske kart. SOSI-standarden omhandler teknikk for datadefinisjoner av geografisk informasjon, som omfatter standardiserte beskrivelser av geometri og topologi, datakvalitet, koordinatsystemer, områdeavgrensning, metadata i form av informasjon om eier osv. Den omfatter også konkrete databeskrivelser for ulike datatyper eller anvendelsesområder, noe som utgjør en vesentlig del av omfanget.

Statens Kartverk tilbyr nettbasert kurs i innføring av SOSI og gir oversikt over forskjellig programvare som brukes i arbeidet med SOSI-standardisering.



SOSI-grunnkurs, grunnleggende innføring i SOSI-standarden  
Opphavsmann: [Statens kartverk](#)

SOSI-standarden kan sies å ha to hovedbruksområder: standardisering av kodeverdier og standardisert utvekslingsformat. I dag benyttes dette standardformatet i økende grad ved utveksling av stedfestet informasjon i Norge, og stadig flere kommuner setter krav til at f.eks. plandata skal leveres i SOSI-format. SOSI-formatet er svært godt dokumentert. Det er derfor relativt enkelt å lage eksport- og importrutiner.

QUADRI

Quadri er et norsk format utviklet av Norkart for deres VG/GIS Line system. Quadri er i utgangspunktet et databasesystem som håndterer både geometri og egenskaper i samme base. Quadri-formatet kan bare produseres av VGprogrammene, og er således proprietært. Men geometri og temakoder er dokumentert, slik at det kan lages leserutiner for eksterne systemer. Andre egenskaper er vanskelig tilgjengelig. Ett enkelt datasett blir ved eksport fordelt på flere filer. En kartdatabase består av 4 filer (gdh, gdh, gdd, gdi). Quadri kan importere og eksportere flere andre formater, delvis gjennom konverteringsfiler. Datautveksling med andre programmer skjer i stor grad via SOSI. Direkte import fra Quadri er mulig i enkelte program (Nova-Point mfl.), dersom man kun trenger det grafiske innholdet.

## GEOBASE (BASE95)

GeoBase (tidligere Base95) er et norsk proprietært vektorformat utviklet av Norconsult for deres WinMap system. Hvert datasett blir ved eksport håndtert i 6 ulike filer – ulike indeksfiler, geometrifiler og egenskapsfiler. Datautveksling med andre programmer skjer stort sett via SOSI, men GeoBase kan også importere og eksportere flere andre formater, delvis gjennom konverteringsfiler.

## **DXF og DWG**

Data eXchange Format (DXF) er et vektorformat utviklet av Autodesk. Det benyttes for eksport av data fra AutoCAD og er opprinnelig utviklet for utveksling av data mellom ulike DAK-programmer. DXF er godt dokumentert, både med hensyn til import og eksport, og er nærmest et "åpent" DAK-format. I DXF er hele datasettet samlet i en enkel fil – en ASCII-fil. Strukturen er bygget opp av en "Header" med generell informasjon, "Table" som inneholder definisjon av linjeelementene, fonter o. l., "Block" som inneholder definisjon av hver blokk ved uttegning, og "Entities" som inneholder koordinatene. DXF er noe tungt å jobbe med, siden filstørrelsen vokser 2,5–3 ganger ved eksport fra AutoCad. DWG er det interne lagringsformatet i AutoCAD og kan bare produseres av AutoCAD, men en del andre systemer er i stand til å lese dataene.

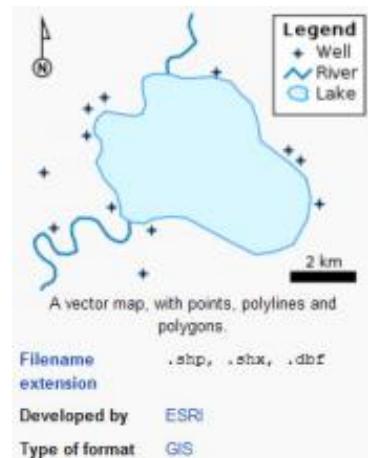
DWG er noe mer komplekst enn DXF. DXF og DWG benyttes så hyppig at de kan betraktes som industristandarder på området. Siden mange GIS/DAK-systemer kan eksportere og importere DXF-formatet, har det blitt et mye benyttet format for vektordata. En del GIS kan også lese DWG-formatet.

### SHAPE og COVER

Både Shape og Cover er utviklet av ESRI (Environmental Systems Research Institute). Shape er utviklet for ArcView-programvaren, mens Cover er utviklet for ArcInfo. Begge er formater for vektordata (geometrien), men kan også brukes for overføring av egenskaper. Shape-formatet er noe enklere oppbygd enn Cover.

Et datasett på Shape-format består av 3 filer (koordinater, egenskaper og indeksering). Punkt, linjer og flater håndteres som separate datasett. Fra og med versjon ArcView 8.0 er filsystemet avløst av en databaseløsning, som bedre sikrer sammenhengen mellom datasettene. Cover samler alle objekttyper i ett datasett, ordnet i en standardisert katalogstruktur. Coverformatet håndterer topologi. Det gjør ikke Shape-formatet, men til gjengjeld oppnår en hurtigere opptegning og prosessering med Shape enn med Cover.

Shape kan håndtere egenskaper i form av DBASE-filer. Shape-formatet er godt dokumentert og er nærmest "åpent" format. Det er derfor et utbredt vektorformat for kart/GIS-data, og relativt mange andre systemer leser enten formatet direkte eller via konvertere.



Et datasett i shape-format

## Visualisering av kart, satellittbilder og fly..

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Visualisering av kart, satellittbilder og flyfoto \(60990\)](#)

Det finnes flere gratis innsynsverktøy som er lett tilgjengelig, og godt egnet for å visualisere kartdata, satellittbilder og flyfoto. Digitale kartløsninger tilrettes legges også som nettportaler og gir rask og enkel tilgang til spennende og brukervennlige kart.

Utvikling fra PC-basert til nettbaserte digitale kart har gitt stor tilgang på kartportaler som for eksempel Norge digitalt, Kart i skolen og nedlastbar kartprogramvare med nettbasert nedlastings- og oppdaterings-funksjonalitet. Eksempel på slike GIS-applikasjoner er Google Earth, Google Maps og NASA World Wind.

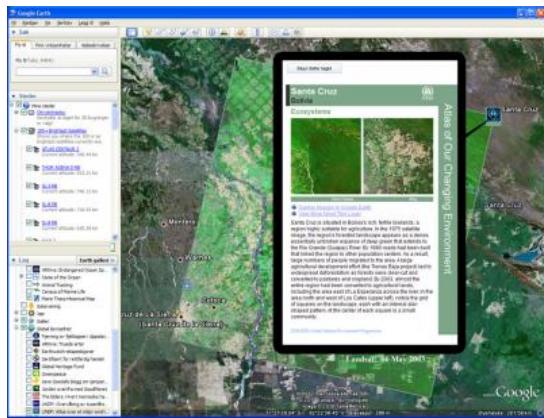


NASA World Wind

Forfatter: [NASA](#)

## Google Earth og Norge i bilder

Med programmet Google Earth er det mulig å fly hvor en vil på jorda for å vise satellittbilder, kart, terren og tredimensjonale bygninger. Det er mulig å utforske detaljert geografisk innhold, lagre steder en har reist til og dele informasjonen med andre. Man kan også legge inn et kart, flyfoto eller satellittbilde for et område med bruk av "Image Overlays". Norge er foreløpig dekket med lavoppløselige bilder i Google Earth, og det er få flybilder tilgjengelig. I Google Earth er det en del ferdige temalag som er egnet for undervisning. Eksempel på dette er UNEP sitt miljøatlas som ved hjelp av historiske satellittbilder viser endringer på jorda.



Google Earth viser UNEP sitt miljøatlas

Opphavsmann: [Google Inc.](#).

For høyoppløselige satellittbilder og flybilder er den norske portalen [norgebilder.no](#) bedre egnet. Norge i bilder er en portal i et samarbeid mellom Statens kartverk, Statens vegvesen og Norsk institutt for skog og landskap. Norge i bilder leverer en innsynsløsning der en kan få oversikt over og se flyfoto og satellittbilder fra hele landet.

## Google Earth med ESA satellittbilder

Den europeiske romorganisasjonen ESA har i samarbeid med Google lagt ut en rekke punkter på Google Earth der man kan lese mer om hvordan satellittbilder blir til.

ESA har plukket ut noen av sine fineste satellittbilder fra ulike punkter spredd over hele jordkloden. Ved å peke på ESA-logoer i Google Earth får man opp et flott bilde med en kort tekst. Man kan klikke på bildet for å komme til en side hos ESA, der man kan lese mer om bildet og hvordan det ble tatt. Blant bildene som ESA har lagt ut, finnes algeoppblomstring i havet, issmelting i Antarktis, avskoging i Brasil og vulkanutbrudd.

For å se ESA-bildene, må man aktivere "Galleri" under Lag og deretter "European Space Agency (ESA)"-valget.

# Hvordan skaffe og tilrettelegge digitale bergartskart

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Hvordan skaffe og tilrettelegge digitale bergartskart for ArcMap? \(65513\)](#)

Det finnes gratis innsynsverktøy som egner seg for å visualisere fordelingen av bergarter for hele Norge eller avgrensede områder. Men i denne oppgaven skal det tilrettelegges digitale bergartstema kombinert med høyoppløselig satellittbilde for ArcMap. Bergartstemaet skal bearbeides slik at de enkelte bergartstypene er best mulig egnet for visualisering i ArcMap. Den nordlige del av Andøy kommune i Nordland er valgt som geografisk område.

## Høyoppløselig satellittbilde

Satellittbildet skal brukes i stedet for et basiskart slik at man ved kombinasjon av bergartstyper letttere kan se hvor de forekommer i landskapet.

Det skal benyttes et satellittbildeutsnitt over nordlige del av Andøy kommune med opptaksdato 5. august 2009. Det er et satellittbildeoppdrag gjort av QuickBird-satellitten i en høyde 450 km over jorda. Bildet er et naturlig fargebilde satt sammen av bildeoppdrag innen kanal 1 (blått synlig lys), kanal 2 (grønt synlig lys) og kanal 3 (rødt synlig lys). Den geometriske oppløsningen er 2,4 m og utsnittet er på ca. 74 MB. Filnavnet er qb-ms\_andoya\_05aug2009\_ch321.

Satellittbildet er georeferert med projeksjon UTM, sone 33 og datum WGS84.



QuickBird-bilde over

nordlige Andøya

Opphavsmann:

[DigitalGlobe](#)

## OPPGAVE 1

### Hvor og hvordan skaffe digitalt bergartstema?

Norges geologiske undersøkelse, NGU, bygger og vedlikeholder nasjonale databaser som omfatter akuell informasjon som Norges berggrunn, løsmasser, mineralske ressurser og grunnvann.



Berggrunn over nordlige

Andøya

Opphavsmann: [NGU](#),

[Norges geologiske  
undersøkelse](#)

Bruk lenken til databasene til NGU.

- Finn frem til "Berggrunn" i oversikten, velg deretter "Vis kart".
- Et kartinnsynsverktøy viser berggrunnen over hele Norge som "N250 Berggrunn - raster". Endre visningen til "N250 Berggrunn - vektor" i nedtrekksmenyen øverst til høyre.
- Avgrens visningen til Andøy kommune ved å velge "Finn kommune" til venstre i toppmenyen, velg Nordland som fylke og Andøy som kommune. Deretter blir visningen avgrenset til Andøy kommune (Andøya og deler av Hinnøya) med nærliggende område. Bruk zoom-verktøyet for å avgrense ytterligere.

- Deretter er avgrenset område klart for å lastes ned. Velg "Nedlasting og bestilling" i toppmenyen. I det nye vinduet som kommer frem, er det informasjon om nedlastingene. Velg "Kartdata" i menyen til venstre. I oversikten som kommer frem, skal "N250 Berggrunn linjer" og "N250 Berggrunn flater" være huket av.

Velg deretter koordinatsystem. For at bergartstemaet skal passe sammen med satellittbildet, så må det velges samme koordinatsystem (projeksjon og datum) som satellittbildet: WGS84 UTM sone 33. Fyll deretter inn personopplysninger og velg last ned. Du vil få beskjed om at kartdataene er pakket i en zip-fil og er tilgjengelig for nedlasting.

## Informasjon om nedlastede filer

Lag en katalogstruktur som er hensiktsmessig på lokal maskin, og pakk opp zip-filene der. Det blir tilgjengelig fire filer etter utpakking, en dbf-fil, en shape-fil, en prj-fil og en shx-fil. Samtlige filer har navnet *xN250BergrunnsFlater* (se illustrasjon).

Eksempel på berggrunn over nordlige Andøya finnes også som vedlegg for nedlasting – se relatert innhold "Berggrunn over nordlige Andøya".

Hver shp-fil følges med et sett av filer med informasjon. Selve shp-filen (shape format) viser geometrien (punkt, linje, polygon), shx-filen (shape index format) er en posisjonsindeks som tillater et raskt søk forover og bakover, mens dbf-filen inneholder kolonner av egenskapene til hver shp-fil og er i dBase IV-format. Det er et krav om at hver shp-fil skal følges av shx- og dbf-filer, mens prj-filen er frivillig. Denne filen (projeksjonsformat) inneholder informasjon om koordinatsystemet og projeksjonen som er viktig for visningen av shp-filen, og er en vanlig tekstfil.

## OPPGAVE 2

### Vise satellittbildet og bergartstema i ArcMap

- a) Last ned og pakk ut vedlegget som inneholder QuickBird-bildet, på lokal datamaskin.  
b) Start opp ArcMap.

Last inn og aktiver satellittbildet. Svar ja på spørsmålet om "Create pyramids" ved innlasting av satellittbildet. Orienter deg i satellittbildet. Bruk gjerne et kart som hjelp. Registrer at koordinatene (UTM) er tilgjengelig når du beveger deg rundt i bildet med f.eks. Pan-verktøyet. Bruk zoom-funksjonen for å se flere detaljer

- c) Last inn og aktiver bergartsfilen *xN250BergrunnsFlater.shp*.

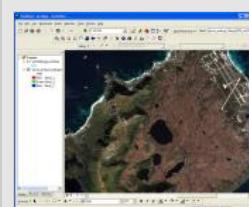
Resultatet blir en skjermflate med en farge som dekker over satellittbildet.

Name	Size	Type
Berggrunn_xN250_BergrunnsFlater.shp	14 KB	Shapefile
Berggrunn_xN250_BergrunnsFlater.shx	20 KB	Index File
Berggrunn_xN250_BergrunnsFlater.dbf	33 KB	dBase File
Berggrunn_xN250_BergrunnsFlater.prj	1 KB	Proj4 File
Berggrunn_xN250_BergrunnsFlater.tif	1 KB	Image File

Oversikt over

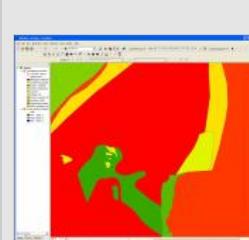
berggrunnsfiler.

Opphavsmann: [NGU](#)



QuickBird-bilde i ArcMap

Forfatter: [Birgit Strømsholm](#)



Bergartstema inndelt i kategorier (alle bergartstypene)

Forfatter: [Birgit Strømsholm](#)

- d) Oppgaven nå blir å presentere en oversikt over de ulike bergartstypene som er tilgjengelig for området. Aktiviser bergartslaget, høyreklikk på bergartstemaet, velg "Properties".

Velg deretter fanen "Symbology", endre "Features, Single symbol" (alle bergartene som en farge/symbol) til "Categories, Unique values". Deretter velges "Value Field" (feltinformasjonen som skal vises) til HBERGNAVN, velg "Color Ramp" (fargeskala) og til slutt "Add All Values" samt OK.

Dette resultatet blir en oversikt over tilgjengelige bergarter, men det er vanskelig å beskrive hvordan bergartene er fordelt i terrenget. Husk å lagre resultatet.

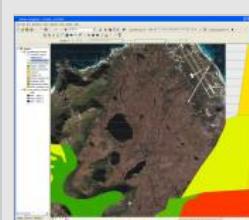
Det er mulig på en enkel måte å vise hvordan bergartslagene forekommer i terrenget ved å endre fargesymbolene for den enkelte bergartstype.

- e) Dobbeltklikk på fargen som er til venstre for bergarten "Båndgneis" i oversikten. I visningsbildet "Symbol Selector" velg "Properties", deretter sett "Type" til "Line Fill Symbol". Forsøk å endre de andre valgene som er tilgjengelig (Color, Line, Outline, Angle osv.). Preview viser resultatet.

- f) Prøv forskjellige endringer for de andre bergartene og lagre det endelige resultatet.

- g) Søk etter informasjon og gi en kort beskrivelse om hvordan og i hvilke tidsperioder bergartene på Andøya ble dannet.

- h) Hva er så spesielt med de yngste bergartene (jura-kritt for ca. 150 millioner år siden) som forekommer i et mindre område på østsiden av Andøya?



Karttema og fargesymboler

Forfatter: [Birgit Strømsholm](#)

# Tilrettelegge berggrunn over nordlige Andøya s..

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Tilrettelegge berggrunn over nordlige Andøya som enkeltfiler for ArcMap \(68308\)](#)

Ved bruk av funksjonalitet i ArcMap er det mulig å skille et digitalt bergartskart som en enkelt shape-fil for hver bergart. Studer oppgaven "Hvordan skaffe og tilrettelegge digitale bergartskart for ArcMap?" for informasjon om aktuelt satellittbilde og digitale bergartstema.

## OPPGAVE 1

### Hvordan bruke ArcMap for å tilrettelegge shapefiler?

Benytt det digitale berggrunnskartet over nordlige Andøya som er lastet ned fra NGU.

QuickBird satellittbildet brukes som et bakgrunnsbilde.

a) Last ned og pakk ut vedleggene som inneholder QuickBird-bildet og det digitale berggrunnskartet, på lokal datamaskin.

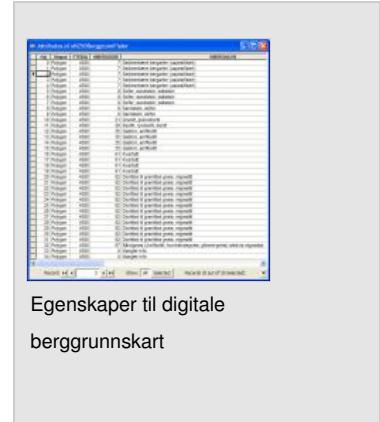
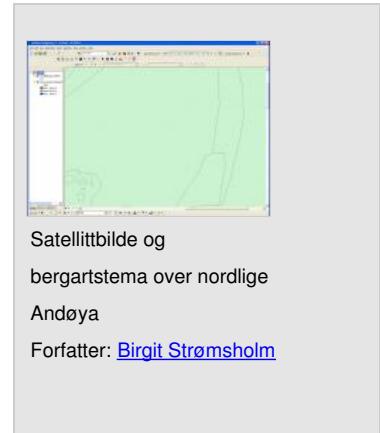
b) Start opp ArcMap. Last inn og aktiver QuickBird satellittbildet over nordlige Andøya. Det har filnavnet qb-ms\_andoya\_05aug2009\_ch321. Zoome til hensiktsmessig størrelse.

c) Last inn og aktiver bergartsfilen xN250BergrunnsFlater.shp.

Resultatet blir en skjermflate med en farge som dekker over satellittbildet (se illustrasjonsbildet). Lagre resultatet som Andoya\_berggrunn. Filnavnet er mxd, ESRI ArcMap Document for prosjekter.

d) Åpne attributt-tabellen til xN250BergrunnsFlater.shp ved å høyreklikke på filen, velg deretter *Open Attribute Table*. Geografiske data består av en romlig del (punkter, linjer eller flater) og en beskrivende del (attributt tabell). Databasefilen inneholder egenskapene (attributt data) til berggrunnstemaet.

Vi vil bruke informasjonen i kolonnene HBERGKODE og HBERGNAVN som grunnlag for å tilrettelegge shapefiler for hver bergartstype. Hver bergart har en bestemt bergartskode, for eksempel så har kvartsitt koden 61. Kode 0 gjelder geografisk område som mangler informasjon om type bergart. Det kan være bergart under vann.



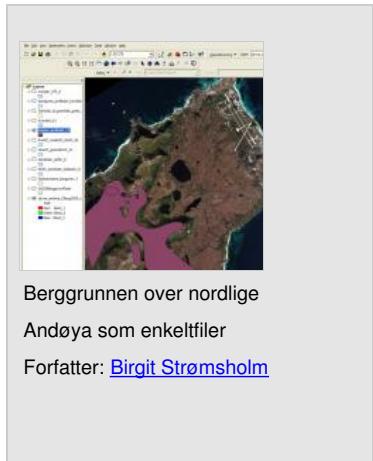
e) Metoden spørring (query) brukes for å tilrettelegge bergartene i attributt-tabellen som enkeltfiler.



Start med dobbelt-klikk eller høyreklikk på xN250BerggrunnFlater.shp, velg *Properties*, deretter *Definition Query* og *Query Builder*. Klikk på "HBERGKODE" slik at det kommer under SELECT \*FROM xN250BerggrunnFlater WHERE:

Query Builder  
Velg deretter "=" og aktuell kode (tall) for bergarten som det skal lages en enkelfil av. Start med bergarten gabbro, amfibolitt med HBERGKODE=35. Er visningen tilsvarende som illustrasjonen "Query Builder"? Avslutt med OK.

Resultatet fra spørringen viser den geografiske utbredelsen for bergarten gabbro, amfibolitt.



Deretter gjenstår det å eksportere resultatet som en enkelfil. Høyreklikk på xN250BerggrunnFlater.shp, velg Data, deretter Export Data. Velg innstillingen som illustrasjonen viser. Lagre i aktuell katalog for oppgaven. Benytt et hensiktsmessig filnavn. Avslutt med OK. Velg "Ja" på spørsmålet "Do you want to add the exported data to the map as a layer".

f) Gjenta prosessen i pkt. e) for samtlige bergartstyper i attributt-tabellen. Endre til egnede farger. Hvilke bergarter som er tilrettelagt, er ikke tilgjengelige innen satellittbildeutsnittet?

# Utvikle en fil-geodatabase med bruk av ArcCatalog

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Utvikle en fil geodatabase med bruk av ArcCatalog \(61937\)](#)

Målet for disse oppgavene er å utvikle en fil geodatabase med bruk av ArcCatalog.

Det er ikke behov for datafiler for denne oppgaven. ArcCatalog er bibliotek systemet for ArcGIS. Det er mulig å søke i, kopiere, slette og organisere filer i ArcCatalog. I tillegg er det mulig å tilrettelegge filer og personlige geodatabaser.

Oppgavene er følgende:

- 1) Åpne ArcGIS og deretter ArcCatalog.

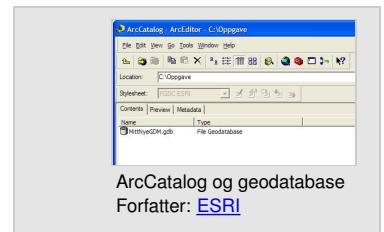
Lag en "Oppgave" katalog på C:\ eller annet egnet sted på egen PC.

Dette er katalogen hvor du vil utvikle en fil geodatabase.

- 2) Den grunnleggende databaseprosessen er først å etablere databasen, for deretter å eksportere filer til geodatabasen.

I ArcCatalog, høyreklikk på "Oppgave"-katalogen som er lagd for å lagre fil geodatabasen., velg "New" og deretter "File Geodatabase". Gi den et nytt navn, f.eks.

MittNyeGDM.gdm



## Legge en shape-fil i geodatabasen

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Legge en shape-fil i geodatabasen \(61939\)](#)

Målet for denne oppgaven er å legge en shape-fil i geodatabasen som er tilrettelagt (MittNyeGDM.gdm).

Bruk egen shapefil eller last ned "Veidata for Andenes" (vedlegg) som er en zip-fil med veidata (N50 kart) for Andenes kommune. Pakk ut zip-filen og legg filene på et egnet sted på C:\.

Oppgaven er følgende:

- 1) Åpne ArcGIS og deretter ArcCatalog. Naviger til katalogen der vei-data for Andenes ligger.
- 2) Høyreklikk på veidatafilen 1871\_Samferdsel\_lin.shp og velg Export, og velg deretter "To Geodatabase (single)".
- 3) Det første feltet "Input Features" har allerede filen som skal eksporteres til geodatabasen. I det andre feltet "Output Location", naviger til "MittNyeGDM.gdm". Velg geodatabasen og velg Add.
- 4) I "Output Feature Class"-feltet, skriv et nytt navn på filen. Gi det navnet Andenesveier.
- 5) Klikk OK. Det vil ta litt tid for å behandle.
- 6) Når prosessen er ferdig, dobbelklikk på MittNyeGDM.gdm i ArcCatalog og legg merke til at filen er blitt lagt til i geodatabasen. Den vil også åpnes i ArcGIS.

## Legge et satellittbilde i geodatabasen

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Legge et satellittbilde i geodatabasen \(62046\)](#)

Målet for denne oppgaven er å legge et satellittbilde i geodatabasen som er tilrettelagt (MittNyeGDM.gdm).

Bruk et høyoppløselig satellittbilde-utsnitt over Andenes med opptaksdato 5. august 2009. Det er et satellittbildeopptak gjort av QuickBird satellitten i en høyde 450 km over jorda. Bildet er et naturlig fargebilde med en kanalkombinasjon 3-2-1 og geometrisk oppløsning på 2,4 m. Filnavn qb-andoya-05aug2009-ch321.tif (16 MB).

Oppgaven er som følgende:

- 1) Åpne ArcGIS og deretter ArcCatalog. Naviger til katalogen der QuickBird-bildet ligger.
- 2) Høyreklikk på filen qb-andoya-05aug2009-ch321.tif og velg Export, og velg deretter "Raster to Different Format".
- 3) Det første feltet "Input Raster" har allerede filen som skal eksporteres til geodatabasen. I det andre feltet "Output Raster Dataset", naviger til "MittNyeGDM.gdm". Velg geodatabasen og velg Save. Endre filnavnet til til f.eks. QuickBird\_satellittbilde05aug2009\_ch321
- 4) De andre feltene er valgfrie. En av mulighetene er å konvertere satellittbildet fra 32-bit data til 8-bit data.
- 5) Klikk OK. Kontroller om satellittbildet er kommet i databasen.

## Datafangst

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Datafangst \(61904\)](#)

Geografisk informasjon, eller geodata, er alt som kan stedfestes og presenteres på et kart. Det kan være kartet i seg selv, men også forskjellige tema som kan være hensiktsmessig å stedfeste. Datafangst omfatter prosessen med innhenting av slike geodata.

# Datafangst og datainnsamling

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Datafangst og datainnsamling \(51719\)](#)

Datafangst er metoder som benyttes for innsamling av stedfestet informasjon. For å forstå egenskapene til stedfestede data og deres bruksområder, bør man ha kjennskap til metoder for datafangst. Ved innføring av GIS vil datainnsamling som regel være en kostbar prosess. Rasjonell datafangst stiller store krav til bruker og programvare. Dette skyldes at originalmaterialet ofte er ustrukturert med mye feil. Dessuten vil det grafiske kartgrunnlaget ofte stamme fra ulike kilder med ulike krav til nøyaktighet.

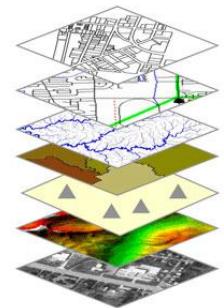
Digitale kartdata kan for eksempel innhentes fra ulike kilder og på flere tekniske måter. Tradisjonelle analoge kart (folier, papir) kan benyttes etter å ha vært gjennom en digitaliseringsprosess via skanning eller borddigitalisering. Fotogrammetrisk konstruksjon kan også gi digitale grunnlagsdata. I tillegg kan ferdigdigitaliserte data hentes fra en rekke ulike kartbasar.

Alle som har tatt i bruk GIS, har erfart at det er mange problemer forbundet med datainnsamlingen. En integrering av alle typer stedfestet informasjon krever svært gode funksjoner for datafangst og kvalitetskontroll.

## Faktorer som vurderes ved datainnsamling

Før en datainnsamling iverksettes, er det mange faktorer som må vurderes. Av disse kan nevnes: behov, kostnader, tilgjengelighet og tidsperspektiv.

Det må gjøres en avveining mellom kvalitetsønsker og kostnader. Lavkvalitetsdata kan gjerne fremskaffes raskt. Det å skaffe høykvalitetsdata er gjerne en langsiktig prosess med f.eks. feltarbeid, flyfotografering og bearbeiding.



GIS kartlag  
Opphavsmann: [Statens Kartverk](#)

## Aktuelle datafangstmetoder

GIS kan benytte alle data som kan stedfestes. Følgende liste gir en oversikt over de viktigste datafangstmetodene

- \* direkte fra landmåling (koordinatfestede punkter)
- \* tabelldata fra eksisterende databaser/arkiver
- \* manuell digitalisering av kart (vektorbasert digitalisering fra eksisterende kart)
- \* skanning av eksisterende kart, tegninger, figurer, fotografier, flybilder o.l.
- \* fotogrammetri, flyfotografering
- \* satellittbilde
- \* lasermålinger
- \* GPS og andre stedfestings- og navigasjonssystemer

# Landmåling

Forfatter: Birgit Strømsholm  
[Landmåling \(51723\)](#)

Landmåling er en vitenskap med tradisjoner tilbake til oldtiden. Det har skjedd en utvikling av landmålingsfaget over årtusener parallelt med utviklingen i andre vitenskaper som fysikk, matematikk, matematisk statistikk og astronomi. I nyere tid har utviklingen innen databehandling (informatikk) skapt utfordringer og muligheter for landmålerne.

Landmåleren arbeider med avanserte instrumenter. Det er instrumenter bygd med høy nøyaktighet og med den mest avanserte teknologi. Det brukes kikkerter til å måle vinkler og høydeforskjeller.

Etter siste verdenskrig er elektronisk avstandsmåling blitt vanlig. Kikkert kombinert med elektronisk avstandsmåler og datamaskin kalles en totalstasjon. En automatisert totalstasjon, som selv sikter seg inn på et prisme og foretar målingene, kalles en robotstasjon.

Landmålerne produserer koordinater i form av tall. Landmåling er samlebegrepet for oppmåling av jordoverflatens flate- og høydeforhold for gjengivelse i kartmessig fremstilling. Tradisjonell landmåling utføres ved hjelp av en teodolitt. Dette er et instrument som brukes til å måle eller avsette retninger og vinkler i et horisontalt og et vertikalt plan.

De første teodolittene ble tatt i bruk i begynnelsen av 1900-tallet. Teodolitten er et kikkertrør som kan dreies om horisontale og vertikale akser. Begge aksene er inndelt i vinkler som kan leses av i grader, minutter og sekunder.

I nyere tid har utviklingen innen databehandling og posisjonering med hjelp av GPS skapt nye muligheter for landmåling. Landmåleren mäter og beregner i vår tid posisjoner og høydeforskjeller ved hjelp av svært nøyaktige og avanserte instrumenter som teodolitt, totalstasjon og GPS. De første avstandsmålerne basert på infrarød laserstråle ble tatt i bruk i 1970. Disse kunne måle avstander opp til 3 km med centimeters nøyaktighet. Ulempen var at de var svært tunge. I 1978 ble de første teodolittene med elektronisk avlesning introdusert. Noen få år senere kom totalstasjonene på markedet. De kombinerte elektronisk avstandsmåling med elektronisk vinkelavlesning og lagring av data for videre behandling.

Etter 1990 ble det mulig å beregne nøyaktig posisjon på punkter i terrenget med GPS-mottakere. I dag er det vanlig å bruke slike mottakere i kombinasjon med totalstasjoner.

Landmåling benyttes vanligvis for objekter som krever hyppig oppdatering (eiendomsgrenser, bygninger, kummer), for detaljer som krever stor nøyaktighet, eller for oppmåling av små områder.



Klassisk teodolitt.  
Opphavsmann: [Wikipedia](#)



Landmåler i arbeid.  
Opphavsmann: [Flickr: bea2.0](#)

Galileo satellitter

Galileo-satellitter.  
ESA

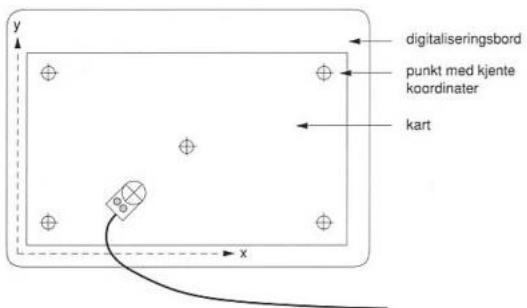
## Manuell digitalisering av eksisterende kartmat..

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Manuell digitalisering \(51735\)](#)

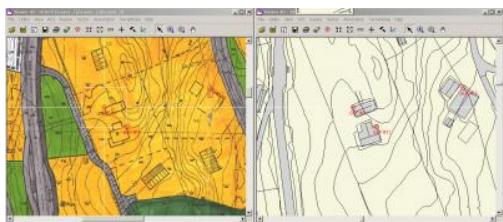
Et kart er ikke lenger bare et papir. Digitale kart blir mer og mer utbredt. Når vi har et digitalt kart, kan vi vise det på skjerm og knytte egenskaper til kartobjektene og gjøre kartet interaktivt. Da kan man f.eks. klikke på en by på kartet for å få fram en tabell som viser folketall og andre opplysninger.

Manuell digitalisering av kart egner seg bl.a. for kart og dokumenter som ikke kan skannes, originaler med stor informasjonsmengde (slike kart der skanneren vil ha problemer med å skille det ene objektet fra det andre) og for spesielle og uvanlige formater. Manuell digitalisering av eksisterende kart blir ofte benyttet som en rask og enkel måte å skaffe til veie et digitalt kart.



Digitaliseringsbord  
Opphavsmann: [Narom](#)

Digitaliseringen kan skje på digitaliseringsbord eller direkte på skjerm. Det siste forutsetter at kartet som skal digitaliseres, er skannet og georeferert. Ved bruk av et digitaliseringsbord har man en cursor eller markør. Markører består som regel av en lupe og et trådkors, samt funksjonstaster slik at enkelte kommandoer kan gis direkte uten å bruke tastaturet på datamaskinen. Størrelse og nøyaktighet for digitaliseringsbordet vurderes mot nøyaktighetskrav for digitaliseringen.



Innlegging av innpassningspunkter  
Opphavsmann: [Statens kartverk](#)

Før digitaliseringen starter, må det registreres innpassningspunkter som gjør det mulig å transformere (omforme) koordinatene fra digitaliseringsbordets koordinatsystem til terrenenkoordinater. Punktene må velges jevnt fordelt i ytterkant av kartet. Punktene må være klart definert, og en må kjenne terrenenkoordinatene. Det kan for eksempel være rutenettkryss, grensemerker og lignende. Kartkoordinatene taster inn sammen med digitalisering av fastpunktene. På dette grunnlag kan programmet bestemme transformasjonen og skrive ut en middelfeil. Dersom denne middelfeilen er for stor, gjentas prosessen. For to rettvinklede koordinatsystem er to punkt nødvendig for å bestemme transformasjonen. I tillegg må temakoder registreres for de ulike objekttypene, f.eks. ID-nummer for bygninger.

Krav til nøyaktighet avgjør antallet som må benyttes. For nøyaktig digitalisering kreves minimum 4 innpassningspunkter. Hvis man jobber på en kopi av et skannet kart, bør man imidlertid øke antallet til 6.

Selve registreringen av punkter kan foregå via ulike metoder.

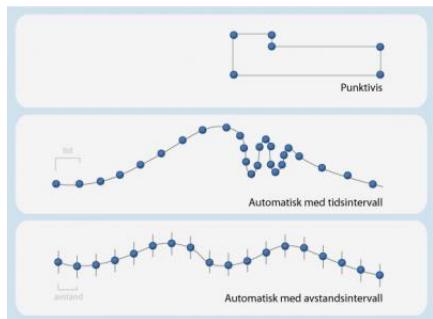
### a) Enkelpunktsregistrering

Punkter registreres ved å trykke på trådkorsholderen for hvert punkt. Denne type registrering passer best for enkeltstående punkter og for linjer som er sammensatt av mange mindre rette linjer, for eksempel eiendomsgrenser eller bygninger. En ulempe med metoden kan være en unødvendig stor datamengde dersom ikke parameter for registreringstetthet settes riktig.

### b) Sekvensregistrering

Punkter registreres fortløpende med et fast intervall, med en fast avstand eller ut fra kurvens krumning.

Under digitaliseringen er det vanlig å gi temakoder samt ulike andre kommandoer som lukking av polygoner og oppretting av rektangulære symboler. Den digitaliserte kurven bør skrives ut direkte på en grafisk skjerm slik at feil som oppdages under digitalisering, kan rettes. En slik visning på skjerm vil også gi en oversikt over hvilke deler av kartet som er digitalisert.



Ulike metoder for punktregistrering

Opphavsmann: [Amendor](#)

I forbindelse med digitalisering av vektordata, er det ofte ønskelig å redusere punktmengden, enten i forbindelse med digitaliseringen eller som en etter-prosessering. De fleste silingsmetodene prøver å finne et utvalg av det opprinnelige punktsettet som representerer mest mulig av den opprinnelige kurven, og fjerner punkter som representerer unødvendige data i forhold til kurvens hovedtrekk.

I prosessen med etterarbeid foregår det retting av feil og supplering av mangler og danning av topologi (beskrivelse av forhold mellom objekter).

Av fordelene ved manuell digitalisering kan nevnes enkel teknologi, billig utstyr og menneskelig tolkning. Av ulempene bør det tas med at metoden er arbeidskrevende, kan medføre tap av nøyaktighet samt mulighet for grove feil. Det finnes i dag programvare som foretar automatisk digitalisering.

# Skanning

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Skanning \(51736\)](#)

Skanning er en automatisk prosess. Punkter, linjer og areal, dvs. papirkartets bestanddeler, overføres til digitale rasterdata ved hjelp av skannerens lasersensor. Mens manuell digitalisering gir vektordata, gir digitalisering i skanner rasterdata.

Rasterdata gir oss kart bestående av et finmasket rutemønster. Rutene kalles piksler (engelsk: pixels = picture elements). Størrelsen på pikslene, det vi kaller oppløsningen, kan variere. Dersom oppløsningen blir for lav i forhold til kartets detaljer – det vil si for store piksler –, mistes mye informasjon.

Når laserhodet sveiper over originalkartet, registrerer laseren gråtoner. Laseren kan justeres til bare å registrere bestemte gråtoneverdier. Dette kan vi dra nytte av når det er aktuelt å digitalisere (skanne) et tema om gangen. Skanneren produserer raskt en stor mengde ukodede rasterdata. Rasterdata som skal nytties til analyser, må kodes. Det er også mulig å konvertere rasterdata til vektorform. Det finnes i dag dataprogrammer for automatisk vektorisering av skannet materiale.

Stående skannere brukes til ekstra store kart og kart som krever skanning med ekstra stor dybdeskaphet. Optikken gjør at en har større mulighet for å stille inn ønsket dybdeskaphet.



Skanning av kart.

Opphavsmann: Statens kartverk - Sjøkartverket

Dersom et folieseparert (de ulike temaene er fordelt på flere folier) analogt kart allerede finnes, er skanning langt raskere enn manuell digitalisering. Kartet leses automatisk inn i en datamaskin hvor det opprettes et rasterbilde av kartet. Dersom programvaren i tillegg har automatiske funksjoner for korrigering av feil, gjenkjenning av temaer o.l., kan et kart digitaliseres og korrigeres for feil flere ganger raskere enn ved manuell digitalisering. Mer intelligent programvare for mønstergjenkjenning av rasterkart vil sannsynligvis kunne redusere denne tiden ytterligere. Skanning er også aktuelt for digitalisering av analoge bilder, f.eks. flybilder.

Hurtighet, sammen med høy og stabil nøyaktighet, er klare fordeler ved å velge skanning som metode. Av ulemper kan nevnes lav "intelligens" i dataene. Metoden krever mye etterarbeid for å forbedre data og danne struktur.

Skanning passer best når

- \* kartet hovedsakelig består av linjer (for eksempel høydekurver, vannkontur)
- \* kartet har mange like symboler og få grafiske konflikter
- \* kartet er av høy kvalitet og linjer og symboler er tydelige

Det er fordelene ved manuell digitalisering som gjør at denne metoden fortsatt benyttes framfor automatisk skanning. Metoden kan benyttes med små investeringer i utstyr, den er lett å lære, og med moderne metoder for datakontroll og feilsjekking blir kvaliteten tilfredsstillende.

Dessuten er skannere som tilfredsstiller nøyaktighetskravene for kart, svært dyre. Slikt utstyr vil normalt bare finnes i større offentlige etater og større bedrifter.

# Fotogrammetri

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Fotogrammetri og ortofoto \(51737\)](#)

Flyfotografering har tradisjonelt vært utført med analogkamera (filmbasert), men siden 2004 er digitalkamera blitt mer aktuelle og er nå enerådende. Fotogrammetri er å måle i eller lage kart fra fotografiske bilder. Både fotografisk registrering, bildetolkning og bildetyding regnes som deler av fotogrammetrien.

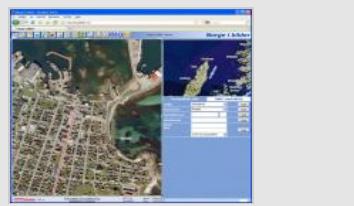
Flyfotografering er den viktigste datafangstmetoden for etablering og ajourhold av kartdata i Norge. Tilgang på ferske flybilder er helt avgjørende for kartlegging og oppdatering av kartdata.

Flybilder gir informasjon om store områder og er spesielt egnet for kartleggingsformål, f.eks. arealbrukskartlegging. De fleste objekter som er synlige i landskapet, kan tolkes ved å betrakte flybilder. For å få godt innsyn til bakken må fotografering skje før løvsprett. Løv på trærne vil i de fleste tilfeller redusere bildenes anvendelighet. Det kreves skyfrie eller tilnærmet skyfrie forhold, men et tynt slør av høye skyer kan også gi gode bilder. Det kan være vanskelig å trekke et nøyaktig skille mellom alle naturfenomener. Tolkning av detaljinformasjon i bildet krever stor erfaring og spesialkunnskap.

Digital fotogrammetri er i dag enerådende metode og digitale arbeidsstasjoner (DFA) er betegnelsen på datamaskiner med programvare hvor flere delprosesser er automatisert, samt gir muligheter for stereobetraktninger.

## Fotograferingen

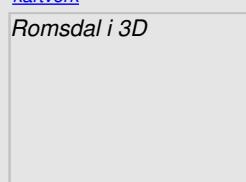
Flybilder er tatt med spesialkamera som peker rett ned mot bakken. Det gir en såkalt sentralprojeksjon av terrenget. Det vil medføre at f.eks. høydedrag og fjell langs kantene vil bli skjevt projisert i forhold til et kart. En bygning på toppen av et fjell vil virke større på bildet enn tilsvarende bygning nede i dalbunnen som er lenger fra kameraet. Et vertikalt flyfoto kan derfor ikke brukes til å måle på. Men ved hjelp av digitalt kart som referanse, kan detaljene i flybildet korrigeres slik at de kommer på riktig sted.



Flybilde, Andøy kommune  
Opphavsmann: [Statens Kartverk - Sjøkartverket](#)



Flyfotografering  
Opphavsmann: [Statens Kartverk](#)



Romsdal i 3D  
Verktøy for å presentere området og for å tegne turbeskrivelse. Modellen er basert på de siste flybildene over området.  
Nordveggen AS



Ortofoto, mosaikk  
Opphavsmann: [Statens Kartverk - Sjøkartverket](#)

Flyfoto som skal brukes til fotogrammetrisk arbeid, er alltid vertikalbilder. For å oppnå en stereoskopisk betrakning må samme område fotograferes fra to ulike posisjoner. Det er vanlig å fly stripér over området. For å unngå fortegning i bildene er det en fordel med størst mulig overlapp mellom tilliggende bilder. Dermed er det bare den midtre delen av hvert bilde som benyttes som en bit i den endelige bildemosaiikken.

Øverste bilde er et eksempel på god mosaikk av tre enkeltortofoto. Det er ikke mulig å se skjøtene mellom bildene. Nederst vises samme bilde med sømlinjene påført (røde streker)

Det er mulig å beregne koordinater i alle punkt i terrenget når man både kjenner til posisjonen til flyet og har orientert flybildene i forhold til hverandre. Kameraets posisjon bestemmes med 5 cm nøyaktighet ved hjelp av GPS (Global Positioning System) og treghetsnavigasjon i flyet. Det har redusert behovet for punkt med gitte koordinater på bakken. Programvare i en datamaskin i flyet sørger for registrering av posisjonsdata om samtlige eksponeringer.

Det er stadig forbedrede teknikker som benyttes ved kartlegging ved hjelp av flybilder. Ved hjelp av avansert programvare kan digitale terrengbilder etableres. Ved å behandle to og to bilder parvis får man en stereobetrakning. Det er dermed mulig å behandle dataene i 3D. Det aller meste av moderne kart eller geodata i Norge er produsert ved bruk av flyfotogrammetri, enten ved direkte fotogrammetrisk konstruksjon eller som avledd produkter. Dette inkluderer kart i alle målestokker, digitale terrengmodeller (DTM) og ortofoto.

## Ortofoto

Fra digitale flybilder kan det lages ortofoto som har samme geometri som kart, og som kan brukes som bakgrunn for kartinformasjon. Ortofoto er et fotografisk bilde av terrenget i riktig kartmålestokk. Det er fremstilt på grunnlag av en mengde vertikale flyfoto. Disse har gjennomgått en prosess med digitalisering, korrigering og sammensyning som gjør at bildene blir målriktige og stemmer med kartet. Ortofotoet er altså som et kart, men med fotografiets utrolige detaljrikdom. Ortofoto er et godt supplement til kart, men kan ikke regnes som en erstatning for kart.

Hvert år flyfotograferes store landarealer i Norge i regi av Geovekst-samarbeidet og Nasjonalt program for omløpsfotografering. Bildene gjøres tilgjengelig som vertikalbilder og ortofoto.

# Flybåren laserskanning

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Flybåren laserskanning \(58811\)](#)

Flybåren laserskanning er ikke noe nytt fenomen, men er likevel en lite kjent datafangstmetode for mange. Svenskene har drevet med flybåren laserskanning siden 1993, mens i Norge ble metoden benyttet første gang noen år senere. Flybåren laserskanning er også kjent som laseraltimetri og "airborne LIDAR".

Flybåren laser er en metode for innsamling av høydedata hvor grunnprinsippet er avstandsmåling fra fly eller helikopter ved bruk av laserpulser. Mens laserpulsene skyter mot bakken, sveiper laserstrålen frem og tilbake på tvers av flyretningen og registrerer punkter under og på siden av flyet.

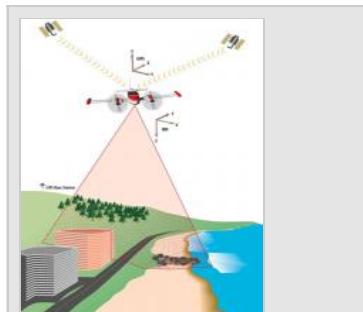
Ved treff på halvgjennomtrengelige eller oppstikkende objekter (f.eks. trær) vil det ofte bli returnert to pulser: éin fra toppen av objektet og én fra bakken under eller ved siden av objektet. De sistnevnte punktene kan brukes til å lage en overflatemodell som sammen med en terrengmodell, kan f.eks. benyttes til å beregne høyde og masse på trær/vegetasjon.

Laserpunktene kan klassifiseres i lag av typen bygninger, broer, vann, vegetasjon, kraftledninger osv.

Til forskjell fra flyfotografering kan laserskanning utføres uavhengig av solvinkel og sollys fordi laserskaneren er en aktiv skanner som skaper sin egen belysning av overflaten. Dette medfører at laserskanning i utgangspunktet kan utføres hele året og når som helst på døgnet. Det er likevel viktig å vurdere når på året det er ønskelig å fly med hensyn til vegetasjon og snø. Best gjennomtrengning til bakken vil oppnås før løvsprett.

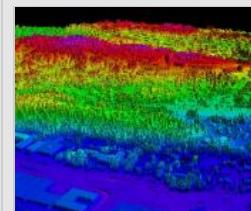
I den nasjonale Kart- og geodatastandarden er det gitt noen holdepunkter når det gjelder tidspunkt og meteorologiske forhold i forbindelse med laserskanning, planlegging og gjennomføring av laserskanning samt bearbeiding, feilsøking, klassifisering, egenkontroll og rapportering. Det er også stilt krav til kalibrering, bruk av tverrstriper og antall, plassering og størrelse av kjentpunkter og kontrollpunkter.

Hovedprinsippet ved flybåren laserskanner



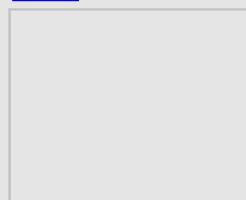
Prinsippet ved flybåren laserskanning

Opphavsmann: [BLOM Geomatics](#)



Laserpunkter på og over terrengoverflaten

Opphavsmann: [Statens kartverk](#)



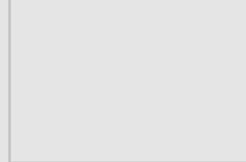
Laserpunkter kun på terrengoverflaten

Statens kartverk

Effekt av havstigning

Effekt av havstigning

Geodata AS



Laserdata fra en granskog.

Høydeverdiene er illustrert ved farger.

Blå indikerer bakken

og rød er treetopper.

Universitetet for

miljø- og

biovitenskap (UMB)

Instrumentet har en innebygd laseravstandsmåler som skanner over terrenget etter hver som flyet beveger seg framover. Skanneren måler avstanden fra laseren til terrenget overflaten med en gitt sveipebredde under flyet. Avstandene bestemmes ved å måle tiden det tar for lyset å nå terrenget og reflekteres tilbake. Dersom laserpulsen treffer halvgjennomtrengelige objekter, vil en kunne få flere retursignaler på én laserpuls, f.eks. der pulsen treffer trær og master.

Instrumentet observerer skannevinkel og avstand 33.000–100.000 ganger i sekundet. Avhengig av flyhøyden, flyhastigheten, sveipevinkelen, skannefrekvens, stripeoverlapp og hindringer (f.eks. vegetasjon) vil en få punkttetthet på terrenget i forhold til de krav som er stilt til ønsket bruksområde.

Posisjonering og orientering av instrumentet ivaretas ved hjelp av GPS/INS. INS (Internal Navigation System) holder orden på flyets posisjon ved at det beregner flyets rotasjoner og vinkler.

Når det gjelder prosessering av dataene så blir gjerne genererte kurver ofte mer "hakkete" enn ved flybilder. Det blir også store datamengder som stiller krav til hensiktsmessig programvare hos brukeren.

### Bruk av laserdata

Det viktigste produktet fra laserdata er høydeinformasjonen. Med dagens laserskannere kan en forvente en nøyaktighet i høyde på mellom 5 og 30 cm. Nøyaktigheten er bl.a. avhengig av flyhøyde og utstyret som brukes. Ved siden av å produsere terrengmodell og overflatemodell, er det mulig å produsere høydekurver, flomsonekart for elver, tredimensjonale bygninger, sol- og skyggestudier, forenklet arealbrukskart, skogtaksering, masseberegning, sjøkartlegging i grunt farvann og ledningskartlegging.

# Navigasjonssatellitter

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Navigasjonssatellitter \(56223\)](#)

Navigasjon går ut på å finne ut hvor på jordoverflaten du er, eller å finne veien fra der du står, til et annet punkt på jorda. Ordet "navigere" kommer fra latin *navis*, som betyr "skip", og *agere*, som betyr å "bevege seg framover". Når du har funnet ut hvor du er på denne kloden, sier vi at du har funnet din posisjon.

Det er ikke noe nytt at menneskene benytter verdensrommet for å finne ut hvor de befinner seg, eller for å bestemme retningene, det som vi også i dag kaller "himmelretningene". Det som er nytt de siste tiårene, er at vi bruker satellitter, kunstige himmellegemer som går i baner rundt jorda. Disse gir mye nøyaktigere informasjon enn sol og stjerner, og dessuten virker de uavhengig av været.

Stadig flere bruker GPS-mottakere for å bestemme hvor de er, men hvordan virker systemet? Hvordan er det mulig å bruke satellitter i verdensrommet som er over 20 000 km fra oss, og som beveger seg med en hastighet på nesten 4 kilometer i sekundet?

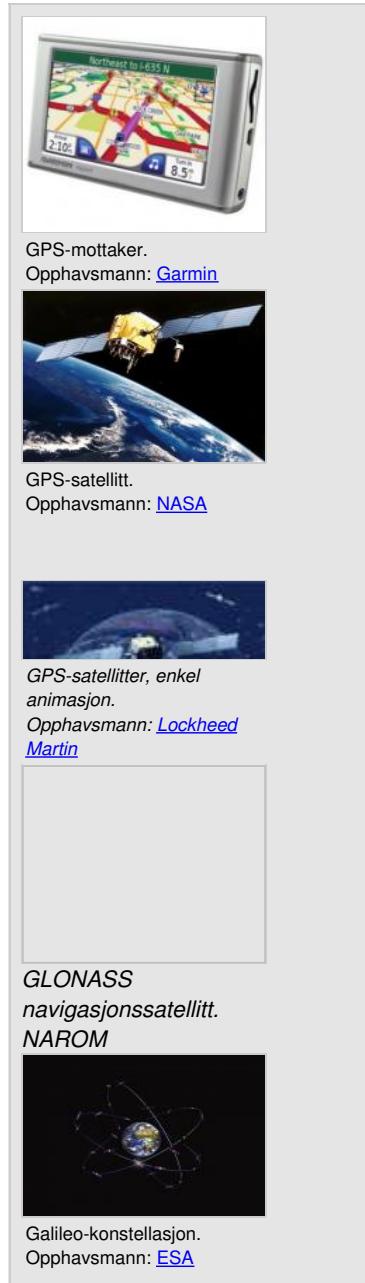
Med signaler fra bare tre satellitter over horisonten kan man ved hjelp av spesielle mottakere bestemme sin posisjon på jordoverflaten med en nøyaktighet på bare noen få meter. Klikk på bildet for å se en enkel animasjon som viser dette.

Fordi klokkene i satellittene og i mottakerne ikke går like nøyaktig, trenger man i praksis minst fire satellitter over horisonten for å bestemme posisjonen sin. Vanligvis får man inn signaler fra flere satellitter samtidig.

De signalene som satellittene sender til jorda, er omtrent av samme type som strålene i mikrobølgeovnen. De går tvers gjennom skyer både dag og natt. På bakken tar vi imot signalene i en GPS-mottaker.

Navigasjonssystemene GPS og GLONASS er militære og opprinnelig bygd for at undervannsbåter med rakter om bord skulle finne ut nøyaktig hvor på kloden de var. Men i dag er de militære navigasjonssatellittene blitt svært viktige også for sivilt bruk. Det gjelder skip, fritidsbåter, fly, oljeboringsplattformer til havs, og i biler og busser på veiene. Alle kan ha behov for å kjenne sin nøyaktige posisjon på denne kloden.

GPS-systemet



GPS-mottaker.  
Opphavsmann: [Garmin](#)



GPS-satellitt.  
Opphavsmann: [NASA](#)



GPS-satellitter, enkel  
animasjon.  
Opphavsmann: [Lockheed  
Martin](#)

GLONASS  
navigasjonssatellitt.  
NAROM



Galileo-konstellasjon.  
Opphavsmann: [ESA](#)

Det amerikanske militære navigasjonssystemet blir kalt GPS (av engelsk Global Positioning System) eller med betegnelsen NAVSTAR GPS, Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System. GPS består av 24 satellitter som går i 6 baner, 4 satellitter i hver bane. Systemet gir posisjonsnøyaktighet bedre enn 20 m.

### GLONASS-systemet

Russland har et tilsvarende navigasjonssystem. Det blir kalt GLONASS (av engelsk Global Orbiting Navigation Satellite System). GLONASS opereres av det russiske luftforsvaret for den russiske regjeringen. Systemet består av 24 satellitter som går i 3 baner, 8 satellitter i hver bane hvorav 7 er operative og 1 er reserve. Systemet gir posisjonsnøyaktighet bedre enn 55 m.

### Galileo-systemet

EU-kommisjonen har gått inn for å utvikle et europeisk satellittbasert system Galileo, for å gjøre seg mindre avhengige av GPS-systemet. Det europeiske systemet har fått navnet Galileo etter den italienske fysikeren og astronomen Galileo Galilei (1564–1642).

Initiativet til Galileo ble tatt av EU og ESA på midten av 90-tallet. Målet var å sikre et posisjonssystem under sivil kontroll, uavhengig av det amerikanske GPS-systemet. De teknologiske løsningene som ble valgt, gjør at de to systemene kan brukes sammen. Vanlige GPS-mottagere vil kunne motta Galileo-signaler. Det europeiske systemet blir dermed både samarbeidspartner og konkurrent til GPS. Det betyr i praksis at vi om noen år har et navigasjonssystem med langt bedre dekning enn i dag, fordi det vil være dobbelt så mange satellitter til posisjonsberegninger. Høye hus og dype skoger vil ikke lenger skygge for satellittsignalene.

Norge er et av de landene som kommer til å få størst nytte av Galileo. Vi har store land- og havområder der været veksler raskt. Behovet for nøyaktig navigasjon vil bare øke i årene som kommer, og alt ligger til rette for at satellittnavigasjon vil medføre både samfunnsnytte og industriell verdiskapning for Norge.

Galileo skal være operativt fra 2012–2013. Systemet vil bestå av 30 satellitter som går i 3 baner, 10 satellitter i hver bane hvorav 1 satellitt er reserve. Posisjonsnøyaktigheten vil være bedre enn GPS og GLONASS.

## Hva er EGNOS?

Forfatter: Birgit Strømsholm  
[Hva er EGNOS? \(56508\)](#)

I oktober 2009 ble kvaliteten og nøyaktigheten på GPS-signalene i Europa kraftig forbedret da den åpne tjenesten i EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ble operativ. EGNOS gjør nøyaktigheten bedre og informerer om feil i posisjonsmålingene. Innen seks sekunder vil EGNOS også varsle om det er noe feil på satellittsignalene.

Tre geostasjonære satellitter og et stort nettverk av bakkebaserte stasjoner sørger for å gjøre denne jobben. Det er den åpne delen av EGNOS-systemet som ble operativ i oktober 2009, og som får positive konsekvenser for både private og profesjonelle brukere av GPS.

De bakkebaserte jordstasjonene mottar og beregner nøyaktigheten til GPS- og GLONASS-signalene og beregner posisjonsavvik i henhold til blant annet atomurenes nøyaktighet og forstyrrelser i ionosfæren. Resultatene sendes tilbake til satellittene som i sin tur sender korrekjonene til alle mottakere som er utstyrt for EGNOS-mottaking. Resultatet er en posisjonsnøyaktighet på fra 1 til 5 meter.

### [EGNOS og geostasjonære satellitter](#)

EGNOS og geostasjonære satellitter  
Opphavsmann: [ESA](#)

### [Nytten av EGNOS](#)

Nytten av EGNOS  
Opphavsmann: [ESA](#)

Bedre sikkerhet

Mange småflyplasser har i dag frisiktslanding. Skal man lande i tåke, må man ha minimum 500 meter fri sikt. Med EGNOS i bruk holder det med 70 meter sikt. EGNOS gir også en stor sikkerhetsforbedring for helikoptere i Nordsjøen.

EGNOS-systemet styres fra EGNOS Service Provider (ESSP) i Tolouse i Frankrike. Basert på prosedyrene til ESSP vil hvert enkelt land gjennomføre sine egne sertifiseringer av lufthavner og lokale systemer. Her vil det norske Luftfartstilsynet stå sentralt. Norge har etablert fem EGNOS-stasjoner: tre på fastlandet, en på Jan Mayen og en på Svalbard. Sammen bidrar de til at navigasjonssikkerheten og GPS-ytelsen i våre nordområder blir mye bedre enn før.

EGNOS er fjerde systemet i verden som er skrudd sammen for å bedre GPS-signalene. USA har sitt WAAS-system som dekker Nord-Amerika. India har GAGAN som dekker India, og Japan har MSAS som dekker deler av Øst-Asia.

#### EGNOS, WAAS og MSAS

Dekningsområde for systemene EGNOS, WAAS og MSAS

Opphavsmann: [NAROM](#)

#### Brukes mange steder

Stadig flere sivile tjenester bruker GPS nå, også kritiske tjenester. Slike kritiske tjenester kan for eksempel være posisjonering av oljeplattformer, bøyelastere og forsyningsskip i Nordsjøen og innflyging for ambulansehelikoptere ved sykehusene.

Neste fase av EGNOS-utrullingen er minst like viktig, spesielt for luftfarten. Det som kalles "safety and life" er en sertifisert tjeneste ment for kritiske applikasjoner som for eksempel innflygingssystemer ved lufthavner. Denne delen av EGNOS står foran i underkant av et års tid med sertifisering og testing sentralt, før nasjonale myndigheter går i gang med sine sertifiseringer. Når alt er oppe og går, og norske lufthavner er sertifiserte for EGNOS-bruk, vil flysikkerheten i Norge bli enda bedre.

Systemet vil gjøre det mulig for både helikopterpiloter og flypiloter å lande sikkert under langt verre siktforhold enn i dag.

#### DGPS og korreksjonsteknikker

Nøyaktigheten i posisjonsberegninger med GPS, GLONASS og GALILEO forbedres med DGPS (Differential Global Positioning System) og korreksjonsteknikker. DGPS bruker faste bakkestasjoner med kjente posisjoner for å beregne korreksjonsdata. EGNOS er DGPS-basert.

I Norge leverer SATREF tjenester for posisjonering ned til cm-nivå. SATellittbasert REFERanse-system er Statens Kartverks nasjonale system for nøyaktig posisjonsbestemmelse basert på GPS (Global Positioning System). SATREF består av et nettverk av basestasjoner over hele landet, og et kontrollsenter.

SATREF leverer tjenester for forskjellige krav til nøyaktighet, MPOS for meters, DPOS for desimeters og CPOS for centimeters nøyaktighet. Tjenesten ETPOS består i etterbehandling av posisjonsdata for å forbedre nøyaktigheten ytterligere.



## Kart og kartografi

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Kartografi og kart \(61921\)](#)

Kartografi var fra gammelt av et håndverk. Å lage kart var nærmest en kunstart, og det kunne ligge et enormt arbeid bak å samle inn informasjon og måle opp slik at kartene ble mest mulig nøyaktig. Innføring av kart til digital form gir andre muligheter enn med vanlig papirkart.

# Kart og kartografi

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Oversikt over norske kartserier \(55836\)](#)

Allerede i oldtiden var det viktig å kunne tegne kart og måle terrenget for å beskrive landets topografi, fastsette grenseforhold eller reise større byggverk. Det eldste kjente kart er funnet i Irak og er fra ca. 3800 år f.Kr. Navigasjonskart ble utviklet som følge av de store oppdagelsesreisene på 1500-tallet.

Systematiske målearbeider for å lage landsomfattende kartverk i Norge kom sein i gang. Det finnes svært få kart fra tiden før Norges Militære Oppmaaling ble opprettet i 1773. De første kartene ble laget for militær anvendelse. Senere ble de sivile formålene dominerende, og Norges Militære Oppmaaling ble omdøpt til Norges Geografiske Oppmåling. I 1986 ble navnet Statens kartverk.

De fleste nasjoner har i dag sørget for landsdekkende kartverk i flere målestokker. Dette er gjort mulig gjennom en teknologisk utvikling som særlig skjøt fart i siste halvdel av det 20. århundre.



De vanligste målestokkene for offentlige kartserier i Norge er

- 1:1 000, tekniske kart
- 1:5 000, økonomiske kartverk
- 1:50 000, topografiske kart
- 1:250 000, topografiske kart

Økonomiske kartverk gir detaljer som for eksempel eiendomsgrenser, bygninger, kraftledninger og vekstforhold. Denne kartserien er viktig når nye veier og byggefelt skal planlegges. Kartserien Norge 1:50 000 egner seg i forbindelse med kommunalt planarbeid da serien beskriver bl.a. samferdsel, bebyggelse, vannsystem/myr og høydekurver. I tillegg produseres det en rekke temakart (spesialkart). Disse er ofte bygd på basiskartene, supplert med temainformasjon. Temakart er kart som fremhever ett eller noen få emner. Eksempler på temakart kan være sysselsetting i ulike næringer, valgresultater, værkart, veiadressekart eller beskrivelse av vegetasjon, bergarter, løsmasser eller dreneringsfelt. Andre detaljrike temakart er orienteringskart, turkart og veikart.

Geografisk informasjon, enten i form av trykte kart eller tegnet i datasystemer, er i dag viktige informasjonssystemer for planleggere, forvaltere, politikere og folk flest. Det er derfor behov for fagfolk til å drive med kartlegging, landmåling og registrering av naturressurser. Oljevirksomheten har også ført til økt etterspørsel av fagfolk innen kart og oppmåling.

Arbeidsplasser innen kart og oppmåling (geodatafag) finnes spredt over hele landet innenfor stat, fylke, kommune og i private firmaer. Innan landmåling består arbeidsoppgavene i å måle inn punkter i marken for overføring til kart ved hjelp av ulike instrumenter fra målebånd til avanserte elektroniske apparater. Landmåleren har viktige oppgaver ved bygging av broer og tunneler og ved måling av tomter og veier. I dag brukes satellittposisjonering (GPS) stadig mer innen landmåling. Satellittsignaler brukes til å beregne nøyaktige posisjoner. Kartkonstruksjon er et annet arbeidsområde i faget.

I dag lages de fleste kartene på grunnlag av flybilder. Overlappende bildepar i et såkalt stereoinstrument gir et tredimensjonalt bilde av terrenget der høydeforskjeller og bygninger kommer klart fram. Metoden kalles fotogrammetri. Nesten all kartkonstruksjon utføres digitalt, dvs. at kartet blir til data i en datamaskin i stedet for streker på et papir. Datainnsamling som skjer ved landmåling og fotogrammetri, må bearbeides for å gjøre kartet lettles og tiltalende. Disse arbeidsoppgavene utføres av GIS-operatøren, kartografen og karttegneren. GIS-operatøren betjener et databasert informasjonssystem og redigerer og strukturerer data som skal inn i systemet.

# Stedfesting og standarder

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Stedfesting og standarder \(55914\)](#)

Med utvikling av GIS-teknologien åpner det seg langt større anvendelsesmuligheter for presis stedfesting.

Men det er behov for standarder som gir anvisning på hvordan natur- og samfunnsgeografiske data skal kunne stedfestes ved bruk av direkte eller indirekte stedfestingsmetoder.

Hensikten med standarden er å anvise metoder som angir geografisk beliggenhet med nødvendig nøyaktighet, og samtidig unngå mistolkninger ved nasjonal og internasjonal utveksling av stedfestingsdata. Miljøverndepartementet har tillagt Statens Kartverk ansvar for standarder og regelverk innen fagområdet geografisk informasjon. Arbeidet er nært knyttet opp mot internasjonale standarder utviklet eller under utvikling i regi av ISO (den internasjonale standardiseringsorganisasjonen). Standardisering av geografisk informasjon foregår i ISO/TC 211 Geographic Information/Geomatics. Arbeidet for Statens Kartverk utgjør profiler, retningslinjer eller utfyllende spesifikasjoner til disse, tilpasset norske forhold.

Standarden tar sikte på å redegjøre for hvordan man skal gi objekter – og data om disse – en entydig geografisk tilknytting med tilstrekkelig nøyaktighet i stedfestingen. For dette legges det opp til bruk av to prinsipper. Det ene prinsippet er direkte stedfesting ved hjelp av koordinater der man enten refererer til et geografisk koordinatsystem knyttet til selve jordkroppen (geoiden) ved bruk av gradnett eller til et metrisk koordinatsystem knyttet til den kartprosjeksjon det arbeides i. I tillegg kan stedfestingen skje via et etablert, koordinatbærende referansesystem.

Det andre prinsippet er indirekte stedfesting ved henvisning uten koordinater, til et kjent, avgrenset område som man befinner seg innenfor (for eksempel kommunens navn) eller er knyttet til (for eksempel adresse). Dette prinsippet kalles også "etikettmetoden" da stedsnavnet brukes som en merkelapp på det området det refereres til.

Følgende elementer gir entydig koordinatangivelse for stedfesting på kart:

1. kartprosjeksjon
2. geodetisk, horisontalt datum
3. akse/sone
4. nordverdi (positiv retning mot nord), i meter
5. østverdi (positiv retning mot øst), i meter
6. høyde (positiv retning opp langs loddlinjen), i meter
7. geodetisk, vertikalt datum (vertikalt referansenivå)

For horisontale koordinater tas elementene 1–5 med. Hvis høyden 6) skal tas med, må også elementet 7) inkluderes.

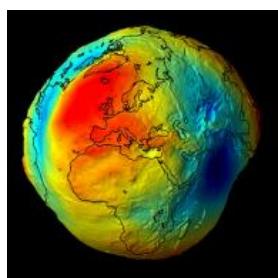
Det trigonometriske punktet på Galdhøpiggen vil kunne gis følgende referanser, dvs. koordinatangivelse, i forhold til elementene i oversikten nevnt over:

1. UTM
2. EUREF89
3. 32
4. N 6834090,35
5. E 0463645,30
6. HO 2468,49
7. NN1954

# Ellipsoide og geoide

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Ellipsoide og geoide \(55934\)](#)

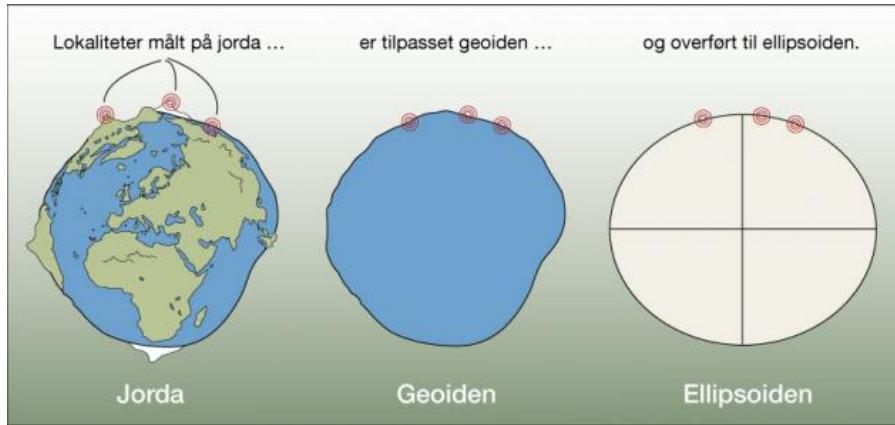


For at GPS-systemet skal kunne beregne en nøyaktig posisjon på jorda, må det ligge et rammeverk i bunnen som beskriver koordinater og referanser. Geodesi er vitenskapen som omhandler jordas form, gravitasjon og endring. Et geodetisk system er et rammeverk for å bestemme koordinater på jordas overflate i forhold til en referanseellipsoide og geoiden.

Geoiden er en tenkt flate med lik tyngdekraft overalt, en såkalt ekvigravitasjonsflate. Flaten dannes av verdenshavenes overflate og dens tenkte fortsettelse under landmassene. Dersom hele jordoverflaten var dekket med hav, og det ikke var bevegelse i havet eller atmosfæren, ville havoverflaten vært en ekvigravitasjonsflate.

Geoiden er grovt sett en ellipsoide, men med uregelmessige bulker. Grunnen er at massen under jordas overflate ikke har lik tetthet overalt. Dette fører til at gravitasjonskraftens størrelse ikke er lik i alle retninger fra jordas sentrum.

Geoiden er en fysisk flate som vi refererer høyder over havet til. I geodesi refererer en også høyder til en ellipsoide, som er den enkleste globale tilnærmingen til geoiden. I motsetning til geoiden er ellipsoiden en rent matematisk overflate, og har den fordelen at den er enklere å gjøre beregninger på. En ellipsoide defineres som en lukket, krum flate som av ethvert plan blir skåret i en ellipse. Denne ellipsoiden brukes som referanse for posisjonsberegninger. Den er en matematisk flate som representerer jorda. Ellipsoiden brukes fordi den er en matematisk figur med jevn overflate som er lett å håndtere, i motsetning til geoiden som blir påvirket av ulik tetthet i jordas indre. Ellipsoiden avviker ofte noe fra geoiden. Til nullnivå for høyder benyttes jordas gjennomsnittlige havnivå (geoiden).



Jorda, geoiden og ellipsoiden  
Opphavsmann: [Amendor AS](#)

Skissen over illustrerer hvordan forskjellene mellom geoide, ellipsoide og topografi kan være.

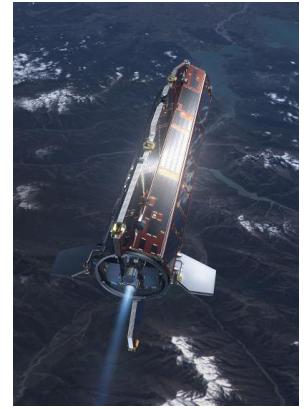
GPS-koordinater refereres til en bestemt ellipsoide med navnet WGS-84 (World Geodetic Survey 1984). Ønsker en å finne nøyaktig høyde over havet på en GPS-posisjon, er det nødvendig å kjenne til geoiden i området.

## Satellitten GOCE måler geoiden

The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer

(GOCE) er en forskningssatellitt som skal kartlegge jordas gravitasjonsfelt og sirkulasjonen i havet.

GOCE-satellitten kom i bane rundt jorda i mars 2009 og er finansiert av det europeiske romsenterets (ESAs) jordobservasjonsprogram. Målingene skal blant annet brukes for å fastsette formen på jordas geoide. Dataene som samles inn av GOCE, vil gi en nøyaktighet på 1 til 2 cm i geoidens høyde.



Satellitten GOCE måler geoiden  
Opphavsmann: [ESA](#)

# Kartprosjeksjon

Forfatter: Birgit Strømsholm

[Kartprosjeksjon \(55979\)](#)

Jorda er en ellipsoide (tilnærmet kuleform), og kartet er en plan flate. Ved hjelp av kartet er det mulig for brukeren å få terrenget på bordet eller dataskjermen. Kartet omtales som en plan, forminsket og grafisk avbildning av hele eller deler av jordoverflaten i en bestemt målestokk og prosjeksjon. Kartet er egentlig ikke et korrekt bilde av jorda, men en mulighet til å forestille seg hvordan virkeligheten ser ut.

For å få til en plan, forminsket avbildning av jordoverflaten må vi avbilde den krumme jordoverflaten på et plan. Dette gjøres ved å "projisere" den krumme overflaten til det plane kartet. Det finnes mange prosjeksjonsmetoder. Overflatene kan orienteres på ulike måter i forhold til hverandre, alt etter hvilke egenskaper en ønsker kartbildet skal få. Prosjeksjonsflaten kan enten tangere eller gjennomskjære jordoverflaten. Alle prosjeksjoner medfører feil av et eller annet slag, og feilen slår ut på areal, form, avstand eller retning. Feilen øker jo lengre vekk fra nullpunktet for prosjeksjonen kartobjektet er.

Aktuelle egenskaper ved prosjeksjoner:

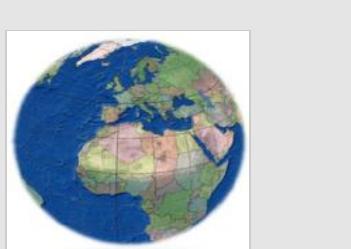
- Flateriktig: areal er korrekt
- Konform: formen på landområdene er korrekte dersom landområdene ikke er for store
- Ekvidistant: måling av avstander blir riktige
- Retningsriktig: måling av retninger blir korrekte
- Kompromiss: ingen bestemte egenskaper er korrekt. Forsøk på å minimalisere alle feil

## Planprosjeksjon

Planprosjeksjon eller asimutprosjeksjon (asimut = vinkel som linjen gjennom et punkt danner med meridianen gjennom punktet) fremkommer ved at en tenker seg et plan som tangerer jordkula i et bestemt punkt, og at jordas gradnett overføres til dette planet etter bestemte regler. Nøyaktigheten er størst ved tangeringspunktet. Slike kart er gjerne retningsriktige ut fra tangeringspunktet, ofte kartets sentrum.

Planprosjeksjonen eigner seg best til å framstille kart over polarområdene mellom  $60^{\circ}$  og  $90^{\circ}$  bredde. Vi får et plan som tangerer polpunktet og står vinkelrett på jordaksen. Meridianene stråler radialt ut fra tangeringssenteret, dvs. polpunktet. Paralleltsirklene avbildes som koncentriske sirkler. Planprosjeksjonen kan være vinkelriktig, flateriktig eller avstandsriktig avhengig av valgte regler for overføring av gradnettet til prosjeksjonsflaten.

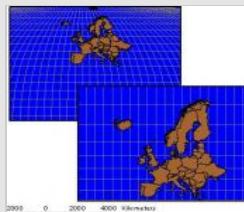
## Kjegleprosjeksjon (konisk prosjeksjon)



Klode

Opphavsmann: [Statens Kartverk](#)

Hvordan få kloden avtegnet på et flatt ark (PC-skjerm)?



Prosjeksjoner

Opphavsmann: [ESRI](#)

Begge kartene viser kart over Europa i samme målestokk, men ulik kartprosjeksjon gir ulik størrelse.



Planprosjeksjon

Opphavsmann: [Statens Kartverk](#)

*Planprosjeksjonen danner en plan flate som berører i ett punkt. Brukes oftest i polare områder.*

Ved kjegleprojeksjon tenkes jordas gradnett overført til en kjegle som tangerer jordkulen langs en sirkel. Den såkalte normale kjegleprojeksjonen framkommer ved at gradnettet tenkes overført til en kjegleflate som tangerer jorda langs en av parallellsirklene.

Kjeglens toppunkt vil da befinne seg i jordaksens forlengelse. Når kjegleflaten brettes ut til et plan, får man et kart der meridianene blir rette linjer som har økende innbyrdes avstand i retning mot ekvator. Breddesirklene blir konsentriske sirkelbuer. Også her vil det være størst nøyaktighet nær tangeringslinjen. Når kjeglen har to berøringslinjer, dvs. at den skjærer jordoverflaten, kalles det polygonisk projeksjon.

### Sylinderprojeksjon

Her tenkes gradnettet overført til en sylinder som tangerer jordoverflaten ved ekvator. Denne projeksjonen er velegnet til å gjengi landområder som strekker seg i øst–vest-retning langs ekvator. Dersom sylinderen tangerer langs en meridian eller en hvilken som helst storsirkel, kalles projeksjonen transversal sylinderprojeksjon. Kartene som lages i denne projeksjonen, har stor nøyaktighet nær berøringssirkelen.

Meridianene i en sylinderprojeksjon har lik avstand, mens avstanden mellom parallel-linjene øker mot polene. Polene kan ikke vises på grunn av de projiserte  $90^\circ$ .

Illustrasjonen over viser hvordan flate- og avstandsfeil øker proporsjonalt med avstanden fra sentralmeridianen (den røde vertikale linjen).

### Mercators transversale projeksjon

Den mest brukte kartprojeksjonen i Norge er Mercators transversale projeksjon, som også kalles Gauss' konforme sylinderprojeksjon. Mercatorprojeksjonen er en konform normal sylinderprojeksjon, dvs. at formen på landområdene er korrekte. Polene får ingen endelig avbildning i denne projeksjonen. Rutenettet er rektangulært, og meridianene har konstant avstand, mens avstanden mellom breddesirklene øker mot polene.

Flate- og avstandsfeil blir derfor større på høye bredder, for eksempel blir Grønland på  $80^\circ$  N urimelig forstørret ved bruk Mercatorprojeksjonen. Det kan virke som om Grønland har samme areal som Afrika, men er i virkeligheten bare  $1/15$  av Afrikas areal.

Mercators universale transversale projeksjon forkortes til UTM (Universal Transversal Mercator). UTM er en sylinderprojeksjon der projeksjonssylinderens akse går gjennom jordas sentrum og ekvatorplanet på en slik måte at tangeringslinjen er nærmest mulig området som skal kartlegges. UTM-systemet bygger på en egen projeksjon med tilhørende koordinatsystem. Vi snakker vanligvis om UTM-koordinatsystem og UTM-referansesystem.



## **UTM-koordinatsystem**

Forfatter: Birgit Strømsholm

[UTM-koordinatsystem \(56188\)](#)

For å gi posisjoner på ellipsoiden er det behov for et koordinatsystem. UTM-systemet bygger på en egen projeksjon med tilhørende koordinatsystem. Vi snakker vanligvis om UTM-koordinatsystem og UTM-referansesystem.

UTM-systemet er en projeksjon hvor koordinatene blir rettvinklede og med meterverdier. Det sier seg selv at siden jorda er rund, lar dette seg bare gjøre for lokale områder.

UTM (Universal Transverse Mercator) er en sylinderprojeksjon hvor sylinderen er i "transversal" stilling, dvs. en liggende sylinder. UTM benytter en sylinder som er litt mindre enn ellipsoiden, slik at den skjærer jordoverflata i en viss avstand fra sentralmeridianen. Rutenettet er rektangulært, og meridianene har konstant avstand, mens avstanden mellom breddegradssirklene øker mot polene. Flate og avstandsfeil blir derfor større på høye breddegrader. Området som sylinderen "skjærer" ut, kalles en sone.

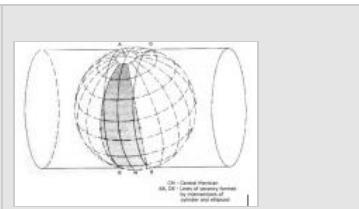
UTM-koordinatsystemet er jordoverflaten delt inn i 60 soner med tangeringsmeridianer på  $3^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $15^\circ$  osv., dvs. med  $6^\circ$  mellomrom. Hver sone har sitt eget koordinatsystem med origo på ekvator. Karakteristisk for en sone er dens sentralmeridian. For eksempel har sone 32  $9^\circ$  øst som sentralmeridian. Det vil si at UTM-sone 32 er best egnet som projeksjon ved kartlegging av områder mellom 6 grader og 12 grader øst.

$183^\circ$  øst i forhold til Greenwich-meridianen regnes som referanse i UTM-systemet. Dette er UTM sone 1. Norge dekkes av sonene 32–36. Sone 32 er utvidet til å ta med hele Sør-Norge fra Trondheim og sørover. Koordinatsystemet i UTM sonene har positiv X-akse nordover langs sentralmeridianen med verdi null for ekvator, og enheten er meter. I stedet for X er det vanlig å kalle denne verdien for "Northing". På den nordlige halvkule er X-verdiene null ved ekvator og øker nordover. På sørlige halvkule starter X-verdien på 10 000 000 ved ekvator og synker mot sør.

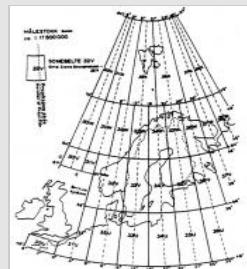
Y-aksen ligger langs ekvator, og verdien starter på 500 000 ved sentralmeridianen i hver sone. Dette er blitt gjort for å unngå negative koordinatverdier. I stedet for Y- kalles koordinatverdiene ofte for "Easting". Sentralmeridianen for sone 32 ligger på 9 lengdegrader. Denne har altså verdien 500 000, og går omtrent gjennom Notodden.

For å finne sin posisjon på et verdenskart må en vite om en befinner seg på sørlige eller nordlige halvkule, samt hvilken sone en befinner seg i.

I tillegg til soneinndeling opererer UTM-systemet med betegnelsen belter. Beltene som begrenses av parallellsirkler, har en bredde på  $8^\circ$  nord/sør. Beltene blir betegnet med bokstaver fra C til X fra sørmot nord (bokstavene I og O er utelatt). Sone 36 og belte W betegnes som sonebelte 36W.



UTM-  
projeksjon. Sylinderen  
skjærer jordoverflaten  
og danner en sone.  
Opphavsmann: [Narom](#)



UTM med soner og  
beltel.

Opphavsmann: [Narom](#)



UTM med soner og beltel i  
Europa

Opphavsmann: [Narom](#)



Globale UTM-soner og  
sonebelte

Opphavsmann: [Narom](#)

# Satellitteknikk

## Om satellitter - og hva de brukes til

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Om satellitter – og hva de brukes til \(23839\)](#)



Det var i 1957 at mennesket for første gang var i stand til å plassere en farkost, Sputnik, i en bane rundt jorda. Dette var en sensasjon som skapte stor oppmerksomhet om romfart i alle land. Senere har vi sett en serie fantastiske prosjekter, hvor månelandingen i 1969 kanskje var den mest spektakulære.

Det som kanskje har fått mindre oppmerksomhet, er utvikling av flere systemer som har fått stor betydning for dagliglivet vårt. Vi har fått systemer som knytter skip på alle hav til det globale telenettet, noe som hadde vært umulig uten bruk av romteknologi. Utveksling og kringkasting av TV-programmer er ressurskrevende når bare jordbundne distribusjonssystemer skal brukes, mens bruk av satellitter har gjort dette mulig i stor skala. Vi er i stand til å overvåke miljøtilstandene for jordkloden i sann tid, og spesielt betrakte jordkloden som et omfattende og komplisert system, uavhengige av nasjonale grenser. Værsatellitter varsler unormale værforhold, og dette sparar både liv og fysiske verdier. Satellitter i rommet gjør oss i stand til å bestemme posisjon over hele kloden med stor nøyaktighet, ved hjelp av rimelig, masseprodusert utstyr.

De store prosjektene innen romvirksomheten er tverrfaglige og krever kompetanse på mange områder, fra teknologi og fysikk til medisin og prosjektleddelse. Størrelsen på mange av disse prosjektene er slik at det er nødvendig med en internasjonal arbeidsdeling. Bæreraketten Ariane 5, for eksempel, er et fartøy som veier 750 tonn ved oppskyting. Deler utvikles og produseres i forskjellige land, også i Norge, og denne arbeidsdeling skaper allianser som også kan brukes i andre industrielle sammenhenger. Derfor er romteknologi viktig i alle land, ikke bare i de land som dominerer romvirksomheten på den internasjonale arenaen. I Norge er det et offentlig forvaltningsorgan, Norsk Romsenter, som ivaretar nasjonale interesser innen romindustri, romforskning og bruk av romteknologi. I Norges langtidsplan for romvirksomhet heter det:

**"Norge er i 2015 det landet i verden som har størst nytte av rommet."**



Envisat

# Historikk

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Historikk \(9612\)](#)



Interessen for verdensrommet, og spesielt for stjernehimmelen, har alltid eksistert. Kinesiske skrifter tyder på at Haleys komet ble observert der så lang tid tilbake som år 240 f.Kr. Rundt 1800-tallet kom de første fantasifulle fortellingene om erobring av verdensrommet. Et forslag var å skyte et prosjektil til månen ved hjelp av en stor kanon. Et annet var å reise til månen ved hjelp av et stoff som opphevet tyngdekraften.

I 1929 kom ei bok skrevet av Hermann Potocnik, se nedenfor, som diskuterte seriøst og realistisk muligheten for å plassere en bemannet stasjon i rommet, i geostasjonær bane. Men den publikasjonen som har fått mest å si, er Arthur C. Clarkes artikkel fra 1945, hvor han foreslår å bruke en satellitt (som han kalte en rocket station) i geostasjonær bane for kringkasting av TV. Men på det tidspunktet hadde ingen vært i stand til å sende en gjenstand ut i rommet. Det var heller ikke påvist at radiobølgene kunne gå gjennom ionosfæren.

Stjernehimmelen har gitt opphav til mange myter og eventyrlige forestillinger, men de viktigste praktiske anvendelsene den gang har vært navigasjon, bestemmelse av tid og sted, spesielt breddegrad.

## Jules Verne

Tanken på å reise i verdensrommet har naturlig nok vært noe fjern, men går vi to–tre hundreår tilbake, finner vi noen fantasifulle beretninger som vi i dag ville kalle science fiction. Den franske forfatteren Jules Verne skrev i 1865 ei bok om en tur til månen, i et prosjektil skutt opp med kanon. Kanonen ble kalt Columbiad, etter en stor amerikansk kanon konstruert i 1811. Den skulle være 274 meter lang, og diameter på løpet skulle være 3 meter. Til måneferden skulle det brukes en ladning på 181 tonn skytebomull. Prosjektillet skulle ha plass til passasjerer, men det er beregnet at akselerasjonen ved avfyring ville ha vært 100 g (se Begrep), og det ville ikke noen ha overlevd. Utskytingsstedet var Tampa, Florida, i samme staten hvor amerikanerne bortimot 100 år senere opprettet sitt romsenter Cape Canaveral.

## H.G. Wells

En lignende fantasifull historie ble presentert i 1901 av H.G. Wells, hvor han beskriver en annen metode for å komme til månen. Også dette var science fiction. Hans løsning var å bruke et spesielt stoff, cavoritt, oppfunnet av Dr. Cavor. Dette stoffet hadde den egenskapen at det sperret for tyngdekraften. En gjenstand innpakket i cavoritt ble vektløst, og da var det ikke noe problem å unnslippe jordas tyngdekraft.

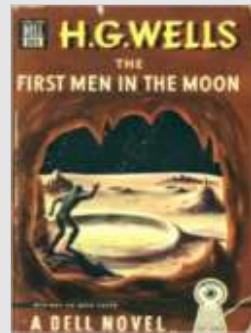
## Hermann Potocnik

Et tidlig forsøk på et teknologibasert prosjekt for å ta verdensrommet i bruk finner vi i ei bok forfattet av Herman Potocnik, en offiser i den østerriksk-ungarske hæren. Han skrev under pseudonymet Hermann Noordung. Boka ble utgitt i 1929 og beskriver en romstasjon i geostasjonær bane.



Columbiad  
Forfatter: [Public domain](#)

Reise til månen i eit prosjektil skutt ut fra en kjempestor kanon.



Wells  
Forfatter: [Public domain](#)



romstasjon, noordung,  
potocnik  
Forfatter: [Public domain](#)

Romstasjonen besto av tre moduler, "das Wohnrad", bolighjulet, kraftverket og observatoriet. Hovedfunksjonen for romstasjonen var jordobservasjon. Potocnik benyttet begrepet geostasjonær bane, og han gjorde det til et viktig poeng at stasjonen kunne være synlig hele dagen fra hele deknings-området.

Det store hjulet skulle rotere for å skape tyngdekraft. På toppen av hjulet skulle det være et hulspeil som skulle konstruere solstrålene mot en dampmaskin som skulle drive generatorene som produserte strøm. I denne boka analyserer forfatteren flere aktuelle problemstillinger, blant annet konstruksjon av en bærerakett for å plassere stasjonen i rommet.

### Arthur C. Clarke

Det er nå vel 60 år siden Arthur C. Clarke publiserte den berømte artikkelen i *Wireless World*, i oktober 1945, hvor han foreslo å plassere radiosendere i rommet. Arthur C. Clarke var ingenør, men han er for mange kanskje mer kjent som sciencefiction-forfatter. Han har skrevet over 40 bøker, og han ble blant annet Oscar-nominert, sammen med Stanley Kubrick, for manuskriptet til filmen *2001: En romodyssé*. Arthur C. Clarke var født i Somerset, England, 16. september 1917 og døde i Colombia, Sri Lanka, 19. mars 2008.

Bakgrunnen for forslaget hans var et reelt problem: Hvordan skal vi dekke store områder med TV-signaler? TV ble først satt i drift av BBC i London i november 1936, men noen utbygging i stor skala var ikke mulig før den andre verdenskrigen var over.

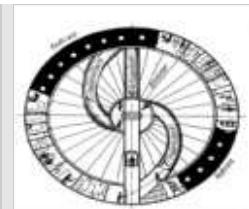
Med sin teknologiske bakgrunn visste Clarke at TV-signaler ikke kunne kringkastes via de sendersystemene som på den tid ble brukt for lydkringkasting. Båndbredden måtte være ca. 5 MHz, omrent 1000 ganger så mye som båndbredden for en radiokanal, og dermed ville ett enkelt TV-program kreve hele langbølgen, hele mellombølgen og en del av kortbølgen. Det var derfor nødvendig å gå til høyere frekvensbånd, VHF- og UHF-båndene, der det var bedre plass. Men problemet her var at radiosignalene med disse korte bølgene stort sett bare gikk i rette linjer og at en sender derfor bare ville dekke områdene innenfor fri sikt, slik vi kjenner det når det gjelder dekning for mobiltelefon.

Han så derfor etter nye muligheter. Han trengte et sendepunkt høyt oppe med fri sikt til et stort område, og han vendte seg mot rommet. I den berømte artikkelen sin foreslår han å plassere TV-senderne, reléstasjonene, eller rakettstasjonene som han kalte dem, i en bane rundt jorda.

Naturlovene for slike baner hadde vært kjent i noen hundre år, siden Keplers tid. Vi kan si det slik at bevegelsen av en planet rundt sola, eller en satellitt rundt jorda, er en balanse mellom tyngdekraften og sentripetalkraften. Øker vi baneradien vil omløpstida øke.

Banen skulle være en sirkel, den skulle ligge over ekvator, og satellitten skulle bevege seg østover, i samme retning som jorden roterte om sin egen akse, og med samme omdreiningstid, dvs. nøyaktig ett døgn. Dermed ville det fra jorden se ut som om stasjonen stod stille. Høyden over jorden ville da måtte bli ca. 36 000 km, tilsvarende en baneradius på 42 164 km. En enkelt radiosender i en slik bane ville dekke ca. 40 % av jordoverflaten.

I 1945, da denne artikkelen ble publisert, var det mange uløste teknologiske problemer. Man hadde ikke engang vært i stand til å sende en gjenstand i bane rundt jorda. Det ble først gjennomført i 1957, 12 år senere. Den første kommersielle kommunikasjonssatellitten i geostasjonære bane, Intelsat I, ble skutt opp den 6. april 1965, 20 år senere.



Romstasjon med  
bolighjul.  
Forfatter: [Public domain](#)



Arthur C Clarke

Arthur C. Clarke,  
(1917–2008).

# Ut i rommet

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Ut i rommet \(9615\)](#)



I 1957 skjedde det. Mennesket kunne for første gang sende en gjenstand ut i en bane rundt jorda. Dette ble begynnelsen på et enormt teknologisk og politisk kappløp. En drivkraft var å kunne utnytte satellitter til fredelige formål, ikke minst til kommunikasjon over store avstander, interkontinental kommunikasjon. Men bak dette lå også militære hensyn, utvikling av interkontinentale raketter som kunne bære kjernefysiske våpen.

## Den første satellitten

Det var et sjokk for den vestlige verden, og spesielt for USA, og det innledet en ny tidsepoke i menneskehets historie, da Sovjetunionen den 5. oktober 1957 for første gang i historien sendte en gjenstand i en bane rundt jorda. Denne første satellitten Sputnik (følgesvenn) hadde en masse på 83,6 kg og ble skutt opp fra Baikonur i Khasakstan. Omløpstiden var 98 minutter, og den sendte ut signaler på 20,005 MHz og 40,002 MHz. Det var mange radioamatører som kunne ta mot disse signalene, helt til 26. oktober da batteriene i satellitten var utladet.

Det var to viktige forhold som var med og startet et romkappløp mellom stormaktene Sovjetunionen og USA. Det ene var frykt knyttet til utvikling av kraftige raketter som kunne brukes til å levere kjernefysiske ladninger. Det andre var mangel på militære og sivile systemer for telekommunikasjon, spesielt for langdistanse-kommunikasjon. Den første transatlantiske kabelen for telefoni ble satt i drift i 1956, og den hadde en kapasitet på bare 36 telefonkanaler. Før den tid var man henvist til å bruke kortbølgetelefoni, som både har dårlig kapasitet og dårlig kvalitet.

## Menneske i rommet

Etter Sputnik kom en serie satellittprosjekter med blant annet oppskyting av det første levende vesenet i rommet, hunden Laika, den 3. november samme året. Det første mennesket i verdensrommet var Juri Gagarin, som ble sendt opp med Vostok 1 den 12. april 1961. Han besøkte Norge i 1964 og ble da tatt opp som medlem i NTH-studentenes flyklubb.



Sputnik / audio

<http://ndla.no/nb/node/23762>

Lytt til lyden fra  
Sputnik.



I september 1964 kom Juri Gagarin til Trondheim. Her er han sammen med Kjell Okkenhaug, som var forhandler av det sovjetiske bilmerket Volga.

Den første amerikaneren i rommet var John Glenn som gjorde tre omløp den 20. februar 1962 om bord i kapselen Friendship 7. Denne kapselen er utstilt i The Smithsonian Museum i Washington, og det som gjør sterkest inntrykk er hvor liten den var.

### Månelanding og romstasjon

Siden den tid har vi sett mange store bragder i rommet, ikke minst månelandingen i 1969, bare 12 år etter Sputnik! Mye av dagens romvirksomhet er knyttet til den internasjonale romstasjonen, som betegnes som det største og mest avanserte prosjekt i menneskehets historie. Det er 16 land som deltar, 11 medlemmer av ESA sammen med USA, Russland, Canada, Japan og Brasil. Den er bemannet med et mannskap på 3, men planen er å bygge den ut til en besetning på 7. Forsyninger til romstasjon transporteres med russiske bæreraketter og med den amerikanske romferga.



Apollo 16.

Opphavsmann: [NASA](#)



Den internasjonale romstasjonen, ISS.

Opphavsmann: [NASA](#)

### Nytte av romvirksomhet i dagliglivet

Det som har foregått i disse vel 50 årene siden Sputnik 1, er en imponerende utvikling på mange områder. Romvirksomheten har vært drivkraften som har ført til mye utvikling innen teknologi og vitenskap, telekommunikasjon, navigasjon, observasjon av mange forhold på jordkloden, og til økt kunnskap om verdensrommet. Det har også medført til økt kunnskap i andre fag som medisin og botanikk. Ikke minst har den gitt oss en mulighet til overvåkning av tilstanden for jordkloden fordi satellitter gjør det mulig å observere store områder samtidig, temperaturer og innhold av gass-komponenter som ozon og CO<sub>2</sub> i atmosfæren.

# Oppdrag og nyttelaster

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Oppdrag og nyttelaster \(9617\)](#)



Her er en kort oversikt over de viktigste anvendelsesområdene for satellitter i jordbane, nyttesatellitter eller "application satellites". Disse områdene blir behandlet mer detaljert senere. Det foregår også en stadig utvikling av nye anvendelser innenfor alle de områdene som er nevnt her. Dette gjelder ikke minst innsamling av data og overvåkning av jordkloden, både for registrering av den øyeblikkelige tilstanden og for bestemmelese av langtidsutvikling.

## Kommunikasjon og kringkasting via satellitt

Ionosfæren som ble brukt ved kortbølgekommunikasjon over lange avstander, hadde sterke begrensninger, ikke minst når det gjaldt båndbredde og pålitelighet. I 1960 ble det gjort forsøk med å bruke en ballong, Echo, som passiv reflektor i bane rundt jorda. Oppblåst i rommet hadde den en diameter på vel 30 meter, men som "kommunikasjonssatellitt" var den lite effektiv. Den gikk i lav bane og var samtidig synlig av sender og mottaker bare et kort tidsrom.

En milepel i utvikling av satellittkommunikasjon var da Telstar-satellitten i juli 1962 gjorde det mulig å overføre TV-signaler i sanntid mellom Europa og Amerika. Denne satellitten gikk i en bane med en omløpstid på 2 1/2 time, og den var samtidig synlig i 20 minutter fra de to kontinentene. Satellitten hadde lav sendeffekt, 14 watt, og antenner med liten direktivitet. For å kompensere for dette måtte antennene i jordstasjonene være store. Stasjonen i Pleumeur Bodot i Bretagne, Frankrike, var 60 meter høy og veide 340 tonn.

Den første kommersielle kommunikasjonssatellitten var Early Bird (Intelsat I) med en kapasitet på 240 telefonkanaler eller én TV-kanal. Dette ble starten på et system med geostasjonære satellitter, INTELSAT, som etter hvert knyttet over 200 land og territorier til det globale telenettet.

Nå har overføring og kringkasting av TV-programmet fått et stort omfang. Telenors kringkassingssatellitter overfører i dag over 250 TV-program og 70 radioprogram fra sin opplinkstasjon i Nittedal nord for Oslo. Stasjonen er utstyrt med mer enn 50 satellittantenner og de kan hente ned 800 TV-kanaler til norske husstander.

## Jordobservasjon

Plattformer i rommet er gode utgangspunkt for å observere jordkloden. Værsatellittene var de første et bredt publikum stiftet kontakt med, og innsamling av informasjon om tilstandene i atmosfæren har bidratt til å forbedre nøyaktigheten på værmeldingene. Det påstår at de økonomiske besparelsene ved pålitelige meldinger om de årlige tornadoene i USA er større enn kostnadene ved det amerikanske romprogrammet.

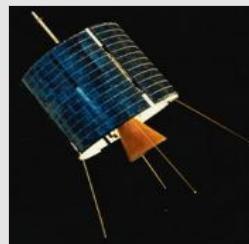
Mission to planet Earth



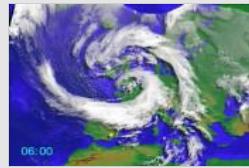
Echo- passiv reflektor  
Opphavsmann: [NASA](#)



Jordstasjon i Pleumeur Bodot



Intelsat 1  
Opphavsmann: [Public domain](#)



Meteosat  
Opphavsmann: [ESA](#)

"Ekspedisjon til planeten Jorden" er betegnelsen på et omfattende globalt overvåkningsprogram som ble startet i det internasjonale romåret 1992. Formålet var

- å opparbeide en forståelse av jorden som et system hvor mange deler spiller sammen, alle hav, alle deler av atmosfæren, polarkalottene, etc.
- å observere og karakterisere jordsystemet som system, med andre ord legge vekt på sammenhengen og samspillet mellom delene
- å skape forståelse av hva som er forandringer skapt av naturen og hva som skyldes menneskelige aktiviteter
- å bestemme og forutse virkningene av forandringerne på menneskelig helse og velferd
- å bidra til en klok politikk hvor de forskjellige tiltak blir gjort i tide

Radarsatellittene gjør det også mulig å observere i mørke og gjennom skyer, og den teknikken som brukes for å få høy oppløsning, kalles SAR (Synthetic Aperture Radar).

## Navigasjon

Romteknologi har også fått stor betydning for posisjons-bestemmelse på jordkloden. Her benyttes satellitter som beveger seg med en hastighet på ca 3,5 kilometer per sekund, over 20000 kilometer ute i rommet. De gir oss posisjonen med en nøyaktighet på noen meter når vi bruker små mottakere på størrelse med en lommekalkulator, til en pris av ca. tusen kroner. Etter hvert bygges GPS-mottakere inn i stadig flere apparater, som mobiltelefoner og kamera.

Det mest utbredte systemet er GPS (Global Positioning System). Sovjetunionen utviklet i sin tid et lignende system, Glonass, og et sivilt europeisk system av samme type, Galileo, er under utbygging.

## Observasjon av rommet

Jorda er omgitt av en atmosfære som blant annet beskytter oss mot stråling og bombardement av fysiske gjenstander fra det ytre verdensrommet. Men samtidig er atmosfæren et uklart vindu som hemmer oss når vi skal studere verdensrommet.

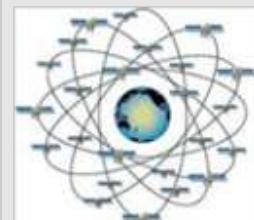
Et godt eksempel på en slik satellitt er Hubble-teleskopet som ble sendt opp 24. april 1990 til en bane med en høyde på 560 km. Det ble senere flere ganger utført vedlikehold og oppgraderinger på teleskopet, siste gang i mai 2009. Det har en diameter på 2,4 meter, og siden det er uavhengig av atmosfærisk absorpsjon kan det observerer både i det ultrafiolette, det synlige og det infrarøde spektret og dermed nå de ytre grensene for universet.

## Rommet som laboratorium

Tyngdekrafta virker inn på alle prosessene på jorda. Den benytter vi for å holde oss oppreist, den styrer hvilken vei planter skal vokse, og den sørger for mange andre biologiske, kjemiske og fysiske prosesser. Faktisk er den så sterkt involvert i så mange prosesser at vi ikke kan forestille oss hvordan prosessene hadde vært uten den. For å få vektløshet i lang tid, utover noen minutter, er det nødvendig å gå i bane rundt jorda.



GEO  
Opphavsmann: [NASA](#)



GPS konstellasjon



Bilde tatt av Hubble-teleskopet  
Opphavsmann: [NASA](#)



Stearinlys på jorda og i vektløs tilstand.

# Standarder for romvirksomhet

Forfatter: Gunnar Stette

[Standarder for romvirksomhet \(25000\)](#)



En standard er et dokument som definerer krav til bestemte egenskaper og funksjoner for komponenter og utstyr. Standarder er i seg selv ikke obligatoriske. Det er opp til en produsent av utstyr å bestemme om det skal følge en bestemt standard eller ikke, men hvis det kan møte kravene definert i en standard vil det ofte åpne et større marked.

For en bruker av utstyr betyr standardisering at det vil være flere alternative leverandører, og at det blir konkurranse om leveranser. For en leverandør betyr det at markedet for blir større, noe som kan gi masseproduksjon og lavere enhetskostnader. Dessuten er det lagt ned mye godt teknisk utviklingsarbeide i utarbeidelse av standardene, og dette kan både leverandører og brukere ha glede av.

## ECSS (EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION)

Formålet for organisasjonen er å utvikle et sett brukervennlige standarder til bruk for alle europeiske romaktivitetene. Den ble etablert høsten 1993, og Norsk Romsenter er medlem sammen med organisasjoner fra andre europeiske land og Canada, som er med på samarbeidet i ESA. Industrien er representert gjennom organisasjonen EUROSPACE. Sekretariatet er hos ESTEC, Noordwijk, Nederland, det tekniske senteret til ESA.

Standardene utarbeides innen tre forskjellige områder

- Ledelse av romprosjekter (Space project management)
- Kvalitetssikring (Space product assurance)
- Ingeniørvirksomhet (Space engineering)

Det er mulig å laste ned alle ECSS-standardene gratis, på formatet ISO image, som kan brennes direkte på en CD (465 MB). Per september 2009 omfatter dette 172 standarder på Word og pdf-format. Disse er også en verdifull kilde for informasjon.



Eksempel på standard:

CCDSS 131.0-B-1  
"TM Synchronization and channel coding", 69 sider.

This Recommendation contains specifications for synchronization and channel coding to be used by space missions on asynchronous communications links.



CCSDS

CCSDS

The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) ble etablert i 1982 av de ledende romorganisasjonene i verden, som NASA i USA, JAXA i Japan, FSA i Russland, INPE i Brasil og ESA i Europa. Det er også flere andre nasjonale romorganisasjoner som deltar som observatører. Det gjelder bl.a. Rymdbolaget i Sverige og Romforskningsinstituttet i Danmark. Dessuten er 100 industribedrifter tilknyttet. Formålet med organisasjonen er å diskutere felles problemer knyttet til utvikling og drift av systemer i rommet.



CEN  
Opphavsmann: [Public domain](#)



Organisasjonen har utviklet forskjellige typer dokumenter, standarder, anbefalte prosedyrer, informasjonsrapporter, rapporter med erfaringsdata for data og informasjonssystemer. Standardiseringsarbeidet vil redusere prosjektkostnadene ved at man unngår unødvendige duplisering ved konstruksjon og utvikling. Dette gjør det også enklere å oppnå interoperabilitet som gjør det mulig å dele på utstyr og drive felles installasjoner.

CENELEC

Standardene er fritt tilgjengelig på Internet, både de som er vedtatt og de som er under revisjon. Også disse standardene er viktige kilder for informasjon.



ETSI

### ETSI (the European Telecommunications Standards Institute)

Ved siden av standardene som er spesielt utviklet for romvirksomhet er det viktig å ta hensyn til de relevante standardene innen hvert fagområde. Når det gjelder telekommunikasjon og kringkasting er ETSI-standardene viktige. ETSI er en organisasjon med tekniske komiteer innen forskjellige fagområde. ETSI TC SES er den tekniske komiteen som arbeider med satellittsystemer (SES - Satellite Earth Stations and Systems). Den har utarbeidet standarder som er relevant for forskjellige systemer, som DVB-RCS, Return Channel Via Satellite. Komiteen har også utarbeidet standarder som brukes til regulatoriske myndigheter, og som blant annet setter grenser for uønsket utstråling og formen på antennediagrammer.

### Andre europeiske standardiseringsorganisasjoner

ETSI er en av de tre europeiske "anerkjente" standardiseringsorganisasjonene, som blant annet lager europeiske standarder (EN = European Norm) som brukes av myndighetene.

De to andre er **CEN (Comité Européen de Normalisation)** den europeiske standardiseringsorganisasjonen som produserer standarder for et bredt fagområde, og

**CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique)** som produserer standarder for generell elektroteknikk. Antall medlemsland er 30, og det er de nasjonale standardiseringsorganisasjonene som representerer de forskjellige landene.

# Romtransportsystemer

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Romtransportsystemer \(25599\)](#)

En kritisk og kostbar operasjon innen romvirksomhet er plassering av satellitter i rommet. Bildet viser noen av de forskjellige bærerakettsystemene som er brukt til oppskyting av store nyttelaster, både ubemannet og bemannet. Vi skal se på de grunnleggende funksjonene for bæreraketter og for mindre raketter, thrustere, som brukes til slike operasjoner i rommet, forandring baneparametre og forandring av orienteringen i rommet. Rakettligningen viser sammenhengen mellom hastighetsforandring, drivstoffforbruk og utstrømningshastighet for en rakett, men den gjelder strengt tatt bare i vakuum uten påvirkning av tyngdekraft. En spesielt kritisk fase er første del av oppskytingen, hvor tyngdekraften skal motvirkes og hvor hele systemet skal bevege seg gjennom atmosfæren.



Bæreraketter

Opphavsmann: [Public domain](#)

Bærerakettsystemer for transport av satellitter til rommet, til jordbaner eller til utforskning av andre elementer i solsystemet, er et så omfattende område at det faller langt utenfor rammen av dette faget. Teknologiutviklingen var også et viktig element i den kalde krigen, og det var et sjokk for verden og spesielt for amerikanerne at Sovjetunionen i sin tid kunne plassere en så tung satellitt som Sputnik i bane i 1957.

Sovjetunionen var tidlig ledende på raketteknologi. Proton, som først ble skutt opp i 1965 og som fremdeles er i bruk, kan plassere opp til 22 tonn i lav jordbane. USA utviklet sent på 1950-tallet en familie bæreraketter kalt ATLAS og de ventes å være i bruk til 2020. Men det var Saturn-raketter som brakte 24 astronauter til månen i tidsrommet 1968 til 1972. Saturn V ble brukt for den første måneferden i 1968. Den samlede massen for de tre hovedmodulene var nesten 44 tonn. Senere ble den amerikanske romferja utviklet, spesielt for transport av personale til og fra romstasjonen.

Nå er det mange land som tilbyr oppskyting av satellitter, som Kina, India og Ukraina. Det er også utviklet mange nye systemkonsepter, som blant annet omfatter oppskyting fra fly.

For å illustrere oppbygningen av bærerakettsystemer gis en kortfattet beskrivelse av den første bæreraketten ARIANE 1 som ble forløperen til den europeiske "arbeidshesten" ARIANE 4, som hadde 113 vellykkede oppskytinger i tidsrommet 1988 til 2003. Den nyeste europeiske bæreraketten er ARIANE 5, som har vært operativ siden siden 1997. En ny rakettversjon, VEGA, ble skutt opp for første gang den 13. februar 2012 og den er velegnet for mindre nyttelaster.

# Funksjoner

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Oppskyting av satellitter \(9582\)](#)



Raketter brukes til forskjellige formål innen romvirksomhet. På Andøya brukes raketter til utforskning av atmosfæren og ionosfæren. I dette kapittelet skal vi begrense oss til bæreraketter som brukes for å plassere satellitter i jordbane, og til rakettmotorer som brukes for å justere baneparametere og for å kontrollere pekeretningen for slike satellitter. Dagens teknologi er basert på bruk av flertrinnsraketter. Når vi ser bort fra den amerikanske romferga, er bæreraketene for engangsbruk, selv om det i visse tilfeller er mulig å gjenvinne deler av det første rakettrinnet.

Funksjonen for en slik bærerakett er å plassere en satellitt i en bestemt posisjon i rommet og med en bestemt hastighet i en bestemt retning. Raketter til slike formål er store og kostbare, og den lasten som kan avleveres i bane, er typisk 1 % av den totale massen som står på utskytingsrampen. Denne operasjonen er både risikofylt og kostbar, og den koster typisk 100 kroner per gram. Norsk industri er involvert i produksjon av store bæreraketter, Ariane 5, og deltok i oppbyggingen av et selskap som driver oppsending av satellitter fra en flytende plattform, Sea Launch.

Hva kreves for å plassere en satellitt i bane?

Fra banemekanikk vet vi at minste hastighet for å kunne fly i en bane rundt jorda er 7,9 km/s. Minstekravet til en bærerakett er å plassere nyttelasten i en tilstrekkelig stor høyde til at den unngår friksjon i atmosfæren, typisk 200 km. Da vil hastigheten i denne høyden være 7,8 km/s.

Hvis satellitten skal plasseres i en annen bane, for eksempel i en overføringsbane til geostasjonær, må hastigheten i 200 km høyde være høyere, 10,24 km/s. Da vil avstanden fra jordsentrum til perigeum bli 42 164 km, som er radien i den geostasjonære bane.

Hvis hastigheten i 200 km høyde er så stor som 11 km/s, den 2. kosmiske hastighet, vil banen bli elliptisk med uendelig lang halvakse. Det tilsvarer en bane i en parabel, som er en åpen kurve, og den kommer ikke tilbake.

Utskytingssteder

## Fakta om Ariane 5

(kilde CNES)

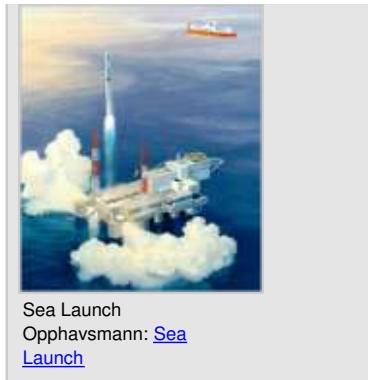
- 1 minutt etter lift-off beveger 500 tonn seg raskere enn en geværkule.
- 2 minutter etter lift-off er hastigheten 7200 km/time.
- Motoreffekten ved lift-off er 17 GW, tilsvarende 100 altakraftverk.
- Pumpene for flytende hydrogen har en kapasitet tilsvarende 20 badekar per sekund.
- Over en avstand på 40 cm varierer temperaturen fra -250° til 3000°.
- 1 kg flytende hydrogen har et volum på 14 dm<sup>3</sup>.
- Tankvolumet tilsvarer et 25 meters svømmebasseng.



Kourou i fransk Guyana er oppskytingssted for de europeiske bæreraketene.  
Opphavsmann: [ESA](#)

For plassering av en satellitt i geostasjonær bane er det gunstig med oppskyting fra et punkt nær ekvator. USA har sitt viktigste utskytingssted på **Cape Canaveral**, som ligger på 23 grader nord. Det betyr at en satellitt som skytes opp derfra, vil gå inn i en bane med en inklinasjon som senere må fjernes, og det koster drivstoff.

Sovjetunionen hadde sin hovedbase i **Baikonour**, Khasakstan, som ligger enda lenger mot nord, 45 grader, og det gir en enda større, uønsket inklinasjon.



Sea Launch  
Opphavsmann: [Sea Launch](#)

Europa benytter **Kourou** i Fransk Guyana, som ligger på bare 5 grader nord. Stedet er også velegnet fordi det har utskyting mot øst over sjø, Atlanterhavet. Ved oppskyting må rakettene overvåkes kontinuerlig. Dette er gjort mulig ved å etablere stasjoner i Natal, Brasil, på Asorene og i Libreville, Gabon i Afrika. Ved oppskyting av en stor rakett vil det falle ned forskjellige deler, som utbrente rakettrinn, og det kan skje funksjonseringsfeil som krever at raketten sprenges. Det er derfor viktig å kunne skyte over et område med liten risiko for skade.

Fra Kourou er det også mulig å skyte over sjøen mot nord ved plassering av satellitter i polbaner. Ved en slik oppskyting er det mulig at enkelte rakettrinn vil falle ned så langt unna som i området ved Nordpolen.

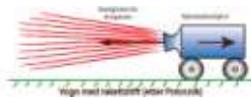
Et interessant system for oppskyting av satellitter er **Sea Launch**, hvor raketten skytes fra en tidligere oljeplattform, bygget av Kværner, som plasseres i Stillehavet, nær ekvator.

Kina driver også kommersiell oppskyting av satellitter med sine Long March-raketter, og de har fire forskjellige oppskytingssteder.

# Rakettligningen

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Rakettligningen \(9583\)](#)



Grunnlaget for rakter er Newtons 3. lov. Den sier at kraft er lik motkraft. Det vil si at når vi bruker en kraft for å akselerere en masse, vil det gi en nøyaktig like stor motkraft. Hvordan kan vi beregne rakettsytelsen? Det er flere fysiske betraktningsmåter vi kan bruke for å forstå prinsippet for en rakettmotor. Vi kan analysere bevegelsen av en raket ved å betrakte bevegelsesmengden, som er produktet av masse og hastighet. I rommet, når vi kan se bort fra både tyngdekraft og friksjon i atmosfæren, er en raket ikke påvirket av ytre krefter. Da vil den totale bevegelsesmengden være konstant. En slik forenklet betraktnign gjelder ikke ved oppskyting av en satellitt fra bakken, eller oppskyting av en raket fra et Andøya Raketttskytefelt hvor den beveger seg gjennom forskjellige lag i atmosfæren.

## Rakettligningen

Bevegelsesemengde  $p$  for en masse  $m$  og med hastighet  $v$  er gitt av

$$p = m \cdot v$$

Hvis det ikke er ytre krefter som påvirker massen, så vil bevegelsesemengden være uforandret, og fravær av ytre krefter er typisk for en satellitt i verdensrommet utenfor atmosfæren.

Prinsippet om bevaring av bevegelsesemengde ved fravær av ytre krefter kan vises ved hjelp av de to jernbanevognene som skyves fra hverandre når du klikker to ganger på den lille teksten under figuren. Bevegelsesmengden for hver vogn forandrer seg, men den totale bevegelsesemengde er uforandret av separasjonen.



Bevegelsesmoment / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/97936>

Når massen for vogn 1 er 10 ganger så stor som massen for vogn 2, vil hastighetene for de to vognene være forskjellig med en faktor på 10

$$20 \cdot (-v_1) + 2 \cdot (v_2) = 0$$

Rakettligningen kan utledes ved å betrakte den hastighetsøkningen som kan oppnås ved å skyte ut et lite prosjektil med en viss hastighet  $v_d$ . Hvis vi erstatter det ene prosjektillet med en kulestrøm fra et maskinvær, eller med en strøm gasspartikler fra en rakettmotor, vil massen stadig minke og hastigheten stadig øke. De blir variable funksjoner av tiden,  $m(t)$  og  $v(t)$ .

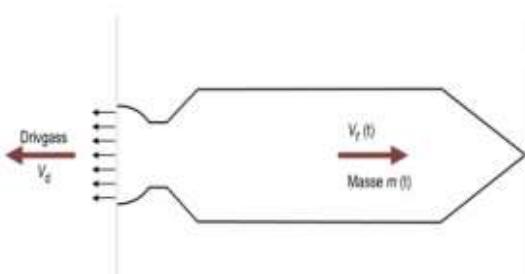
Rakettligningen kan skrives på to former. Den ene angir den hastighetsøkning  $\Delta v$  som oppnås ved bruk av en viss drivstoffmasse  $m_d$  når massen etter rakettavfyringen er  $m_0$ .

$$\Delta v = v_d \cdot \log \frac{m_d + m_0}{m_0}$$

Uttrykket viser at hastighetsøkningen er proporsjonal drivgasshastigheten, mens økningen som funksjon av drivstoffmengden må være lavere fordi uttrykket for  $m_d$  inngår i en logaritmefunksjon.

Den andre formen viser den drivstoffmengden  $m_d$  som kreves for en gitt hastighetsøkning  $\Delta v$ .

$$m_d = m_0 \cdot \left( e^{\frac{\Delta v}{v_d}} - 1 \right)$$



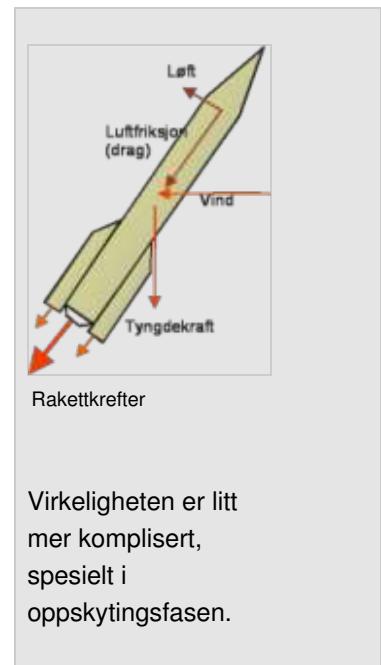
Modell av rakettmotor.

Figuren viser prinsippet for en rakettmotor som arbeider i vakuum. I bakoverretning gis drivgassen en hastighetsforandring  $v_d$  som er karakteristisk for det drivstoffet som brukes, typisk 3 km per sekund. I foroverretning vil raketthylsteret med gjenværende drivstoffmasse  $m(t)$  akselereres. Vi tar utgangspunkt i

$$\begin{aligned} dv &= -v_d \cdot \frac{dm}{m} \\ dv \cdot m &= -v_d \cdot dm \\ m(t) \cdot \frac{dv}{dt} &= -v_d \cdot \frac{dm}{dt} \end{aligned}$$

Her er

- $m(t)$  = massen for raketthylster pluss gjenværende drivstoff ved tidspunkt t
- $dm/dt$  = forbrent drivstoffmengde per sekund, som er lik massen for utstrømmende drivgass per sekund. For en stor rakett dreier dette seg om flere tonn drivstoff per sekund.
- $v_d$  = utstrømningshastigheten for drivgassen i meter per sekund. Typiske tall kan være noen km per sekund.
- $dv/dt$  = akselerasjonen for raketthylster pluss gjenværende brensel. Ved bemannede flukter må dette være innenfor det området som den menneskelige organisme kan tåle, noen få ganger tyngdeakselerasjonen g (se Begrep). De raketene som benyttes til utforskning av ionosfæren, kan ha mye høyere akselerasjon, ofte over 100 g.



Virkeligheten er litt mer komplisert, spesielt i oppskytingsfasen.

## Spesifikk impuls

Vi kunne karakterisere rakettdrivstoffet ved hjelp av utslipphastigheten  $v_d$ . Det er imidlertid mer vanlig å bruke parameteren spesifikk impuls, Isp. Den er definert som

$$\text{I}_{\text{sp}} = \frac{v_d}{g_0}$$

$g_0$  er tyngdeakselerasjonen ved havoverflata,  $9,80665 \text{ m/s}^2$ . Enheten for spesifikk impuls blir dermed sekund. En utstrømningshastighet på 3 km/s tilsvarer en spesifikk impuls på ca. 306 s.

Den spesifikke impulsen gir uttrykk for forholdet mellom den kraft som rakettmotoren gir, og drivstoffmengde som strømmer ut hvert sekund. Kraften er i Newton, og drivstoffforbruk per tidsenhet er kg/s. Det betyr at enheten for spesifikk impuls blir sekund.

Denne enheten var praktisk for sammenligning av ytelsen for amerikanske og russiske rakter. Amerikanerne opererte med pund kraft mens russerne benyttet enheten kg. Enheten sekund var derimot felles, og det lettet sammenligning av rakettytelser på begge sider av Atlanteren.

# Rakettdrivstoff

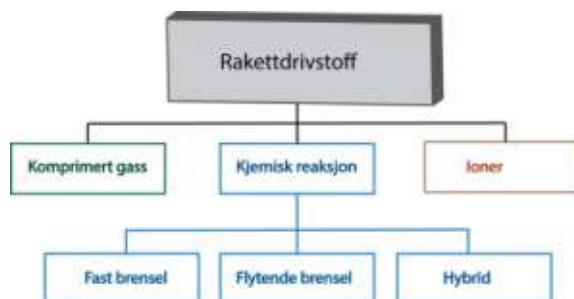
Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Rakettdrivstoff og rakettmotorer \(9584\)](#)

Rakettpriinsippet går ut på at utstrømming av masse gir en skyvkraft, og denne kraften er proporsjonal med produktet av hastigheten og masse per tidsenhet. Kravet til rakettordivstoffsset er likevel meget forskjellig avhengig av anvendelsen. Ved oppskyting gjennom atmosfæren og under påvirkning av tyngdekraft kreves et drivstoff med stor hastighet og stor drivstoffmasse per tidsenhet.

Ved flukt utenfor atmosfæren kreves drivstoff med stor hastighet, og til bruk i rakettmotorer for banekorreksjon og lignende er det også viktig at rakettordivstoffsset har gode kjemiske og fysiske egenskaper som gjør det lett å håndtere.

Prinsippet for rakettmotorer at masse sendes ut med en viss hastighet, og det finnes flere typer drivstoff og prinsipper for å akselerere den massen som sendes ut, som vist på figuren.



Rakettpriinsipp

Komprimert gass  
Isp = 75 s  
Fast brennstoff  
Isp = 210–290

- Komprimert gass

Et mulig drivstoff kunne være komprimert eller nedkjølt gass, for eksempel flytende nitrogen, men den ville gi lav effektivitet eller virkningsgrad.

- Kjemiske rakter

De fleste raketene for plassering av satellitter i bane bruker drivgass som resulterer fra en forbrenning, da dette gir stor utstrømningshastighet. Vi kan skjelne mellom tre typer, fast brensel, flytende brensel, og en tredje type, hybrid, som bruker en kombinasjon av drivstoff i fast og flytende form. Typisk utstrømningshastighet er noen km per sekund.

- Elektriske rakettmotorer

Den såkalte ionemotoren sender ut ladde partikler, ioner, som akselereres i elektriske felt og ionene kan få meget høye hastigheter, flere titalls km per sekund. Det betyr at for en gitt ytelse kan massen være tilsvarende mindre.

## Komprimert gass

Et mulig drivstoff kunne være komprimert eller nedkjølt gass, for eksempel flytende nitrogen, men den ville gi lav effektivitet eller virkningsgrad. **Spesifikk impuls** for kryogenisk (flytende) nitrogen er så lav som **75 s**, men et slikt drivstoff kan være hensiktsmessig i visse tilfeller.

## Kjemiske rakter

De fleste rakettene for plassering av satellitter i bane bruker drivgass som resulterer fra en forbrenning, da dette gir stor utstrømningshastighet. Dette kalles kjemisk brennstoff. Vi kan skjelne mellom fast og flytende drivstoff:

## Fast drivstoff

Det tradisjonelle drivstoffet for raketts, brukt i Kina for mange tusen år siden, er krutt. Prinsippet er at når dette drivstoffet brenner, vil gassene strømme ut med stor hastigheter. Rakettmotorer med fast brensel er i mye bruk også i dag til forskjellige formål.

I en faststøffmotor består drivstoffet av tre hovedkomponenter, selve brennstoffet, en oksidator som er nødvendig for at brennstoffet skal brenne uten ekstern tilførsel av oksygen, og et bindemiddel som holder det hele sammen.

Drivstoffet kan være det som eksperter kaller karboksyd- eller hydroksyd-terminert polybutadien med en tilsats av aluminiumspulver. Ikke-eksperter ville kanskje kalle det krutt. Den mest anvendte oksidatoren er ammoniumperklorat ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ). Bindemiddelet er oftest en polymer som gir drivstoffet en gummikonsistens. Faststøffmotoren startes vanligvis ved hjelp av pyrotekniske tennere. Det er enheter som gir en gnist eller en sterk lokal oppvarming ved hjelp av elektrisk strøm som slås på ved hjelp av fjernkontroll. **Spesifikk impuls** er i området **210–290 s**.

Fordelen med faststøffmotoren er enkel konstruksjon, stor skyvekraft og god pålitelighet. Ulempen er at motorene brenner til drivstoffet er oppbrukt. De kan ikke stoppes og startes igjen. Drivstoffet begynner å brenne fra sentrum, og brennprofilen er bestemt av utformingen av brennkammeret med drivstoff. Slike motorer ble mye brukt som apogeummotorer, og de sitter da sentralt montert i plattformstrukturen. På grunn av varmeutviklingen i rakettmotoren var god termisk isolasjon viktig for å beskytte de andre delene av satellitten.

Faststøffmotorer brukes også mye som "påhengsmotorer" til bruk i startfasen for store raketts. Ariane og Romferga får hjelp mens drivstofftankene er fulle og tyngdekraften er stor i forhold til skyvkraften på hovedmotoren. Faststøffrakettene på Romferga er de største som noen sinne har fløyet. De har hver 499 tonn fast drivstoff og gir en skyvkraft på 15 000 tonn (14 680 000 Newton).

## Flytende drivstoff

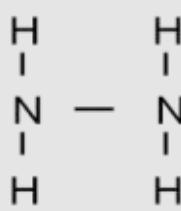
Det er to hovedtyper flytende drivstoff. Når brennstoff og oksidator oppbevares i samme tank, kaller vi det enkomponentdrivstoff. Når de oppbevares i separate tanker, kaller vi det tokomponentdrivstoff.

Det mest brukte enkomponentdrivstoffet er **hydrasin**,  $\text{N}_2\text{H}_4$ , og figuren viser en rakettmotor for slikt brennstoff. Gassen ledes over en katalysator av platina som starter den kjemiske prosessen. Hydrasinet spaltes da i tre gasskomponenter,  $\text{N}_2\text{H}_4$ -molekylene gir  $\text{NH}_3$ -,  $\text{N}_2$ - og  $\text{H}_2$ -gasser. Temperaturen i utstrømmingen går opp til ca. 1000 grader C. Typisk **spesifikk impuls for hydrasin** er **220–250 s**.

Den kjemiske strukturen for hydrasin er vist på figuren. Vi ser her at 4 hydrogenatomer er bundet til 2 nitrogenatomer. To andre beslektede stoff som brukes mye som rakettdrivstoff, er også vist. Det ene er monometyl-hydrazin, MMH, hvor det ene hydrogen-atomet er erstattet med en  $\text{CH}_3$ -kombinasjon. Det andre er ikke-symmetrisk dimetyl-hydrazin, UDMH, hvor to hydrogenatomer er erstattet av  $\text{CH}_3$ -kombinasjoner.

### Hydrasin

$I_{sp} = 220 - 250 \text{ s}$



Hydrasin  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

De to siste, MMH og UDMH, er tokomponentdrivstoff og mye brukt i store rakettmotorer. Som oksidator brukes ofte nitrogen tetroksid,  $N_2O_4$ , eller nitrogensyre (nitric acid),  $HNO_3$ . Disse drivstoffene er hypergoliske. Det vil si at de tenner spontant når brennstoff og oksidator kommer i kontakt med hverandre.

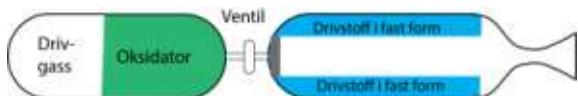
Drivstoff og oksidator pumpes inn med stor fart. For å drive turbo-pumpene kreves en kraftig motor, og den drives også med tilsvarende brennstoff. Pumpeprosessen startes med en liten rakettmotor som startes elektrisk. Viking-motoren, som brukes på Ariane forbrenner vel 200 kg drivstoff per sekund, og det er en stor teknologisk utfordring å konstruere pumper for flytende gass med så lave temperaturer og med så stor kapasitet.

En kombinasjon av **flytende oksygen og hydrogen** er et effektivt brennstoff som blir mye brukt i store rakter, men det er ikke enkelt å håndtere fordi disse gassene må holdes ved så lave temperaturer,  $-183^{\circ}\text{C}$  for oksygen og  $-253^{\circ}\text{C}$  for hydrogen.

En annen ulempe er lav egenvekt for disse gassene i flytende form, og det betyr at det trengs store drivstofftanker for å ta med en viss drivstoffmasse. For flytende hydrogen er den ca.  $0,15 \text{ kg/dm}^3$ , og det trengs en 6-literstank for hvert kg flytende oksygendrivstoff. Likevel brukes de mye blant annet i hovedmotoren for romferja og i tredjetrinnet for Ariane-raketten. Den **spesifikke impulsen** er **440 s**.

## Hybridraketter

En hybridraket har en motor hvor det to hovedkomponentene drivstoff og oksidator, er i forskjellig fase. Det kan være drivstoff i fast form og oksidator i flyende form eller gassform. Figuren viser en enkel prinsippskisse av en hybridmotor.



Hybridraket

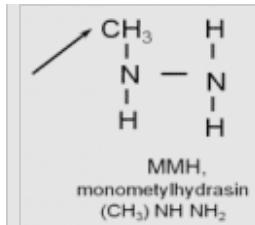
Når raketten avfyrer sendes oksidator, oksygen  $O_2$  eller lystgass,  $N_2O$ , i gassform inn i brennkammeret og forbrenningen startes. Sylinderen med fast brennstoff vil dermed brenne fra innsiden. Det er forskjellige typer drivstoff som kan brukes. Det kan være plastmaterialer som polypropylen, som blant annet brukes som innpakningsmateriale. Tilsetning av materialer som aluminium eller magnesium øker effektiviteten.

Fordelene med hybridraketter er enkel og robust konstruksjon. De kan startes og stoppes og de er enklere og tryggere å håndtere enn rakter med flytende brensel. Det er oppnådd verdier for  $I_{sp}$  opp til 400.

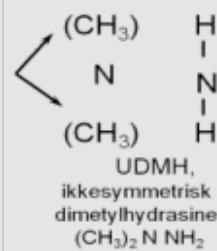
Den første kjente hybridraketten var den sovjetiske GIRD-9 fra 1932 og den brukte flytende oksygen sammen med en gelé av bensin. Det ble også arbeidet med hybridraketter i Tyskland før krigen og i USA etter krigen, men det har vært arbeidet betydelig mindre med denne typen enn med de to andre typene. I Norge arbeides det med hybridraketter både på NAMMO Raufoss og på Andøya Space Center.

## Elektriske rakettmotorer

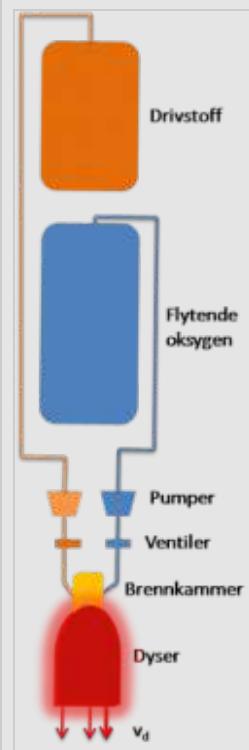
I den andre enden av skalaen har vi ionemotoren. Den sender ut ladde partikler som akselereres i elektriske felt og som kan få meget høye hastigheter, flere titalls km per sekund. Ionemotoren benyttes nå i stadig større grad til baneforandring og banekorreksjon for kommunikasjonssatellitter.



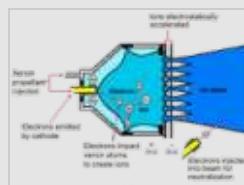
Monometylhydrazin  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)



Usymmetrisk  
dimetylhydrazin  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)



Rakettmotor for flytende  
drivstoff  
Opphavsmann: [Gunnar  
Stette](#)



Ionemotor  
Opphavsmann: [NASA](#)

En slik rakettmotor er vist på figuren. Positive kvikksølv-ioner akselereres i et elektrisk felt og strømmer ut av åpningen til venstre. Før de strømmer ut ”spyles” de med elektroner, som er negative, slik at partiklene som til slutt strømmer ut, er nøytrale. Utstrømmingshastigheten er stor, typisk 30 km/s, men skyvkraften er liten, typisk 1/100 newton. Strømforbruket dreier seg om 100 mW. Slike motorer er uegnet for oppskyting av satellitter, men de kan være velegnet for langsomme manøvrer i rommet, for eksempel til modifikasjon av baneparametre.

I 2001 ble ionemotor benyttet til å bringe en stor satellitt, ARTEMIS, inn i sin korrekte bane. Under oppskyting den 12. juli fikk satellitten ved en feiltakelse en banehøyde på 17 000 km i stedet for ca. 36 000 km. Det ble verifisert at satellitten fungerte som den skulle. Da ble programvaren i satellitten modifisert, og pekerettingen for satellitten forandret. Deretter ble satellitten gradvis ”løftet” opp til sin riktige bane ved hjelp av en ionemotor den var utstyrt med for banekontroll. Drivstoffet var Xenongass, som ble ionisert og akselerert. Ionemotorer er 10 ganger så effektive som kjemiske raketter, og interessen for slike motorer er stor blant satellittfabrikantene fordi de kan holde satellittene i korrekt bane over et lengre tidsrom og dermed øke inntjeningen.

## Flertrinnsraketter

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Flertrinnsraketter \(9585\)](#)

Rakettligningen viser oss sammenhengen mellom drivgasshastigheten, drivstoffmengde, massen for rakettksroget og massen for nyttelasten. Nødvendig hastighetsøkning for å plassere en satellitt i bane er ca. 10 km/s, og typisk drivgasshastighet er 3 km/s. Hvis vi antar at 10 % av massen på utskytingsrampen er skrog + nyttelast, blir ikke hastigheten tilstrekkelig for å nå kosmisk hastighet. Løsningen blir å benytte flere rakettrinn, slik at unødvendig skrogmasse kan kastes av underveis.

Anta at skroget for en rakett ved oppskyting har en masse på 10 % av totalmassen, og at utstrømningshastigheten for drivgassen er 3 km/s. Hva blir da den hastigheten som nyttelasten kan få?

$$v = v_d \cdot \ln \frac{(m_d + m_0)}{m_0} = 3 \cdot \ln \frac{(90 + 10)}{10} = 7,2 \text{ km/s}$$

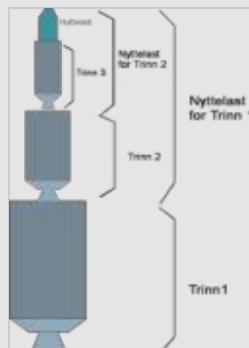
Det er altså ikke mulig å benytte én rakett med slike parameterverdier til å bringe en satellitt inn i en bane rundt jorda, selv når nyttelasten (satellittmassen) går mot null. Løsningen på dette problemet er å bruke flertrinns-raketter. Med tre trinn kunne hvert av trinnene ta sin del av nødvendig hastighetsøkning.

For å nå en totalhastighet på 10,5 km/s ved hjelp av tre trinn kunne hastighetsøkningen for hvert av trinnene være 3,5 km/s. (I praktiske systemer vil hastighetsøkningen være forskjellig for de tre trinnene, som vi skal se når vi behandler Ariane-raketten.) Da kan rakettksrog og nyttelast utgjøre en større del,  $m_o/m_d = 3,2$ . Det vil si at skrog + nyttelast utgjør  $1/3,2 = 0,31$ . Hvis de to andre trinnene leverer samme hastighetsøkning og samme effektivitet, vil den endelige nyttelasten for trinn 3 være  $(1/3,2)^3 = 0,04$ . Med andre ord vil satellittmassen utgjøre 4 % av den totale masse på utskytingsrampen. Typiske verdier for tretrinnsraketter er litt lavere, typisk 1 %. Da er det tatt hensyn til den tyngdekraft som må overvinnes og at det er friksjon når raketten går gjennom atmosfæren.

Bæreraketten Ariane 44L, som er en tretrinnsrakett med 4 ekstraraketter med flytende brennstoff, hadde en totalvekt ved start på 362 tonn, og den kunne bringe en 3,48 tonns satellitt inn i en overføringsbane, GTO. Førstetrinnet ga en beregnet hastighet på ca. 4,6 km/s, andretrinnet økte hastigheten med 2,9 km/s og tredjetrinnet økte hastigheten med 4,1 km/s. Dette blir til sammen 11,6 km/s, som er høyere enn ønsket hastighet på 10,2 km/s. Fra den beregnede hastighetsøkningen må trekkes hastighetstapet på grunn av gravitasjon og atmosfæreffektsjon, 1,0 km/s, og hastighetstap på grunn av at oppskytingsstedet ikke ligger på ekvator, 0,4 km/s.

### Fuglekongen

Alle dyrene skulle konkurrere om hvem som kunne fly høyest og bli kongen, og alle trodde at en av de største fuglene skulle vinne og bli fuglekonge. Men den minste fuglen gjemte seg i fjærene til en ørn, og da den store ørnen hadde fløyet høyest av alle fuglene, frigjorde den lille fuglen seg, og dermed vant han konkuransen og ble fuglekongen.



Tretrinnsrakett  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

## Eksempel på bæreraketter

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Eksempel på bæreraketter \(9586\)](#)

De prinsippene som er beskrevet tidligere, kan vi se realisert når vi betrakter en komplett bærerakett. En tradisjonell tretrinnsrakett er Ariane 4. Den er nå tatt ut av produksjon, men den ble brukt til mer enn 150 oppskytinger.

Så skal vi se på en ny flertrinnsrakett, VEGA, som ventes utprøvd innen utgangen av 2010, og som er basert på litt andre løsninger.

Ariane-raketten, utviklet av ESA (European Space Agency) og produsert av Arianespace, illustrerer godt konstruksjonen for en tretrinns-rakett. Den første versjonen, Ariane 1, ble skutt opp for første gang den 23. desember 1979. Den første Ariane 4 ble skutt opp 15. juni 1988, og den siste, nr. 159, den 15. februar 2003.



ARIANE-familien  
Opphavsmann: [ESA](#)

# ARIANE versjon 1 til 4

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[ARIANE versjon 1 \(25037\)](#)



Den første europeiske raketten for oppskyting av satellitter var Ariane 1, som først ble skutt opp julafften 1979, men den virkelige "arbeidshesten" for europeisk romvirksomhet var Ariane 4, som hadde 113 vellykkede oppskytinger mellom 15. juni 1988 og 15. februar 2003. Den ble tilbudt i forskjellige varianter når det gjaldt ekstra rakettmotorer som ble brukt ved start hvor tyngdekraften er betydelig. Disse ekstramotorene kunne ha både fast og flytende brennstoff. Nyttelasten ble opp til 4,9 tonn for oppskyting til overføringsbane, GTO.

Figuren viser et snitt gjennom Ariane 1, og den er typisk for strukturen for de første bærerakettene i denne familien, Ariane 1 - 4. Den siste versjonen ble også brukt i forskjellige konfigurasjoner.

## [ARIANE 4-familien](#)

Første trinnet av Ariane 1 veide 15,6 tonn uten brennstoff og kunne fylles med 145 tonn drivstoff, nitrogentetroksyd  $N_2H_4$  og UH25, en blanding av UDMH (75 %) og hydrazinhydrat (25 %). Den hadde 4 Viking-motorer som gir en skyvekraft på 270 000 newton. Brenntid for første trinnet var 135 sekunder. Styring skjedde ved endimensjonal helning av hver av de fire motorene, og i tillegg var trinnet utstyrt med fire styrefinner på hver  $2\text{ m}^2$ .

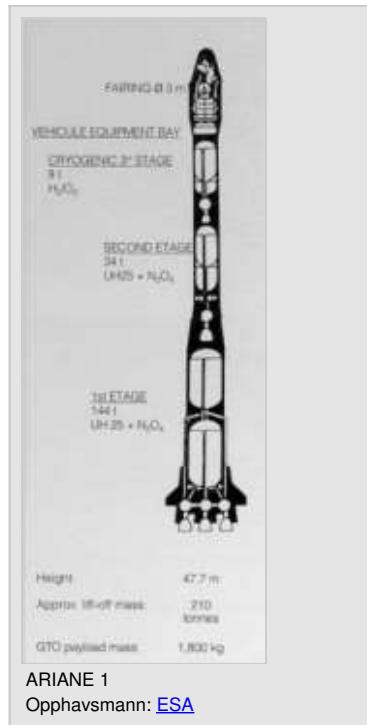
Første trinnet kunne utstyres med opptil fire påhengsmotorer med fast brennstoff. Hver veide 9,7 tonn og det faste drivstoffet utgjorde 7,3 tonn. Disse ekstramotorene ble tent i en høyde av 11 meter og frigjort etter 33 sekunder.

Andre trinnet veide 3,6 tonn uten brennstoff og kunne fylles med 34 tonn brennstoff ( $N_2H_4$  og UH25). Brenntiden var 123 sekunder. Dette trinnet hadde en Viking-motor som kunne styres i to retninger.

Selve skroget for det tredje trinnet veide 1,2 tonn. Som drivstoff ble benyttet flytende oksygen og hydrogen, totalt 10.7 tonn, og dette drivstoffet hadde en spesifikk impuls på 440 sekunder. Trinnet var utstyrt med en HM7B motor som brant nominelt 720 sekunder.

Både andretrinnet og tredjetrinnet var utstyrt med ekstra dyser for styring av rull-bevegelsen. Om ønsket kunne nyttelasten gis en rotasjon idet den gikk inn i overføringsbanen.

Over tredjetrinnet satt instrumentrommet. Det veide 273 kg. Det var utstyrt med en datamaskin som styrtet oppskytingsprosessen, samt utstyr for telemetri, navigasjon, retningsstyring og sprengning av raketten om det skulle bli nødvendig.



Lasterommet var konstruert for å transportere en eller to satellitter, og var beskyttet av en kapsel som ble kastet av når raketten var ute av atmosfæren. Lasterommet hadde en ytre diameter på 3,2 meter og en lengde på 8,65 meter.

Etter hvert som de forskjellige trinnene er brent ut, frigjøres de ved hjelp av små ladninger som eksploderer, og små raketter sørger for at trinnene skyves fra hverandre. Disse operasjonene styres av datamaskinen om bord.

Den første Ariane-raketten, Ariane 1, ble skutt opp julften 1979. Den var konstruert for å plassere to kommunikasjonssatellitter i bane, men ettersom satellittene ble stadig tyngre, var det nødvendig å utvikle nye modeller. Det var 11 vellykkede oppskytinger av Ariane 1 mellom 1979 og 1987. Deretter ble det fem Ariane 2- oppskytinger og 11 oppskytinger av Ariane 3.

# Ariane 5

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[ARIANE 5 \(25038\)](#)

Ariane 5 er den nyeste versjonen av Ariane-rakettene. Den er konstruert etter et helt annet prinsipp enn Ariane 4, og hensikten med nyutviklingen er å oppnå større nyttelast og lavere oppskytingskostnader i kroner per kilogram.

## Hovedtrinn

Ariane 5 har en nedre del bestående av et kryogenisk hovedtrinn med en rakettmotor av type Vulcan og to store faststoffraketter. Hovedtrinnet er opp til 30 meter høyt, og det bruker flytende hydrogen,  $H_2$ , og flytende oksygen,  $O_2$ , med en drivstoffmengde på 155 tonn. Vulcan-motoren har en skyvekraft i vakuum på 117 tonn, og den brenner i 570 s.



## Faststoffmotorer

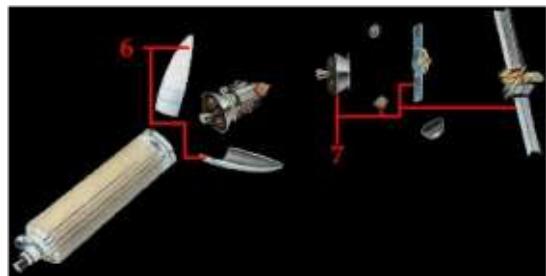
Faststoffmotorene, plassert på sidene av hovedtanken, har hver en drivstoffmasse på 270 tonn og yter en skyvekraft på 640 tonn hver, omtrent det samme som den totale skyvkraften for Ariane 4. Totalhøyden for Ariane 5 er 45 til 56 meter, diameteren til den sentrale sylinderen er 5,4 meter, og samlet masse ved oppskyting er 750 tonn.

## AESTUS

En faststoffmotor, AESTUS-motoren, som ligger over hoveddrivstofftanken, har en diameter på 3,94 m, lengde 3,56 m, og en total "tørr" masse (uten drivstoff) på 1150 kg. Den har en drivstoffkapasitet på 9,7 tonn og motoren gir en skyvekraft på 275000 Newton. Brenntiden er 1100 sekund, og den vil bringe nyttelasten inn i sin endelige bane enten dette er en overføringsbane til GEO, eller det er en interplanetarisk flukt.

## Lasterommet

Lasterommet øverst har en diameter på 5,4 meter og en høyde på 12,7 til 17 meter. Det er beskyttet av et skjold som kastes av etter at raketten har passert atmosfæren.



ARIANE 5 nyttelast

Opphavsmann: [ESA](#)

## Nyttelasten

Ariane 5 kan bringe én, to eller tre satellitter opp i bane. Kapasiteten er

- 18 tonn til lavbane (LEO)

- 10 tonn til polbane og
- 6,7 tonn til overføringsbane for den geostasjonære bane.

Ariane 5 har fått nye kryogeniske motorer som øker kapasiteten. Den vil da kunne levere 9 tonn til geostasjonær bane, mot de vel 6 tonn nå.

### Oppskytingssekvens

I starttidspunktet tennes Vulcan-motoren, og den brenner i 7 sekunder mens den kontrolleres for å verifisere at alt fungerer normalt. Da tennes også faststoffmotorene, og raketten frigjøres fra plattformen. Etter 130 sekunder har faststoffmotorene brent ut. Det kryogeniske trinnet bringer øvre del med nyttelasten til en høyde på ca. 8 km og en hastighet på 8 km/s. Det har da gått totalt 10 min. Deretter overtar den øvre delen, som er utstyrt med en Aestus-motor med en skyvekraft på 2,7 tonn. Den skal gi nyttelasten riktig posisjon og hastighet for innføring i den ønskede bane. I tilfelle oppskyting til geostasjonær bane er brenntiden ca. 1000 sekunder. Høyden er da 1600 km og hastigheten er 9,1 km/s. Det er da gått 26 minutter og 37 sekunder siden start.

### Oppskyting av Thor 6



Oppskyting av Thor 6

Om kvelden den 29. oktober 2009 ble Telenors nyeste kringkastingssatellitt, Thor 6, plassert i geostasjonær overføringsbane. Bæreraketten var Ariane 5, flukt 192, som var den sjette Ariane 5- oppskyting i 2009, og den fjerde oppskyting av to satellitter samtidig. Overføringsbanen hadde en perigeumhøyde på 250 km, en apogeumhøyde på 35 786 km og en baneinklinasjon på 6 grader. Prosessen tok 31 minutter til den siste satellitten var frigjort fra raketten.

Thor 6-satellitten, som skal operere fra 1 grad vest, hadde en masse på 3049 kg ved oppskyting, og den ble skutt opp sammen med en større satellitt, NSS-12, med en total masse ved oppskyting på 5622 kg. NSS-12 eies av SES World Skies og skal brukes til telekommunikasjon og TV-kringkasting fra en posisjon i 57 grader øst.

Effekten for Thor 6 ved slutten av 15 års drift er 6,395 kW, mens den for NSS-12 er 14,2 kW. Dimensionene for de to satellittene ved oppskyting er henholdsvis 7,6 x 2,9 x 3,6 m og 2,8 x 1,8 x 2,3 m.

# VEGA

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[VEGA \(25039\)](#)



Vega er en ny europeisk bærerakett for oppskyting av mindre satellitter, og den er spesielt egnet for plassering av satellitter på opp til 1500 kg masse i polbane med banehøyde på typisk 700 km. Programmet ble vedtatt av ESAs råd i juni 1998 og den første oppskyting, jomfruturen, ble foretatt den 13. februar 2012. Nyttelasten på den første oppskytingen var to italienske satellitter fra ASI, det italienske romsentret, og fra Universitetet i Bologna. Dessuten var det med 7 CubeSat satellitter fra forskjellige europeiske universiteter.

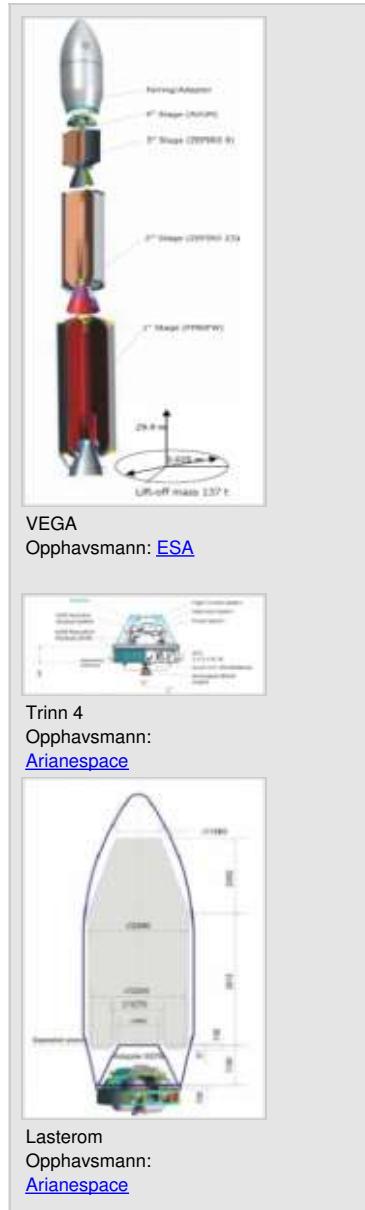
Vega er en tretrinnsrakett for oppskyting av mindre satellitter, med masse under 1500 kg, men til forskjell fra ARIANE bruker den fast brennstoff i disse trinnene. I tillegg har den et 4. trinn med flytende drivstoff. Et slike trinn kan styres bedre, og det kan derfor brukes til finjustering av baneparametrene og til styring av pekeretning av satellittene. VEGA kan brukes til samtidig oppskyting av flere satellitter.

Raketten er 30 meter høy, og massen ved oppskyting er 137 tonn. På samme måten som for ARIANE-raketene er virkningsgraden omkring 1 %.

De tre trinnene har rakettmotorer med fast drivstoff som betegnes HTPB 1912. De er konstruert av karbonfiber kombinert med et varmeisoleringe Kunststoff med lav egenvekt, EPDM.

Første trinnet er 10,5 meter langt, har en diameter på 3 meter og en masse på knapt 96 000 kg. Det er utstyrt med en rakettmotor, European Solid Rocket Motor (SRM) med betegnelsen P80 FW. Skyvemotoren er 3040 kN,  $I_{sp}$  er 280 s og brenntiden er 108 s. Retningen på skyvemotoren kan styres innenfor en vinkel på 6,5 grader ved hjelp av to elektriske aktuatorer som styrer dysen i to retninger.

Trinn 2 er 7,5 meter langt, har en diameter på 1,9 m og en masse på 25 750 kg. Rakettmotoren betegnes ZEFIRO 23 (Z23) og har 23,9 t fast brennstoff. Skyvemotoren er 1200 kN og brenntiden er 71,6 s.



Trinn 3 er 3,85 meter langt, har en diameter på 1,9 m, og en masse på 10 948 kg. Rakettmotorer er ZEFIRO 9 med 10,1 t fast brennstoff. Skyvkraften er 313 kN og brenntiden er 117 s.

Fjerde trinnet har flere funksjoner. Det betegnes AVUM (Altitude and Vernier Upper Module). Det skal styre de tre første trinnene under oppskyting og sørge for at nyttelasten plasseres i riktig bane med stor nøyaktighet. Det skal også sørge for at nyttelasten blir frigjort. Rakettmotoren i dette trinnet bruker tokomponent-drivstoff, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/UDMH. Den spesifikke impulsen, I<sub>sp</sub>, er høy, 315,5 s. Den kan startes og stoppes opp til fem ganger, og det gjør systemet anvendelig til forskjellige operasjoner. Den er også utstyrt med radielle trustere som kan gi retningskontroll i et treaksesystem, den er utstyrt med datamaskin og den står for toveis dataoverføring mellom rakettssystemet og bakken.

Lasterommet har en største diameter på 2,6 m og en totallengde på 7,18 m. Kapselen rundt består av to halvdeler som kan kastes av når raketten er kommet over atmosfæren. Det er også lagt inn materiale som skal gi en viss akustisk isolasjon.



VEGA

Fotograf: [ESA](#)

# Påkjenning på nyttelast under oppskyting

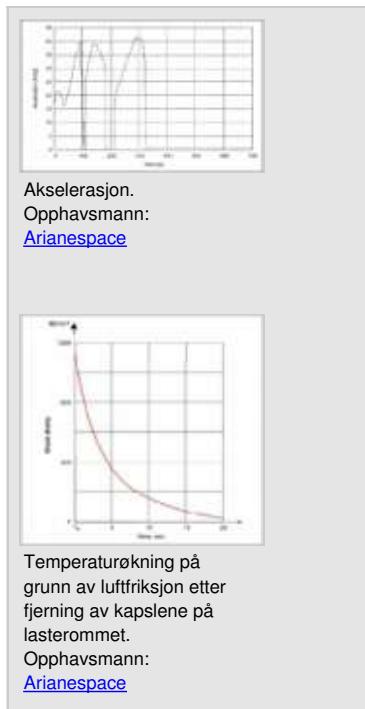
Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Påkjenning på nyttelast under oppskyting \(47477\)](#)

Den påkjenningen en nyttelast har ved en raketttoppskyting, er sterkt avhengig av rakettypen. For enkelte forskningsraketter kan akselerasjonen være så høy som 150 ganger tyngde-akselerasjonen på jordoverflata, 150 g, og det stiller store krav til den mekaniske konstruksjonen for den instrumentering som skal være med. For bæreraketter som skal brukes til bemannede romferder må akselerasjonen holdes lav, godt under 10 g. Ved siden av akselerasjon er det mange andre typer påkjenning, ikke minst støy og vibrasjoner. Overgangen fra lufttrykk på jordoverflaten til vakuum kan også være problematisk når utstyr om bord skal "utluftes", og det kan bli store termiske påkjenninger. En generell behandling av dette temaet er omfattende, og det vil derfor som et eksempel bli gitt en oversikt av de påkjenningene nyttelasten utsettes for i en bestemt bæreraket, **Vega**. Brukermanualene for hver rakettype vil bestemme forholdene ved en bestemt oppskyting.

## Akselerasjon

Figuren viser det typiske forløpet for akselerasjonen i lengderetning (longitudinalt) under oppskyting. For en nyttelast på 300 kg vil den ikke overskride 5,5 g. Statisk akselerasjon i sideretning (lateralt) vil ikke overstige 0,5 g, og da er det tatt hensyn til påvirkning av vindkast.



Bæreraketter kan også bli utsatt for POGO-effekten (se Begrep). Den kan gi høyere verdier for longitudinal akselerasjon, og det kan i verste fall ødelegge raketten.

## Periodiske (sinusformede) svingninger

Rakettmotorene kan gi svingninger, både i lengderetning og i sideretning. Maksimumsverdiene for forskjellige frekvenser er gitt i tabellen

Retning	Longitudinalt	Lateralt
Frekvensbånd (Hz)	5–45	45–100
Sinusamplitude (g)	≤ 0,8	≤ 1,0

## Støy

På bakken før oppskyting kan nyttelasten bli utsatt for støy fra ventilasjonssystemer og lignende, men nivået vil ikke overstige 94 dB.

Under oppskytingen vil det være sterk støy fra rakettmotorene og den vil bli overført til nyttelasten via den mekaniske strukturen. Maksimalverdien for støyen inne i lasterommet er gitt av tabellen. Disse nivåene vil vare i mindre enn 30 sekund.

Table 3.2 - Acoustic Noise Spectrum under the Fairing

Octave Center Frequency (Hz)	Flight Limit Level (dB) (reference: 0 dB = $2 \times 10^{-5}$ Pa)
31.5	124
63	129
125	135
250	132
500	131
1000	120
2000	100
OASPL (20 – 2828 Hz)	138.5

Akustisk støy i lasterommet.

Opphavsmann: [Arianespace](#)

Dette er høye verdier. Smertetterskelen for støy ligger på ca. 130 dB.

## Støt

Nyttelasten vil hovedsakelig bli utsatt for støt når de første rakettrinnene skilles og når hylsteret for lasterommet kastes av. Dette skyldes at det brukes små sprengladninger til disse operasjonene. Det kraftigste støtet, og det som bestemmer dimensjoneringen av nyttelasten, er det som oppstår når nyttelasten blir frigjort fra bæreraketten.

## Lufttrykk

Lufttrykket i lasterommet vil variere under oppskyting, fra 1 atmosfæres trykk på bakken til vakuum. Ventilasjonen av lasterommet er utformet slik at lufttrykket ikke skal minke for hurtig, og variasjonshastigheten skal være mindre enn 50 mbar/s.

## Termisk

På bakken, før oppskyting, holdes temperatur og luftfuktighet innen gitte grenser,  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$  for temperaturen og  $55\% \pm 5\%$  for relativ fuktighet.

Under oppskyting vil kapselen rundt nyttelasten bli oppvarmet på grunn av atmosfærisk friksjon, men selve nyttelasten er beskyttet. Kapselen vil bli beholdt så lenge etter utskyting at nyttelasten ikke skal bli utsatt for en temperatur på over  $1135 \text{ W/m}^2$ . Denne verdien er beregnet på grunnlag av en molekylstrøm mot ei plate normalt på luftstrømmen. Etter at kapselen er fjernet vil temperaturen synke som vist på figuren.

Dessuten vil det bli en oppvarming på grunn av solstrålingen. Når 4. trinnet med nyttelasten går i overføringsbaner kan pekeretningen velges slik den er best av hensyn til nyttelasten. Det er også mulig å rottere nyttelasten langsomt for å fordele oppvarmingen, som for et grillspyd.

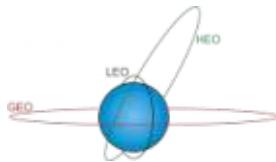
## Elektromagnetisk miljø

Det er oppgitt grenser for nivået for elektrisk felt på grunn av raketten og radioutstyret på utskytingsrampen. Nyttelasten må testes for å verifisere at den kan tåle den definerte påkjenning.

# Satellittbaner

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellittbaner \(13264\)](#)



Et fly styres av en pilot slik at det følge en ønsket bane, og bevegelse krever drivstoff. Med satellitter i rommet er det ikke slik. De beveger seg i det vi kaller ballistiske baner eller kastebaner. Det er baner bestemt tyngdekraften, og de beskrives ved hjelp av Keplers lover. Til gjengjeld kreves det ikke drivstoff for å holde satellittene i disse banene. En satellitt i et tyngdefelt uten påvirkning av andre krefter enn tyngdekraften har en bevegelse med seks frihetsgrader. Det betyr at hvis vi kjenner 6 parametere for satelliitten, så er bevegelsen i all fremtid bestemt. Et slikt parametersett kan være tre posisjonskoordinater i rommet og tre hastighetskomponenter.

Satellittbevegelsen er bestemt av lover formulert av Johannes Kepler (1571–1630). Han viet en stor del av sitt liv til studier av hvordan planetene beveget seg rundt sola. Det er de samme lovene som gjelder for en jordsatellitt, eller generelt for bevegelse av en liten masse  $m$  i tyngdefeltet rundt en stor masse  $M$ .



Ungarsk frimerke til minne om Johannes Kepler (1571–1630).

Opphavsmann: [Public domain](#)

Keplers tre lover:

1. Planetene beveger seg i elliptiske baner med sola i det ene brennpunktet.
2. En linje fra sola til planetene beskriver i like lange tidsrom like store arealer.
3. Kvadratet av omløpstiden for planetene er proporsjonal med tredje potens av den lange halvaksen.

Satellittene i en ideell Kepler-bane beveger seg i et plan, og tyngdepunktet for jorda ligger i samme planet. Omløpstiden er bare bestemt av den lange halvaksen og er dermed uavhengig av lengden av den korte halvaksen og av eksentrisiteten.

Formen for satellittbanene er enkel, sirkel eller ellipse, men det som bestemmer anvendbarheten for forskjellige satellittbaner er hvordan satellitten beveger seg i forhold til en bruker på overflata av en roterende jord.

Når vi skal behandle bevegelsen av satellitter i rommet, kan vi dele oppgaven i flere deler:

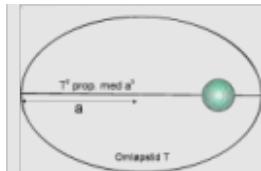
1. Hvordan beveger satellitten seg i en sirkulær eller ellipisk bane?
2. Hvordan kan vi beskrive hvor satellittbanene ligger i verdensrommet?
3. Hvordan kan vi beregne retning og avstand til satellittene?

Lagrangepunkt

Keplers 1. lov  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

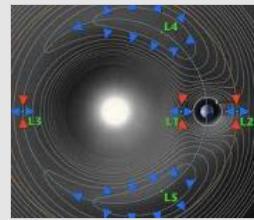
Keplers 2. lov  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

Vi skal i hovedsaken begrense oss til å behandle satellitter i bane rundt jorda, det vil si satellitter som beveger seg i jordas tyngdefelt. For studier av verdensrommet, og i første rekke av sola, benyttes også baner som er bestemt både av tyngdefeltet rundt jorda og rundt sola. Det er for eksempel mulig å plassere et romfartøy mellom jorda og sola hvor tyngdekreftene utbalanserer hverandre. Dette kalles et Lagrangepunkt, etter den franske matematikeren Joseph-Louis Lagrange, som i 1772 studerte bevegelsen av tre legemer. Det er fem Lagrangepunkt i sol – jord-systemet, og en god oversikt er gitt av ESA i den eksterne referansen, se under Faglig relatert, til fordypning.



Keplers 3. lov

Forfatter: [Gunnar Stette](#)



Lagrangepunkter

Kilde: NASA

SOHO-satellitten som observerer sola er plassert i Lagrangepunkt L1, ca 1,5 millioner km fra jorda. Dette punktet er labilt i retning sol-jord og stabilt normalt på denne retning.

# Satellittbevegelse i sirkulære baner

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellittbevegelse i sirkulære baner \(24460\)](#)



Vi kan enkelt forklare at en satellitt går i en bane rundt jorda ved å se på de to kraftene som påvirker satellitten. Den ene er sentripetalkraften på grunn av rotasjonen, og den andre er tyngdekraften. En slik bane er ifølge Kepler en ellipse med jordas tyngdepunkt i et av brennpunktene. Som et viktig spesialtilfelle kan banen være en sirkel med jorda i sentrum.

## Sirkulær bane

Tyngdekraften  $F_g$  som virker på en satellitt med masse  $m$  i en avstand  $r$  fra en masse  $M$ , er gitt av

$$F_g = \frac{K \cdot M \cdot m}{r^2}$$

Her er  $K$  den universelle gravitasjonskonstanten og  $M$  er jordmassen. Hvis vi bare skal studere satellitter i jordbane, kan vi operere med produktet

$$KM = \mu = 398602,3$$

Dimensjonen for  $\mu$  er  $\text{km}^3/\text{sek}^2$

Sentripetalkraften  $F_s$  er masse  $m$  ganger akselerasjon

$F_s = m \cdot a$   
og akselerasjonen ved bevegelse i en sirkulær bane med omløpstid  $T$  er gitt av

$$a = \frac{2\pi r}{T^2}$$

Setter vi

$$F_s = F_g$$

får vi

$$\frac{\mu}{r^2} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Omløpstiden er gitt av

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{\mu}}$$

Banehastigheten  $v$  er gitt av

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$$

# Satellittbevegelse i elliptiske baner

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellittbevegelse i elliptiske baner \(24532\)](#)

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \cdot \vec{r}$$

Den generelle ligningen for satellittbevegelse i et tredimensjonalt tyngdefelt er en 2. ordens differensialligning. I et kulesymmetrisk tyngdefelt kan det vises at satellittbanen blir liggende i et plan, og at formen for satellittbanen blir et kjeglesnitt. Det vil si en sirkel, ellipse, parabel eller hyperbel. Siden vi skal konsentrere oss om satellitter i jordbane, betyr det at banen blir en ellipse, med sirkel som et spesialtilfelle. Satellittbevegelsen blir betydelig forenklet hvis vi kan beskrive den ved hjelp av polarkoordinater i baneplanet. Da blir den en differensialligning med en variabel, en vinkel som kalles sann anomali, som er en funksjon av tid,  $v(t)$ .

## Parametrene for elliptisk bane

Det kan vises at avstanden  $r$  fra jordsentrum til satellitten er gitt av

$$r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos \psi}$$

Dette er et generell matematisk uttrykk for et kjeglesnitt. Når parameteren  $\varepsilon = 0$ , blir radien konstant, og satellitten beveger seg på en sirkel.

Når parameteren  $\varepsilon$  er mindre enn 1, vil radien alltid være endelig, og det betyr at vi har en lukket kurve. Radien varierer med vinkelen  $\psi$ , og for  $0 < \varepsilon < 1$  vil banen være en ellipse.

Radien er minst når  $\psi = 0$ , og følgelig  $\cos \psi = 1$ . Det betyr at referanseretningen for vinkelen er det punkt hvor satellitten er nærmest jorda. Dette punktet kalles **perigeum**. Et tilsvarende punkt for en planetbane rundt sola er perihelion.

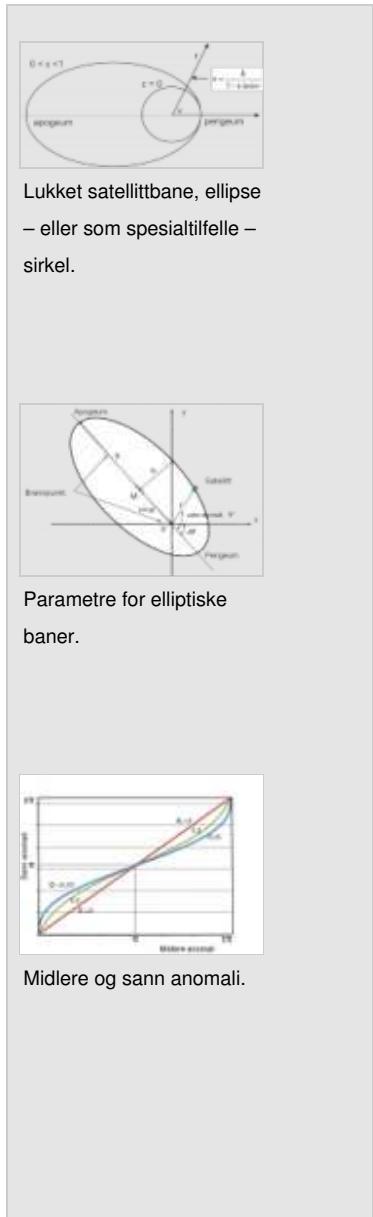
Radien, og dermed avstanden til satellitten, er størst når  $\psi = 180^\circ$  og  $\cos \psi = -1$ . Dette punktet kalles **apogeum**, tilsvarende apohelion for planeter. Linjen mellom perigeum og apogeum er den lange aksen i ellipsen.

Vinkelen  $\psi$ , som er vinkelen mellom apogeum og satellittposisjonen, målt i retning mot urviseren, kalles **sann anomali**.

En annen parameter som brukes er **midlere anomal**. Dette er en parameter som øker lineært fra 0 til  $2\pi$  i løpet av en omdreining. Middlere anomal er ikke en vinkel, men den kan beskrives som et areal som vokser lineært, som beskrevet i fordypningsstoffet.

## Beskrivelse av en ellipse

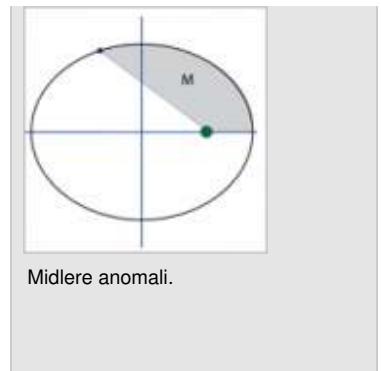
Størrelsen og formen for den elliptiske banen kan beskrives ved hjelp at to parametre, for eksempel den lange halvaksen  $a$  og den korte halvaksen,  $b$ . Det er mer vanlig å beskrive ellipsen ved hjelp av den lange halvaksen og eksentrisiteten, avstanden fra sentrum av ellipsen til brennpunktet i forhold til den lange halvaksen. Det skal for ordens skyld nevnes at denne eksentrisitetsparametren er forskjellig fra parameteren i uttrykket på polarkoordinatform. Den kalles lineær eksentrisitet, og det er den vi skal benytte videre.



Når eksentrisiteten er liten, ligger brennpunktene nær sentrum, og når eksentrisiteten,  $\epsilon$ , øker mot 1 rykker brennpunktene ut mot omkretsen på ellipsen, som blir mer og mer flatttrykt.

### Satellittbevegelse i elliptisk bane

Satellittbevegelsen i en elliptisk bane er bestemt av eksentrisiteten, i henhold til Keplers 2. lov. Når eksentrisiteten er nært 0, vil sann anomali øke lineært med tiden. Ved høyere eksentrisitet vil satellitten bevege seg raskt nær perigeum og langsomt ved apogeum. Derfor øker sann anomali raskt som funksjon av tid ved perigeum og langsomt ved apogeum, som figuren viser. Omløpstiden er bare bestemt av den lange halvaksen, ikke av eksentrisiteten, og dermed møtes alle kurvene etter en halv og en hel omløpstid, periode.



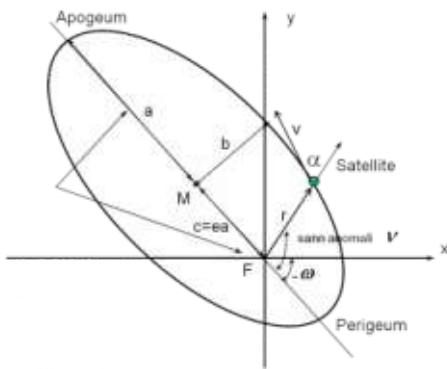
# Sammenheng mellom baneparametre

Forfatter: Gunnar Stette

[Sammenheng mellom baneparametre \(88473\)](#)

Bevegelsen av en satellitt i bane rundt jorda kan beskrives i forskjellige referansesystemer. De to referansesystemene som er behandlet her, er begrenset til bevegelse i et plan, og de har derfor fire frihetsgrader. Det betyr at hvis vi kjenner fire baneparametere, sammen med den parameteren som definerer gravitasjonsfeltet,  $\mu$ , er bevegelsen fullstendig definert. I et kartesisk koordinatsystem er det posisjon og hastighet i to ortogonale retninger. I et polarkoordinat-system er det størrelse, form og orientering av den elliptiske banen,  $a$ ,  $\epsilon$  og  $\omega$  sammen med posisjonen i banen, definert ved hjelp av sann anomali,  $v$ . Her skal vi behandle hvordan vi kan gå mellom de to systemene.

Merk: Det er i dette publiseringssystemet liten forskjell på den greske bokstaven ny,  $v$ , som står for en vinkel, og den latinske bokstaven  $v$ , som står for hastighet



Ellipsebane

Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

## Viktige parametre for elliptiske baner

En satellitt beveger seg i et kulesymmetrisk tyngdefelt med sentrum i origo. Tyngdefeltet er karakterisert av parameteren  $\mu$ , som for jordas tyngdfelt er gitt av  $398\,602,4 \text{ km}^3/\text{s}^2$ .

$$a = \frac{r\mu}{2\mu - rv^2}$$

Sann anomali,  $v$ , er gitt av

$$\nu = a \cos(\frac{a \cdot (1 - v^2) - r}{v^2})$$

Når eksentriskiteten,  $e$ , den lange halvaksen,  $a$ , og sann anomali,  $v$ , er kjent, kan  $r$ , avstanden til satellitten, beregnes ut fra geometriske betraktninger

$$r = \frac{(1 - e^2) \cdot a}{1 + v \cos \nu}$$

Banehastigheten,  $v$ , kan så beregnes av den lange halvaksen,  $a$ , og  $r$  samt av  $\mu$ .

$$v = \sqrt{\mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

Vinkelen mellom radiusvektor til satellitten og hastighetsvektoren betegnes  $\alpha$ , og den er gitt av

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{\sqrt{1 - v^2}}{r \cdot \mu a} \right)$$

En oversikt over sammenhengen med kartesiske koordinater  $(x, y)$  er gitt i Fordypningsstoff: Sammenheng mellom baneparametere

## Baneforandring i banen

Når en satellitt beveger seg i et kulesymmetrisk tyngdefelt uten påvirkning av ytre krefter vil den lange halvaksen være konstant mens avstanden r og banehastigheten v kan variere.

$v = \sqrt{\mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$  Hvis banehastigheten forandres i størrelse men ikke i retning ved en kortvarig kraft, for eksempel fra en rakettmotor, vil banen forandres i banen. Da vil posisjonen r være uforandret mens v og a vil forandres.

$$\text{Før hastighetsforandring } v_1 = \sqrt{\mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a_1} \right)}$$

$$\text{Etter hastighetsforandring } v_2 = \sqrt{\mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a_2} \right)}$$

Eksempel: Oppbremsing av satellitt for å bringe den inn i atmosfæren.

Iridiumsatellittene går i sirkulære baner med en banehøyde på 780 km. Operatørene av systemet har forpliktet seg til fjerne utbrukte satellitter ved å senke de ned i atmosfæren slik at de brenner opp og fordamper. Dette kan gjøres ved å redusere hastigheten og overføre satellitten til en elliptisk bane. Hvis perigeum senkes til 10 km høyde vil satellittene brenne opp etter kort tid.

Før oppbremsing:  $r = a_1 = (6378 + 780) \text{ km} = 7158 \text{ km}$ . Hastigheten er gitt av  $v = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$

Her er  $\mu = 398603,2 \text{ km}^3/\text{s}^2$

Det gir en hastighet på 7562 km/s.

Etter oppbremsingen, som antas å skje momentant, er r uforandret 7158 km men a er  $a = \frac{1}{2}(7158+6388) = 6773 \text{ km}$

Hastigheten i apogeum for den elliptiske banen er gitt av

$$v_2 = \sqrt{\mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a_2} \right)}$$

$$v_2 = \sqrt{398603,2 \left( \frac{2}{7158} - \frac{1}{6773} \right)} \text{ Det gir } V_2 = 7,247 \text{ km/s}$$

Nødvendig hastighetsreduksjon blir dermed:  $\Delta v = (7,562 - 7,247) \text{ km/s} = 0,315 \text{ km/s}$

# Referansesystem i verdensrommet

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Referansesystem i verdensrommet \(9567\)](#)

Når vi skal beregne satellittbaner og finne satellittene sett fra en roterende jord, er det viktig å ha et referansesystem som gjør de matematiske uttrykkene enklest mulig. Siden det er satellitter i bane rundt jorda vi skal behandle lager vi et referansesystem hvor jordas tyngdepunkt er i sentrum av universet.

Hvor i verdensrommet er satellitten?

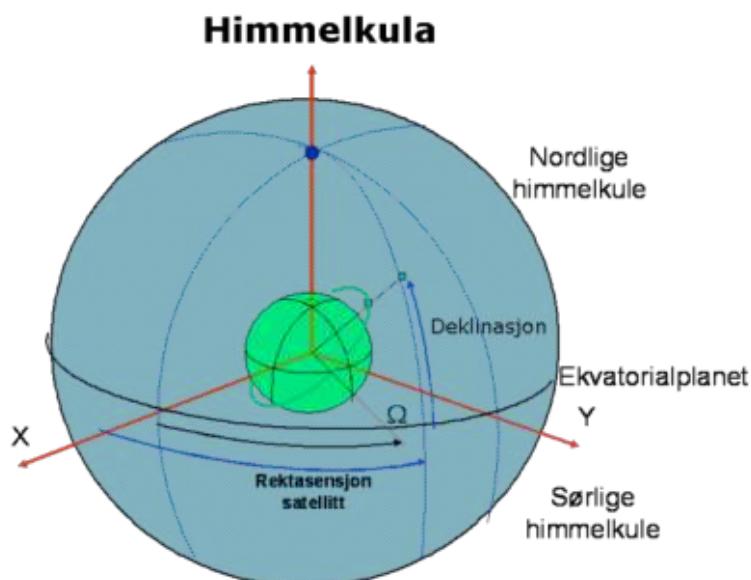
Vi setter opp et rettvinklet tredimensjonalt aksekors med origo i sentrum. Vi velger at Z-aksen skal falle sammen med rotasjonsaksen for jordkoden. Dermed vil XY-planet være det samme som ekvatorialplanet for jorda. Jordkoden roterer mens aksekorset ligger fast i verdensrommet. Det betyr at X-aksen skal peke mot et bestemt punkt på stjernehimmelen. Y-aksen danner 90 grader med X-aksen.

Så tenker vi oss satellittene, sola og alle himmellegemene projisert på innsida av det vi kan kalle **himmelkula**, omtrent som vi ville se det i et planetarium. Ekvatorialplanet deler himmelkula i to, den sørlige og den nordlige.

Om vinteren ville sola være på den sørlige halvkula. Ved vårjevndøgn, rundt 20. til 21. mars, krysser sola delingslinja og beveger seg over til den nordlige halvkula. Vi velger å la X-aksen peke mot dette krysningspunktet, **vårjevndøgnpunktet**, som ligger i stjernebildet Væren, Aries.

Jordkoden roterer inne i himmelkula med en omdreining per døgn. En satellitt kan gjøre en omdreining på noen timer. Sola gjør ett omløp per år. Aksekorset ligger fast i forhold til stjernehimmelen. Posisjonen for en satellitt kan vi angi ved hjelp av koordinatene (X,Y,Z), som alle tre er funksjoner av tid. Posisjonen kan vi også angi i et sfærisk referansesystem, som vist på figuren. Punktet på himmelkula angis som vinkel øst for vårjevndøgnpunktet, **rekotasjonen**, og vinkel opp fra ekvatorialplanet, **deklinasjonen**. Den tredje parameteren er **avstanden fra jordsentrums**.

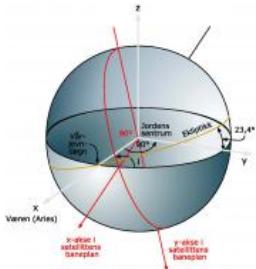
HimmelkulaOpphavsmann: Gunnar Stette



## De klassiske baneparametrene

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

## De klassiske baneparametrene (24441)



Vi har sett på bevegelse av en satellitt i en elliptisk bane, og vi har definert et referansesystem i rommet. Nå skal vi plassere ellipsen i verdensrommet på en slik måte at beregningene blir enklest mulig.

## Rettvinklet koordinatsystem

Satellittbanen ligger i et plan, og da kan vi etablere et todimensjonalt referansesystem  $(x,y)$  i dette planet. Origo er i jordas tyngdepunkt. Dette baneplanet må skjære ekvatorialplanet (eller falle sammen med det hvis satellitten beveger seg i ekvatorialplanet), og denne skjæringslinja mellom de to planene velger vi som x-akse i vårt system. **Det betyr at x-aksen ligger i ekvatorial-planet for jorda.** y-aksen danner en vinkel på 90 grader med x-aksen. Da vil satellitten bevege seg langs ellipsen som vist på figuren. Verdiene for  $x$  og  $y$  er funksjoner av tid,  $x(t)$  og  $y(t)$ .

## Plassering av ellipsen i baneplanet

Når vi skal plassere den elliptiske satellittbanen i dette baneplanet, vil brennpunktet, som er tyngdepunktet for jorda, ligge i origo.

Det som da gjenstår, er å bestemme hvilken orientering ellipsen har i xy-systemet, vinkelen for hovedaksen i ellipsen i forhold til x-aksen, som ligger i ekvatorialplanet. Denne defineres som vinkel fra positiv x-akse til perigeum, med retning mot urviseren. Den kalles **perigeets lengde**,  $\omega$ .

På figuren ser vi at apogeum peker mot nord. Perigeets lengde,  $\omega$ , er da negativ.

## Bestemmelse av baneplanet

Baneplanet vil generelt danne en vinkel med ekvatorialplanet. Denne vinkelen kaller vi **inklinasjon, i**. Vi kan også definere inklinasjonen som vinkelen mellom en normal på baneplanet og jordens rotasjonsakse. En satellitt som beveger seg i ekvatorialplanet, har inklinasjon  $0^\circ$ , og en satellitt som går over polene, har inklinasjon  $i = 90^\circ$ .

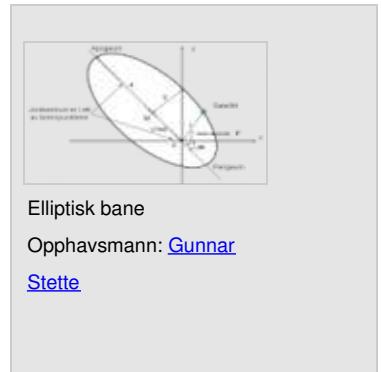
Så må vi definere hva for veg baneplanet heller. x-aksen ligger i ekvatorialplanet, og der går satellitten fra den sørlige til den nordlige himmelkule. Vinkelen mellom X-aksen, som peker mot vårjevndøgnpunktet, og x-aksen kalles **rektasensjon for oppstigende knute**,  $\Omega$ . Hvis satellitten krysser ekvatorialplanet på samme sted som sola krysser det ved vårjevndøgn, er  $\Omega = 0$ . Kommer den opp lengre øst, er  $\Omega$  positiv.

## De seks baneparametrene

Vi har nå bestemt orienteringen av baneplanet ved hjelp av parametrene

**$\Omega$  = rektasensjon for oppstigende knute**

i = inklinasjon



Så har vi bestemt størrelse, form og orientering av den ellipseformede satellittbanen:

a = den lange halvaksen

**e = eksentrisiteten**

**$\omega$  = perigeets lengde**

Den siste parameteren er posisjonen for satellitten i banen, og den er en funksjon av tid. De fem øvrige er konstanter når en satellitt beveger seg i et kulesymmetrisk tyngdefelt, det vil si i bane rundt et massepunkt uten andre krefter.

**v(t) = perigeets lengde**

Dette er de seks klassiske baneparametrene.

**De klassiske baneparametrerne:**

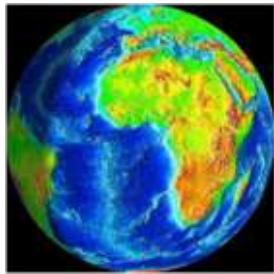
- Hastighet og retning av hastigheten
- I = Inklinasjon**
- Ø = retkassasjon for oppstigende knut**
- Hastighet av høyre på høyre
- a = den lange halvaksen**
- e = eksentriliteten**
- Baneformen av ellipser i universum
- ω = perihelisk lengde**
- Prismer i bane
- v = sans amplitudi (funksjon av tid)**

De klassiske  
baneparametrene  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

# GEO (Geostationary Earth Orbit)

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[GEO \(Geostationary Earth Orbit\) \(24513\)](#)



Satellitter i den geostasjonære bane, eller Clarke-banen som den også kalles, ble spesielt attraktiv for telekommunikasjon og kringkasting. Den dekker en stor del av jordkloden, og figuren viser jordkloden sett fra geostasjonær satellitt INTELSAT 707 på 1 grad vest, baneposisjonen som benyttes av Telenor til TV-kringkasting.

## Egenskaper

- De viktigste fordelene med den geostasjonære banen er: Satellitten står fast i forhold til ethvert punkt på jordoverflaten.
- Det er mulig med en enkel satellitt å bygge et system som gir tidskontinuerlig dekning av et område på jorda.

Ulempene er:

- Avstanden til satellitten er stor.
- Polområdene dekkes ikke.
- Det er trengsel i banen.

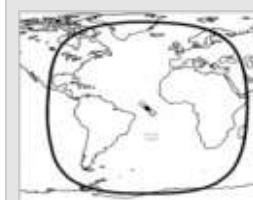
Den geostasjonære banen er en viktig, begrenset ressurs som det kjempes om. Det er ikke tale om fysisk trengsel; satellittene styres i dag meget nøyaktig i sine baner. Her gjelder avstanden i grader.

Utviklingen går i retning av stadig mindre jordstasjoner. Disse har nødvendigvis bredere antennelober, og dermed begrenses oppløsningen i vinkel. Det brukbare frekvensområdet er også begrenset, og da vil det nødvendigvis bli kamp om baneposisjonene.

ITU, den internasjonale teleunionen, forsøkte i 1979 å løse problemene med tildeling av baneposisjon for TV-satellittene ved å gi hvert land en bestemt baneposisjon. At dette forsøket feilet, skyldes bl.a. at interessen for nasjonal dekning var minimal, og at regionale systemer med et stort antall TV-programmer fra ett banepunkt viste seg å være mer attraktive. Eksempel er Telenors satsing på "1 grad vest", EUTELSATs Hotbird-posisjon ved 13 grader øst, og ASTRA-satellittene ved 19.2 grader øst.

Et annet forhold som gjør utnyttelse av banen vanskeligere er at visse områder er spesielt attraktive. I området fra 70 til 75 grader øst vil GEO satellitter være synlig fra Japan til Vest-Europa.

## Baneparametrene



Svalbard ble knyttet til det globale telenettet via satellitt i geostasjonær bane. Elevasjonsvinkelen var under 3 grader. Dekningsområde for en geostasjonær satellitt i posisjon 30° vest. Konturen viser grensen for området med 10° elevasjon. For mange anwendelser er det mulig å operere med lavere elevasjonsvinkler.  
Opphavsmann: [Public domain](#)

Den geostasjonære banen er sirkulær,  $e = 0$ , den ligger i ekvatorialplanet,  $i = 0$ . Radianen  $a$  kan finnes av Keplers 3. lov, men da må vi bruke korrekt verdi for omløpstiden. I løpet av 24 timer roterer jordkloden mer enn  $360^\circ$ . Det skyldes at sola beveger seg østover på fiksstjernehimmelen med ca.  $1^\circ/\text{dag}$ , eller  $360^\circ/\text{år}$ . Rotasjonstiden i forhold til fiksstjernene, det vi kaller et stjernedøgn, er litt kortere, 23 timer 56 minutter og 4,1 sekunder, eller 86 164 sekunder.

Setter vi denne verdien inn i uttrykket for omløpstid finner vi at baneradien er 42 164 km. Det er ca. 6,61 ganger jordradien.

## LEO (Low Earth Orbit)

Forfatter: Gunnar Stette

[LEO \(Low Earth Orbit\) \(9569\)](#)



Lav jordbane, LEO (Low Earth Orbit).

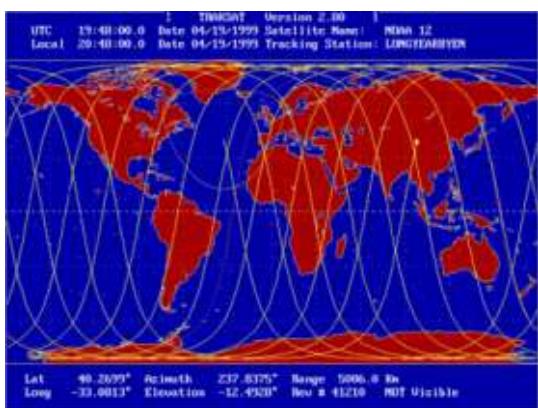
Lave jordbaner (LEO = Low Earth Orbit) er satellittbaner som beveger seg nær jordoverflata, men tilstrekkelig høyt til at friksjonen i atmosfæren er neglisjerbar. Mange lavbanesatellitter går i polbaner, det vil si med en baneinklinasjon nær 90 grader. Satellittbanen ligger fast i verdensrommet mens jorda roterer en gang i løpet av 1 døgn. Det betyr at banesporet, det punktet som til enhver tid er rett under satellitten, beveger over forskjellige områder for hver omdreining, etter som jordkloden roterer. Dermed er det mulig at én satellitt kan observere hele jordkloden i løpet av et døgn, avhengig av banehøyde og hvor langt til sides den ser. Dette er derfor en banetype som er mye brukt av jordobservasjonssatellitter.

### Egenskaper

En lav jordbane (LEO = Low Earth Orbit) vil oftest være tilnærmet sirkulær, og høyden må minst være tilstrekkelig til at friksjonen i atmosfæren ikke blir for stor, det vil si minst 200 til 300 km.

Baneradien, og dermed den lange halvaksen,  $a$ , blir da  $6378 + 300 = 6678$  km. Omdreiningstiden blir da ca. 100 minutter, og satellitten gjør 14 omdreininger per døgn. Eksentrositeten for en sirkulær bane er 0.

Figuren viser hvor banesporet, punktet rett under satellitten, beveger seg i løpet av et døgn for en jordobservasjonssatellitt, ENVISAT, med en inklinasjon på 98 grader.



Banespor for lavbanesatellitter  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

### Minimum banehøyde

Tettheten av atmosfæren varierer ikke bare med høyden. Den er også bestemt av posisjon på jordkloden, årstid, tid på døgnet, solaktiviteten og av det vi på bakken kaller værforholdene. Dessuten vil friksjonen for en satellitt være bestemt av formen på satellitten, idet en satellitt på samme måte som et fly ville kunne få både bremsende krefter og "løft" på grunn av luftmolekyler som den kolliderer med. Jordmassen er ujevnt fordelt i jordkloden.

Sputnik 1 hadde en perigeumhøyde på 215 km og en apogeumhøyde på 939 km, og den kom inn i atmosfæren og brant opp etter 6 måneder. De siste Apollo-prosjektene brukte en høyde på parkeringsbanen på 172 km, og da vil tid i bane dreie seg om fra timer til en dags tid.



Banehøyde for den internasjonale romstasjonen - ISS

Opphavsmann: [NASA](#)

Figuren viser banehøyden for den internasjonale romstasjonen, ISS, middelverdi for hvert omløp. Høyden synker gradvis som funksjon av tiden på grunn av friksjon i atmosfæren, men denne oppbremsingen er ikke konstant. Den varierer med tettheten i den ytre atmosfæren, som igjen er bestemt av solaktivitetene. De vertikale linjene viser økning av banehøyden på grunn av avfyring av små rakettmotorer "reboosts".

# Solsynkron baner

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Solsynkron baner \(9574\)](#)



En solsynkron bane dreier seg med ca. 1 grad per dag i østlig retning, økende rektasensjon for oppstigende knute. Da vil baneplanet alltid stå i et fast forhold til sola, og satellitten vil passere over samme sted på samme tid på døgnet.

I et ideelt kuleformet tyngdefelt vil satellittbanen ligge fast. Nå er jordkloden litt flatttrykt, og det fører til at satellitter i lave tilnærmede polbaner får en "ekstra" liten kraftimpuls hver gang de passerer ekvator. Det er forskjellig retning for kraften for nordgående og sydgående passering, og dermed blir disse kraftimpulsene et dreiemoment som forårsaker en dreining av baneplanet. Rektasensjon for oppstigende knute,  $\Omega$ , vil dermed variere.

Når inklinasjonen er mindre enn  $90^\circ$ , vil verdien av  $\Omega$  avta, og dermed vil kryssingspunktet bevege seg vestover, retrograd bane. Når inklinasjonen er større enn  $90^\circ$ , vil kryssingspunktet bevege seg østover, retrograd bane.

Ved visse kombinasjoner av baneradius og inklinasjon vil  $\Omega$  øke 360 grader per år, eller ca. 1 grad per dag. Da vil satellittbanen (baneplanet) alltid stå i et fast forhold til sola. Vi får da det vi kaller en solsynkron bane.

I en solsynkron bane vil en satellitt passere over samme sted på jordkloden til samme lokale tid året igjennom. Det er da for eksempel mulig å få en satellitt til å bevege seg i lav jordbane uten at den kommer i jordskyggen. Dette er en morgen-kveld-bane.

Det er også mulig å få satellitten til å bevege seg i en middag–midnatt-bane.

## Variasjon av $\Omega$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{-10}{aR} \left( \frac{7}{2} \left( 1 - \varepsilon^2 \right)^2 \right) \cos i$$



Solsynkron\_1  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

## Middag–midnatt-bane



Solsynkron 2  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)



Solsynkron bane, morgen-kveld / flashnode  
<http://ndla.no/nb/node/97937>

Det kan for visse anvendelser være ønskelig at satellittbevegelsen også er synkronisert til jordrotasjonen, slik at den kommer over punkter på jordoverflaten til nøyaktig samme tid på et bestemt tidspunkt etter ett eller flere døgn.

## HEO (Highly Inclined Earth Orbit)

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[HEO \(Highly Inclined Earth Orbit\) \(25017\)](#)



Molniya-banen, som ble brukt i Sovjetunionen for dekning av nordlige områder, tilhører en generell kategori satellittbaner som kalles HEO, Highly Elliptical Earth Orbit. De utnytter Keplers 2. lov som sier at en stor del av omløpstiden tilbringes nær apogeum. En viktig egenskap ved slike baner er at de gir god dekning av områder ved høye breddegrader, og spesielt av polområdene.

### Molniya

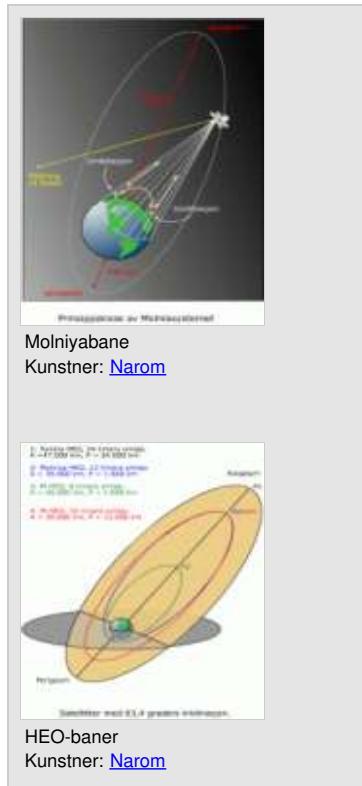
USSR valgte av forskjellige årsaker ikke den geostasjonære banen for sine første kommunikasjonssatellitter. Utskytingsbasen Baikonur ligger på 40 grader nord, og den var derfor et lite effektivt utgangspunkt for geostasjonære satellitter. Det ville kreve ekstra drivstoff å ta ut den store baneinklinasjonen som den høye breddegraden for oppskytingsstedet resulterte i. Dessuten var det mange bosetninger ved høye breddegrader som ville få lave elevasjonsvinkler til de geostasjonære satellittene. Det ble derfor utviklet et system basert på satellitter i baner med

- høy inklinasjon, for å kunne gi god dekning av de nordlige områdene, og
- høy eksentrisitet, for at satellitten skulle "tilbringe" mesteparten av sin tid over disse områdene.

Omløpstiden ble valgt slik at satellitten skulle være geosynkron, altså ha en omløpstid som var synkronisert med jordrotasjonen. Dermed ville den kurven som beskriver bevegelsen av satellittens fotpunkt, banesporet, ligge fast på jordoverflaten. For Molniya-systemet ble omløpstid  $T$  valgt lik 12 timer. Det bestemmer verdien for den lange halvaksen.

Eksentrisiteten velges slik at vinkelbevegelsen ved apogeum er tilpasset vinkelhastigheten for jordrotasjonen. Det sikrer at satellitten står mest mulig fast i forhold til jordoverflata. Høyden over jordoverflaten ved perigeum ble 548 km, og høyden for apogeum 39 957 km. Eksentrisiteten blir da 0,74.

Den tredje parameteren, inklinasjonen, ble bestemt slik at hovedaksen i den elliptiske banen ligger fast i baneplanet, og det krever at  $i = 63,4$  grader som vi ser nedenfor. Dermed ville banesporet ligge fast på jordoverflaten, som figuren viser.





Banespor Molniyabane  
Kunstner: [Narom](#)

Det nordligste punktet er gitt av inklinasjonen, 63,4 grader. På grunn av 12 timers omløpstid er satellitten over den nordlige halvkule to ganger per døgn, og disse stedene er 180 grader adskilt. Den er over Sibir om ettermiddagen og over Canada sent på natten, 12 timer senere.

Den tilbringer størstedelen av sin tid over den nordlige halvkule. Ca. kl. 12.30 passerer den grensen for Sovjetunionen, og ca. kl. 22 forlater den området. Det tar bare vel en time å passere den sydlige halvkule før den kommer tilbake mot Canada.

For å få kontinuerlig dekning med høy inklinasjon ble en tresatellitt-løsning valgt. Når den ene satellitten går ned, kommer en ny opp. De tre satellittene ligger i forskjellige baner som har rektasensjon for oppstigende knute forskjøvet med  $120^\circ$ .

Avstanden til satellitten vil være ca. 40 000 km. Elevasjonen vil være høy, men frittromssvekkingen vil være tilnærmet den samme som for satellitter i den geostasjonære bane. Det vil også være dopplerforskyvning for signalene fra denne satellitten på grunn av den relative bevegelsen mellom satellitt og jordstasjon.

Det er et stort antall satellitter som er plassert i denne banen. Den første, MOLNIYA I, ble skutt opp i april 1965.

#### Andre HEO-baner

Molniya-banen har 12 timers omløpstid, men det er også andre lignende baner med andre omløpstider. Tundra-banen har 24 timers omløpstid, og der er også mulig å benytte baner ned 8 eller 6 timers omløpstid. Felles for disse banene er at inklinasjonen må være  $63,4^\circ$  for at banen skal ligge fast i baneplanet. Tundra-banen benyttes også av det amerikanske systemet for radiokringkasting fra satellitt, Sirius Satellite Radio. De tre satellittene i konstellasjonen har rektasensjon for oppstigende knute,  $\Omega$ , og midlere anomli,  $M$ , forskjøvet med 120 grader slik at de veksler om å dekke målområdet, som er USA.

#### Perigeumdrift

Grunnen for valg av inklinasjon er irregulærheter i gravitasjonsfeltet som fører til at retningen for hovedaksen i den elliptiske banen langsomt roterer. Dermed forandres perigeets lengde,  $\omega$ .

Perigeumdriften er null ved en bestemt inklinasjon,  $i = 63,4$  grader, Trondheims breddegrad, for alle verdier av  $a$ ,  $r$  og  $e$ . Det betyr at apogeeum og perigeum ved denne inklinasjonen vil ligge fast.

## MEO (Medium Earth Orbit)

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[MEO \(Medium Earth Orbit\) \(9570\)](#)



©2023-satellittene  
2 baner med innenfor 5 satellitter hver.

Satellitter i midlere jordbane unngår Van Allen-beltene samtidig som de dekker store deler av jorden.

Fra romfysikk vet vi at jorden er omgitt av to belter med høyere konsentrasjon av ladede partikler, Van Allen-beltene. Disse beltene utsetter satellittene for store påkjenninger slik at en forsøker å unngå disse banehøydene. LEO-satellittene er lavere enn det laveste beltet, opp til ca 1 500 km høyde. Det kan være nyttig å ha satellitter som beveger seg i større høyder, blant annet for å kunne "se" en større del av jordkloden. De kan legges mellom van Allen-beltene og kalles MEO-satellitter (MEO = Middle altitude Earth Orbit). Typisk banehøyde er 10 000 km. Et eksempel på slike satellitter er ICO-systemet, som ble foreslått, men aldri realisert.



På grunn av den store høyden i forhold til iridiumsatellittene er det tilstrekkelig med en konstellasjon på 10 satellitter for å få global, tidskontinuerlig dekning. Planen var å benytte dette systemet til mobilkommunikasjon i områder uten dekning av GSM eller lignende systemer.

Satellittene i GPS-systemet går i middelhøye baner, med en banehøyde på 20200 km, baneradius 26600 km, og en omløpstid på et halvt stjernedøgn, synkronisert til jordrotasjonen.

Satellittene i Glonass-systemet og i Galileo-systemet går også i MEO med banehøyder på henholdsvis 19 100 og 23 222 km.

# Satellittkonstellasjoner

Forfatter: Gunnar Stette

[Satellittkonstellasjoner \(28223\)](#)

En satellitt i en geostasjonær bane gir tidskontinuerlig dekning av et bestemt område på jordkoden. For hvilken som helst annen bane vil dekningsområdet forskyve seg på jordoverflata, og dekningen av området blir ikke tidskontinuerlig. Det kan være ønskelig med tidskontinuerlig dekning med satellitter i lavere baner. I så fall må flere satellitter benyttes og de må "fly" i en bestemt formasjon, det som betegnes en "konstellasjon".

## Iridium

Den mest kjente konstellasjonen er Iridium systemet, hvor 66 satellitter i sirkulære baner med 780 km høyde og en inklinasjon på 84 grader gir kontinuerlig dekning av alle punkt på jordoverflata. Systemet opererer med 6 baneplan, og det er 11 satellitter i hvert plan. Dessuten er det én reservesatellitt i hvert plan. Hver satellitt er synlig maksimalt 11 minutter, og når den ene satellitten "går ned" vil en ny satellitt komme opp og overta funksjonen uten at brukeren merker overgangen. For å unngå brudd i forbindelsen må brukeren ha horisonten under en vinkel på 10 grader, og det er ikke tilfelle i kupert terreng eller i byer med høy bebyggelse.



Iridium  
Opphavsmann: [IRIDIUM](#)

## Globalstar

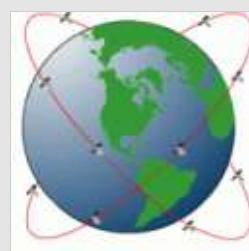
Et lignende system, Globalstar, med samme formål, mobilkommunikasjon, benytter en annen konstellasjon med noe høyere banehøyder, 1410 km. Omløpstiden er 114 minutter og hver satellitt er synlig 16,4 minutter per omløp. Inklinasjonen var også lavere, 52 grader. Dekningsområdet for denne konstellasjonen er begrenset til områder innenfor +/-70 grader geografisk bredde, men i praksis er det mulig å benytte systemet nærmere polene. Det var da tilstrekkelig med 48 satellitter.



Globalstar  
Opphavsmann:  
[Globalstar](#)

## ICO-systemet

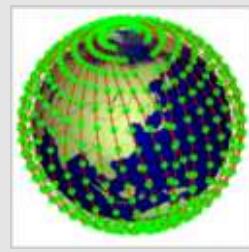
ICO-systemet ble konstruert for global dekning med satellitter i banehøyde 10350 km, som tilsvarer en omløpstid på 6 timer. Satellittene ligger i 2 plan med 45 grader elevasjon. Det var da tilstrekkelig å bruke 10 satellitter, 5 i hvert plan.



ICO-satellittbane,  
2 baneplan inneholder 5 satellitter hver.  
ICO-bane  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Teledesic

Det ble også foreslått et system med 840 satellitter, Teledesic. Banehøyden var 700 km og inklinasjonen 98,16 grader. Hver satellitt var synlig mellom 2,32 og 3,40 minutter.



Teledesic  
Opphavsmann: [Public  
domain](#)

Anvendelsen var her datakommunikasjon, internetttilgang, og brukere skulle sikres å se minst én satellitt med minimum 45 grader inklinasjon til enhver tid på hvert sted på jordkloden. Forskjellige problemer førte til at systemet ikke ble realisert i sin opprinnelige form.

## GPS

Satellittene i navigasjonssystemet GPS flyr også i en konstellasjon som skal sikre god dekning og god posisjonsbestemmelse over hele kloden.

Satellittene går i 6 sirkulære 12-timer baner. Banehøyden er 20200 km og inklinasjonen er 55 grader. Den normale konstellasjonen er 4 satellitter i hvert plan, tilvarende et totalantall på 24 satellitter. Satellittene i hvert baneplan er fordelt på en slik måte at de skal gi best mulig dekning over hele jordkloden.



# TLE - Baneparametre på standard form

Forfatter: Gunnar Stette

[TLE – baneparametre på standard form \(24520\)](#)

Hvor er en bestemt satellitt på et bestemt tidspunkt? Dette spørsmålet kan dukke opp i forbindelse med nedlasting av data fra satellitter, eller ved undersøkelser av dekningsområder. Svaret er gitt av baneparametrene, og disse er tilgjengelig på standard form som et TLE (Two Line Element) som brukes av de forskjellige dataprogrammene for sporing av satellitter. Slike programmer er tilgjengelig på Internett, både som betalprogram og som gratis programvare.

Banedata for satellitter i jordbane gis på et standardformat, TLE. NORAD, the North American Air Defence Agency, bestemmer og oppdaterer disse parametrene for et stort antall satellitter, om nødvendig flere ganger per uke.

TLE-data kan hentes inn fra mange kilder på Internett, f.eks. fra nettstedet Celestrak (se lenke). Her er også forskjellige programmer for baneberegnning og satellittracking.

TLE data er gitt på ASCII-format og har følgende format:

AAAAAAAAAAA

1 NNNNUU NNNNNAAA NNNNN.NNNNNNNN +.NNNNNNNN +NNNNN-N +NNNNN-N

N NNNNN

2 NNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NNNNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN

NN.NNNNNNNNNNNNNN

Den første linja er et navnefelt med 11 tegn. Linje 2 og 3 er standard TLE dataformat slik det benyttes av NASA og NORAD.

## Line 2

Column Description

01-01 Line Antall of Element Data

03-07 Satellite Antall

10-11 International Designator (Last two digits of launch year)

12-14 International Designator (Launch number of the year)

15-17 International Designator (Piece of launch)

19-20 Epoch Year (Last two digits of year)

21-32 Epoch (Julian Day and fractional portion of the day)

34-43 First Time Derivative of the Mean Motion (rev/day^2) or Ballistic Coefficient (Depending of ephemeris type)

45-52 Second Time Derivative of Mean Motion (Blank if N/A)

54-61 BSTAR drag term if GP4 general perturbation theory was used. Otherwise, radiation pressure coefficient.

63-63 Ephemeris type

65-68 Element antall

69-69 Check Sum (Modulo 10)

## Line 3

Column Description

01-01 Line Antall of Element Data

03-07 Satellite Antall

09-16 Inclination [Degrees]

18-25 Right Ascension of the Ascending Node [Degrees]

27-33 Eccentricity (decimal point assumed)

35-42 Argument of Perigee [Degrees]

44-51 Mean Anomaly [Degrees]

53-63 Mean Motion [Revs per day]

64-68 Revolution antall at epoch [Revs]

69-69 Check Sum (Modulo 10)

Alle epoker er UTC (se nedenfor). Legg merke til at den lange halvaksen ikke er oppgitt. Til gjengjeld angis antall omløp per 24 timer eller 86400 sekunder (1 soldøgn). Et eksempel på TLE-data er vist nedenfor.

Two Line Element Set (TLE):  
Juliansk dato, år og dag (år 2009 dag 257, 10590010)  
ENVISAT  
1 27386U 02007A 09257.10590010 -.00006032 00000-0 42927-5 0 3287  
2 27386 098.5216 323.1979 0001115 084.2681 275.8631 14.32251199394221  
Inklinasjon 98,5416° Eksentrisitet 0,001115 Midlere anomalie  
Rektasensjon for oppstigende knute  $\Omega$  Perigeets lengde

Eksempel på TLE-data  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

TLE-data for ENVISAT

## Juliansk dato

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Juliansk dato \(24459\)](#)



Kalendertid med år, måneder, dager, timer og minutt er uhåndterlig ved numeriske beregninger av tidsforløp og tidsdifferanser. Det vi ønsker å ha, er en felles skala med et antall veldefinerte tidsenheter fra et felles referansepunkt. Med en slik skala kan vi finne tidsintervaller med en enkel subtraksjon av tidsenheter, og her kommer Juliansk dato inn.

Lokal tid varierer med et heltallig antall timer mellom tidssonene på jorda, og forandres i deler av året (sommertid). For å ha en felles tidsreferanse på hele jordkloden benyttes Universal Time (UT), som tidligere ble kalt Greenwich Mean Time (GMT). Den er 1 time mindre enn norsk normaltid og to timer mindre enn norsk sommertid. UTC, Universal Time Coordinated, er for alle praktiske forhold lik UT.

Innen astronomien benyttes en slikt tidsskala som kalles Juliansk Dato (JD). Tidsangivelsen blir da et antall tidsenheter, i dette tilfellet dager, fra referansepunktet som er klokka 12, Greenwich Mean Time, den 1. januar år 4713 BC. Grunnen til å velge middag i stedet for midnatt var at astronomene gjorde sine observasjoner om natta, og da ville det være upraktisk å skifte dato midt i observasjonsperioden.

Referansetidspunktet er altså middag 0. januar, som er 31. desember året før. Dermed vil det nøyaktige tidspunktet for ethvert årsskifte ha JD som ender på xxx,5. For mange praktiske beregninger er det innført en modifisert Juliansk Dato. For det første trekkes fra 2 400 000 dager. Dessuten trekkes fra en verdi på 0,5 som flytter starttidspunktet fra middag til midnatt.

Det finnes flere steder på Internett som beregner sammenhengen mellom modifisert Juliansk dato og Gregoriansk dato, se ekstern ressurs.

Juliansk dato, JD, for begynnelsen av hvert år er tabulert i mange almanakker. Begynnelse-tidspunktet for år 2009 i Juliansk Dato er gitt som  $2400000 + 54831,5$ . Et tidspunkt dette året finnes ved å legge til dag nummer for det aktuelle året, og den aktuelle del av en dag som kommer i tillegg, gitt som desimalbrøk.

Dette merkelige starttidspunktet ble foreslått av en lærde italiener, Giuseppe Scalinger, i 1582, som begynnelsen på en Juliansk periode på 7980 år. Denne perioden er gitt som produktet av tre tall:

- solsyklusen, som er det antall år som går før alle ukedagene faller på de samme datoene, 28 år,
- månesyklusen, som er gitt av antall månemåneder, 19 per år, og
- den skatteperioden på 15 år som ble innført av keiser Constantin i år 313.

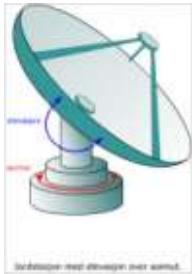
Den forrige gang disse periodene startet samtidig, var i 4713 f.Kr. og den neste ville bli i år 3267 e.Kr.



# **Retning og avstand til satellitter**

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

## Retning og avstand til satellitter (47162)



Når vi skal angi retninga fra en jordstasjon til en satellitt, bruker vi ofte parametrerne asimut og elevasjon, som stammer fra artilleriet. Disse kan vi beregne når vi har bestemt posisjonene for satellitten og jordstasjonen i samme referansesystem.

## Hvordan styres antennene?

Breddegradene for F og T er vinkelavstand mellom ekvator og punktene, målt langs meridianer gjennom punktene, henholdsvis  $(90 - b)$  og  $(90 - c)$  grader. Meridianene er definert ved verdiene for lengdegradene, F og T.

Figuren viser også forbindelseslinjen mellom punktene F og T, som er en del av en storsirkel. Den sfæriske trekanten PTF har sidene a, b og c, alle angitt i grader. Vinkelen a kalles jordsentervinkelen. **For beregning av elevasjonen er det nødvendig å finne vinkelen a i trekanten Satellitt - Origo - T.**

En sfærisk trekant har tre andre vinkler, hjørnene i trekanten på kuleoverflata. Vinkelen  $\alpha$  tilsvarer forskjellen i lengdegrad mellom punktene F og T. **Vinkelen  $\gamma$  er (360 grader - asimutvinkelen)** ut fra definisjon av nullretningen for asimut, som er nord, og med økende vinkel med urviseren.

Vinkelen  $\beta$  har å gjøre med den retning satellitten "ser" jordstasjonen. Den kan kalles klokkevinkel og angir retning fra nadir-punktet til jordstasjonen i forhold til nord.

Med kjent posisjon for satellitt og jordstasjon er  $\alpha$ ,  $b$  og  $c$  gitt. Verdien for  $a$  kan da beregnes ved hjelp av cosinussetningen i sfærisk trigonometri

$$a = \arccos(\cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos \alpha)$$

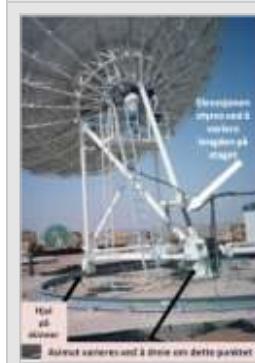
Vinkelen gamma,  $\gamma$ , kan beregnes av den sfæriske formen for sinussetningen:

$$\gamma = \arcsin \left( \sin c \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin a} \right)$$

Ved de numeriske beregningene er det nødvendig å passe på at vinklene faller i de riktige kvadrantene, ved å velge riktig verdi for  $\gamma_0$ . Når jordstasjonen har høyere breddegrad og lengdegrad enn fotpunktet for satellitten, vil  $Y_0$  være 180 grader. Hva er verdien for  $Y_0$  i de tre andre kvadrantene?

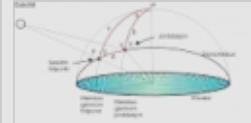
$$\text{Asimut} = 360 - \gamma$$

## Beregning av elevasjon



Antennestyring basert på "hjul på skinne" for en jordstasjon med 12 m antennendiameter.  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

## Sfærisk trigonometri



Opphavsmann: Gunnar Stette

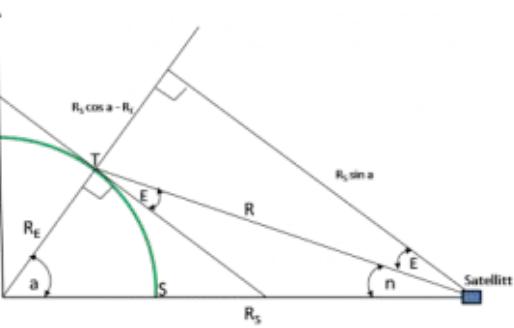
## Cosinussetningen

$$\cos(a) = \cos(b) \cdot \cos(c) + \sin(b) \cdot \sin(c) \cdot \cos(\alpha)$$

Tilsvarende gjelder for  
 $\cos b$  og  $\cos c$ .

## Sinussetningen

$$\frac{\sin a}{\sin \alpha} = \frac{\sin b}{\sin \beta} = \frac{\sin c}{\sin \gamma}$$



Figuren viser trekanten jordsentrums - jordstasjon - satellitt. Denne trekanten ligger i storsirkelbuen. Vinkelen  $\alpha$  er jordsentralvinkelen. Når jordstasjonen har en høyde  $h$ , må  $R_E$  erstattes av  $(R_E+h)$ .

Elevasjonsvinkelen,  $E$ , kan beregnes

$$\operatorname{tg} E = \frac{R_s \cdot \cos \alpha - R_E}{R_s \cdot \sin \alpha}$$

Beregning av avstanden til satellitten

Avstanden  $R$  fra jordstasjon til satellitt kan beregnes av

$$R^2 = (R_s \cdot \cos \alpha - R_E)^2 + (R_s \cdot \sin \alpha)^2$$

Beregning av nadirvinkel og klokkevinkel

Vinkelen,  $n$ , sett fra satellitten, mellom retningene til fotpunktet og retning til jordstasjonen, **nadirvinkelen**, kan beregnes fra jordsentralvinkelen,  $\alpha$ , og elevasjonsvinkelen  $E$ .

$$\alpha + 90 + E + n = 180$$

**Klokkevinkelen**,  $\beta$ , som vist på den øverste figuren, kan beregnes fra

$$\frac{\sin \beta}{\sin b} = \frac{\sin \alpha}{\sin a}$$

$$\beta = \operatorname{arc} \sin \left( \sin b \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin a} \right)$$

Polarisasjonsvinkelen

Anta at en geostasjonær satellitt sender eller mottar lineært polariserte (f.eks. vertikalt polariserte) bølger. En jordstasjon på samme lengdegrad og som har antennen for samme lineære polarisasjonsretning, vil ha perfekt polarisasjonstilpasning.

Hvis satellitten skulle bevege seg i ekvatorialplanet samtidig som jordstasjonen beholdt sin (vertikale) polarisasjonsretning ville det oppstå en polarisasjonsfeil. Dette er åpenbart hvis jordstasjonen ligger på ekvator. Jordstasjonen måtte da orientere antennen slik at asimut ble 90 eller 270 grader, avhengig av om satellitten var østenfor eller vestenfor jordstasjonen. Et vertikalt polarisert signal fra satellitten ville i dette grensetilfellet mottas med horizontal polarisasjon, altså med en polarisasjonsfeil på 90 grader. For jordstasjoner på andre breddegrader ville polarisasjonsfeilen være mindre enn 90 grader.

Tangens til polarisasjonsfeilen for en geostasjonær satellitt er gitt av

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin L}{\operatorname{tg} \varphi_T}$$

$L$  er forskjellen i lengdegrad mellom satellitt og jordstasjon, og  $\varphi_T$  er breddegraden for jordstasjonen.

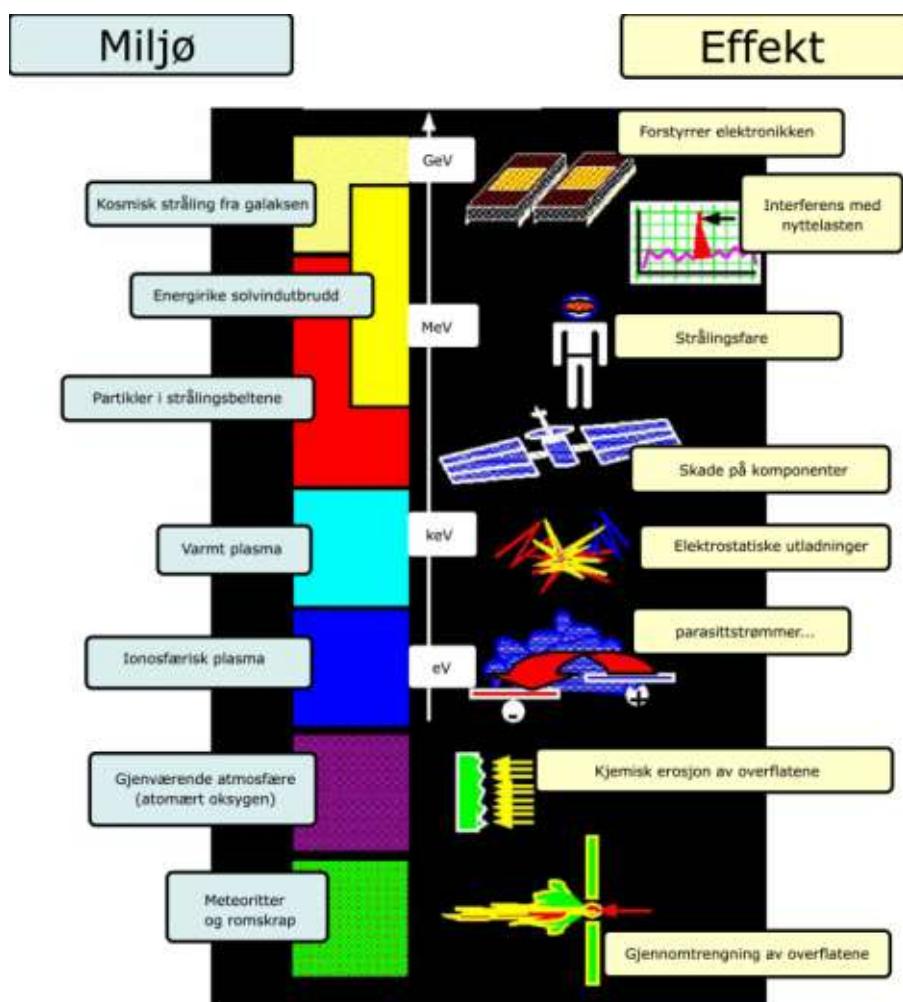
# Miljøet i rommet

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Miljøet i rommet \(9576\)](#)

En satellitt i bane rundt jorda befinner seg i et krevende miljø, og de påkjenningene den utsettes for har stor innflytelse på konstruksjon, drift og levetid for satellitten. Det er naturlig å dele miljøfaktorene inn i forskjellige kategorier.

## Miljøpåkjenninger



Oversikt over miljøfaktorer

Opphavsmann: [ESA](#)

- Mekanisk påvirkning som forandrer baneparametrene. Disse kreftene skyldes avvik fra kulesymmetri i tyngdefeltet for jorda og tyngdefeltet til andre himmellegemer, spesielt måne og sol. Dessuten vil utsendelse eller refleksjon av elektromekaniske bølger, radiobølger og sollys, gi en mekanisk kraft på en satellitt. Det vil også oppstå mekaniske krefter når en satellitt beveger seg i de øverste lagene av atmosfæren eller i magnetfeltet rundt jorda.
- Termisk påvirkning på grunn av absorbert varmestråling fra andre himmellegemer, først og fremst fra sola, og på grunn av varmestråling mot det kalde verdensrommet.
- Stråling av forskjellig slag, kosmisk stråling og solvind.
- Gjenstander i rommet, fra rester av satellitter og raketter (romsøppel) til meteoritter. Disse kan ha stor hastighet og følgelig stor energi. Dermed kan selv små partikler, som for eksempel støvflak, gjøre betydelige mekaniske skader.
- Påvirkning av den kjemiske sammensetningen i de aller ytterste delene av atmosfæren, spesielt atomært oksygen som fører til kjemisk erosjon av overflater.
- Ionsfærisk plasma er en gass som består av positive og negative partikler, men som utad er nøytral. Den kan føre til ladningsforskjeller på et romfartøy som beveger seg i et slikt medium, og dermed til parasittstrømmer.

Samtidig må det nevnes at noen av disse miljøfaktorene kan utnyttes til drift av satellitten. Krefter på satellitten på grunn av sollyset kan utnyttes til banekorreksjoner i form av en slags "seiling". Magnetfeltet kan utnyttes til retningskontroll av satellitter i lave jordbaner.

# Magnetfeltet rundt jorda

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Magnetfeltet rundt jorda \(9577\)](#)



Jordas magnetfelt er gitt av en magnetisk dipol med moment  $MT = 7,9 \cdot 10^{15}$  Wb m. Den magnetiske dipolen faller ikke sammen med jordaksen, men danner en vinkel på 11,5 grader med den. Den magnetiske nordpolen (sydpolen) ligger nord for Canada og den flytter seg med ca. 15 km per år. Det magnetiske feltet varierer i styrke, og det kan også forandre retning, men det skjer med noen hundre tusen års mellomrom.

Nær jordoverflata i banehøydene for lavbanesatellitter, er magnetfeltet bestemt av denne dipolen. I større høyder, over ca. 15 000 km, vil det være andre feltkomponenter som dominerer. Disse skyldes blant annet strømmer av ladete partikler. Her vil også det magnetiske feltet variere sterkt på grunn av solvind.

Magnetfeltet kan føre til mekaniske krefter på en satellitt. En elektrisk ladning som beveger seg i et magnetfelt, blir utsatt for en kraft som er normalt på både feltretning og hastighetsretning. Hvis satellitten er elektrostatisk ladet, vil det føre til en skyvkraft, og hvis deler av satellitten har forskjellig ladning, vil kraften gi et dreiemoment.

Virkningen er størst for LEO-satellitter, både på grunn av at banehastigheten er høy, og at magnetfeltet er kraftigst nær jorda. Den absolute spenningsforskjellen vil avhenge av dimensjonene på satellitten. Slik spenningsforskjell vil generere elektriske strømmer i satellitten, og det er ikke ønskelig.

Magnetfeltet kan også benyttes til å måle og til å styre pekeretningen for en satellitt. Dette prinsippet blir mye brukt på små satellitter i lavbane. Nøyaktigheten er ikke stor, men utstyret er til gjengjeld ganske enkelt. Når en spole beveger seg på tvers av magnetlinjene, induseres en strøm i spolen. Når den beveger seg den andre veien, induseres en strøm i motsatt retning. Når spolen er slik orientert at de magnetiske feltlinjen ikke går gjennom spolen, induseres ingen strøm.

Motsatt vil det være mulig, ved hjelp av strøm i en spole i et magnetfelt å skape en kraft som påvirker satellitten, eller for å oppnå et dreiemoment som kan vende på satellitten.

# Nøytral atmosfære

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Nøytral atmosfære – vakuum \(9579\)](#)

Tettheten i atmosfæren avtar med høyden, og over 300 km har vi det vi på jorda ville kalle høyvakuum.

Antallet molekyler per volumenhett er redusert med en faktor  $10^{10}$ . Dessuten forandres sammensetningen av atmosfæren med høyden. Noen av disse gassene kan ha skadelige virkninger på visse materialer i satellitter.

## Friksjon

Atmosfæren forårsaker en friksjon som er av stor betydning for lavbanesatellitter. Kraften har to komponenter. Den ene reduserer hastigheten, og denne kraften er proporsjonal med det effektive arealet for satellitten og tettheten i atmosfæren. For å beregne det effektive arealet er det nødvendig med en nøyaktig analyse av satellittkroppen for å se hvordan kollisjon med molekylene foregår. Dette friksjonsleddet kalles "drag term" på engelsk. Som vist på figuren varierer tettheten sterkt med høyden over jordoverflata. Dessuten varierer den med sted, tid på året, tid på dagen og solaktiviteten. Derfor er det vanskelig å forutsi når en satellitt vil komme inn i atmosfæren og brenne opp eller falle ned.

Kraften på grunn av atmosfæren kan også ha en komponent normalt på fartsgrensen, og denne kan også gi et løft av satellitten, som for et fly, eller få den til å "stuge" ned mot jordoverflata.

## Atomær gass

Tettheten for molekulær gass avtar raskere enn tettheten for atomær gass. I noen hundre kilometers høyde, hvor satellitter og romferga flyr, er tettheten for molekulært oksygen, O<sub>2</sub>, mindre enn en prosent av tettheten for oksygen i form av enkelte atomer, AO (atomært oksygen). Tettheten varierer sterkt med solflekkaktiviteten.



Atmosfæren / flashnode  
<http://ndla.no/nb/node/97938>

Frie oksygenatomer fører til korrosjon av visse materialer og er et problem i lave jordbaner. Romferga hadde slike skader på den del som kunne kalles baugen da den "pløyde" den tynne atmosfæren. Det forårsaker også det som kalles "spacecraft glow", et lysfenomen man arbeidet lenge med å fastslå opphavet til. Slikt lys kan forstyrre optiske instrumenter. Det finnes også andre gasser på atomær og molekulær form, helium, argon og nitrogen.

## Fordampning av materiale

Ved å klikke på gasstypene under figuren ser du hvordan tettheten varierer med høyden i forhold til tettheten i lav høyde.

Når høyden øker, er det atomær gass som blir dominerende. Legg spesielt merke til at tettheten for AO (atomært oksygen) avtar langsomt med høyden. Tettheten for de forskjellige gassene er også avhengig av solflekkaktiviteten.

I det interplanetariske rom antas gasstrykket å være  $10^{-18}$  N/m<sup>2</sup>, som tilsvarer ca.  $10^{-16}$  mm Hg. I det interstellare rom antas gasstrykket å være mindre enn  $10^{-27}$  N/m<sup>2</sup>. Det høyvakuum man har i rommet fører til at materialer lett fordamper, og det kan igjen føre til elektriske kortslutninger og forandring av overflateegenskaper som kan føre til degradering av speil og solcellepaneler.

# **Ionisert atmosfære, plasma**

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Ionisert atmosfære – plasma \(9580\)](#)

Den øvre delen av atmosfæren består av nøytrale gasser og plasma. Plasma er ioniserte gasser som har liten energi, mindre enn 100 KeV, og som ikke lager spesiell strålingseffekt.

## Plasma

Det er to hovedtyper plasma som har betydning for satellitter i jordbaner:

- høy tetthet, størrelsesordenen  $10^6$  per cm<sup>3</sup> ved ekvator, og lav energi (0,1 eV), som vi finner i ionosfæren ved magnetisk ekvator i ca. 300 km høyde, og
- høy energi (5 til 20 KeV) og lav tetthet (<1 per cm<sup>3</sup>), som vi finner i forbindelse med geomagnetiske stormer.

Satellitter i lave baner med høy inklinasjon kommer i berøring med nordlyssonen. Da vil de bli utsatt for høyenergiplasma med energi i KeV-området.

Plasma fører til elektrostatisk oppladning av forskjellige deler av en satellitt, selv om plasma totalt sett er elektrisk nøytralt. Typiske bevegelseshastigheter for satellitter i lave jordbaner er 8 km/s. De negative elektronene beveger seg mye raskere, og de vil derfor bombardere satellitten fra alle sider, som om den stod i ro.

De positive ionene derimot, beveger seg langsommere, typisk 1 km/s. Dermed oppstår det en serie kollisjoner med positive partikler som hovedsaklig vil være på forsiden av satellitten, i "baugen". Dermed vil baksiden på satellitten bli mer negativt ladet enn forsiden, og vi får spenningsforskjeller som kan føre til elektriske utladninger med påfølgende skade.

En måte å unngå elektrostatisk oppladning med påfølgende gnistutladning er å bruke elektrisk ledende materiale på overflaten. Dette kan imidlertid ikke brukes på solcellepaneler som er ekstra sterkt utsatt. En mulighet er å dekke solcellene med et nesten gjennomsiktig materiale som for eksempel indiumoksid, som kan redusere den elektriske motstanden og gi en langsom utjevning av elektriske potensialforskjeller.

## Høyenergi partikkelfråsing

Partikler med høy energi, hundrevis KeV, kan forårsake alvorlige skader på satellitter i jordbaner. Slike partikler består hovedsakelig av elektroner og protoner fra det ytre rom og fra solen. Fluks og energi for disse partiklene er hovedsakelig bestemt av høyde over jordoverflaten og av solaktiviteten.

Galaktisk kosmisk stråling består for 90 % av protoner samt noen få alfapartikler. Energien er i GeV-området, mens fluksen er meget lav, for eksempel 2,5 partikler/cm<sup>2</sup>/s.

Solvind består hovedsakelig av protoner og elektroner med lavere energi. Gjennomsnittlig tetthet i rolige perioder er ca. 5 protoner per cm<sup>3</sup> som beveger seg bort fra sola med en hastighet på ca. 400 km/s. Dette tilsvarer en fluks på  $2 \times 10^8$  protoner/cm<sup>2</sup> med en gjennomsnittlig energi på noen keV. I aktive perioder kan fluksverdiene variere med en faktor på 20, og energien kan gå opp til noen hundre MeV.

Høyenergipartikler kan skade elektronikk ombord i satellitter på to måter:

- En mekanisk kollisjon med krystallstrukturen i et halvledergitter kan forårsake feil i krystallstrukturen, som igjen fører til forandrede elektriske egenskaper. Protoner forårsaker mer skade enn elektroner.

- Når positive eller negative partikler trenger inn i en krystallstruktur, fører det til ionisering av materialet. Når slik ionisering akkumuleres, ”samles opp”, kan det etter en tid føre til skade på halvlederkomponenter og på dielektrisk materiale.

Ved siden av langtidsvirkningen av stråling kan vi snakke om momentane forandringer.

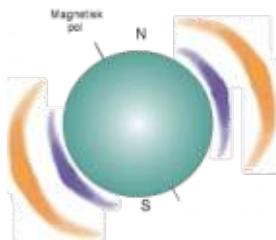
Den vanligste kalles på engelsk Single Event Upset (SEU) og består i at lagrede data forandrer verdi. Dette kan oppdages ved hjelp av feilrettende koder, og så lenge antallet feilaktige bit er tilstrekkelig lite, kan feilene rettes opp. Slike feilrettende koder brukes også ved dataoverføringer for å rette bitfeil.

Single Event Latchup (SEL) består i at en digitalkrets blir skadet på en slik måte at feilen ikke kan rettes opp, og Single Event Burnout (SEB) betyr at en strømforsyning blir skadet slik at det blir kortslutning i systemet.

For å lage stadig mer kompakte elektroniske kretser gjøres dimensjonene stadig mindre. Det fører til at kretsene blir stadig mer sårbare for slike feil. Skjerming av halvlederkomponenter blir dermed stadig viktigere.

## van Allenbeltene

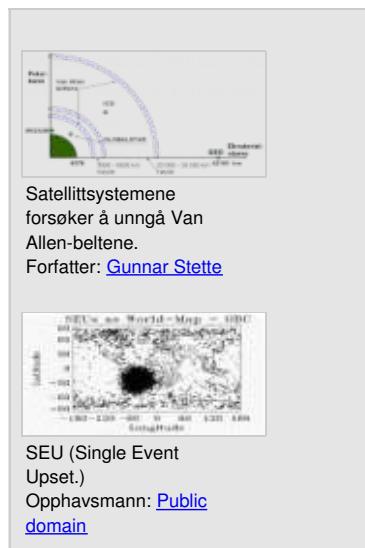
Forfatter: Gunnar Stette, Narom  
[Van Allen-beltene \(9581\)](#)



Van Allen-beltene er to smultringformede strålingsbelter som ligger rundt jorda langs magnetisk ekvator. De består av ladede partikler "fanget" av jordas magnetfelt. Det indre beltet består for det meste av positivt ladede partikler, protoner, mens det ytre beltet består av elektroner. Disse beltene påfører "slitasje" på vesentlige deler av satellitter som passerer beltene.

Van Allen-beltene er to smultringformede strålingsbelter langs geomagnetisk ekvator og består av ladede partikler som er "fanget" av jordas magnetfelt. Sammensetningen av partikkelsamlingen varierer med høyden over jordoverflaten eller avstanden fra jordas sentrum målt i jordradier.

Det ytre Van Allen-beltet (elektronbeltet) inneholder elektroner med energi under 10 MeV injisert av solvinden og varierer sterkt med intensiteten for den. Det strekker seg fra 3 til 9 jordradier med maksimum ved 4. Den største fluksstetthet for elektroner er ca.  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .



Det indre van Allen-beltet (protonbeltet) består for det meste av protoner med en energi over 10 MeV og som stammer fra nedbryting av kosmisk stråling i atmosfæren. Det strekker seg fra 1,1 til 3,3 jordradier og har en maksimal fluks på  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Overgangen mellom disse beltene er ikke skarp.

Protonlaget har ikke samme høyde alle steder. Øst for Sør-Amerika ligger det ekstra lavt. Satellitter som er i dette området, har større sannsynlighet for feil i elektronisk lagret data når de er i dette området. Dette fenomenet kalles ofte den søratlantiske anomali, SAA. Når romferga beveger seg i dette området holder mannskapet seg "innendørs" for å beskytte seg mot strålingen.

Figuren viser SEU (Single Event Upset) for UoSAT-2 i 1989. Den gikk da i en polbane med høyde 700 km. Det var to typer forstyrrelser som oppstod. Den ene skyldtes påkjenning i protonbeltet øst for Sør-Amerika. Den andre typen forstyrrelser fant hyppigst sted ved høye breddegrader og skyldtes stråling fra sola og fra verdensrommet. Mens fenomenet i SAA er konstant over året, varierer forstyrrelsene ved høyere breddegrader sterkt med partikelstråling fra sola, og den var særlig sterk i oktober 1989. Figuren er litt misleende på grunn av kartprosjekjonen. Tetheten for SEU ved polene er høyere enn den tetheten kartet viser.

# Varmestråling

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Varmestråling \(9578\)](#)



Utstrålingen fra sola har et bredt spektrum, fra røntgen-stråling til radiobølger i kortbølgelgebåndet. Effekten er betydelig, ca. 1,4 kW per kvadratmeter, og den utsetter en satellitt for store varmepåvirkninger av enkelte deler. Dessuten kan satellitter tilbringe tid i jordskyggen, og det fører til kraftig avkjøling.

Sola stråler som et svart legeme, og når vi regner med all stråling fra ultrafiolett til infrarødt, vil den ha en temperatur på 5 760 grader. 90 % av den utstrålte energien ligger innenfor et spektrum mellom bølgelengder 0,3 og 2,5 mikron, med maksimal intensitet nær 0,5 mikron. I dette spektralområdet varierer ikke utstrålingen særlig mye over den 11-årige solsyklusen. Sola har en tilsynelatende diameter på 32 bueminutter.

En satellitt i en jordbane vil motta en fluks på  $1\ 371\ W/m^2$  når avstanden er lik gjennomsnittavstanden fra jorda til sola, som kalles 1 IAU (International Astronomic Unit). Denne intensiteten kalles også solkonstanten. Avstanden fra jord til sol varierer med  $\pm 1,7\%$  over året. Siden fluksen varierer med kvadratet av avstanden, vil den variere med  $\pm 3,4\%$ .

Stråling fra jorda består av reflektert solstråling (albedo) og egenstråling, varmestråling, som skyldes at jorda er et varmt legeme. Egenstrålingen fra jordoverflata tilsvarer den som kommer fra et legeme med en temperatur på 288 K, mens tilsvarende verdi fra atmosfæren, når den er uggjennomtrengelig på grunn av skyer, er 218 K. Gjennomsnittlig verdi ligger på ca. 255 K. Dette er i det infrarøde området, og bølgelengden er hovedsaklig i området 10 til 15 mikron. Drivhuseffekten er knyttet til det forhold at den infrarøde utstrålingen hindres av atmosfæren, mens solstrålene rundt 0,5 mikron slipper igjennom inn til jorda.

Jordstrålingen i den avstand fra jorda som tilsvarer den geostasjonære bane, utgjør mindre enn  $40\ W/m^2$ , og det er betydelig lavere enn solstrålingen. I lave jordbaner derimot kan jordstrålingen ha betydelig innflytelse på den termiske balansen i en satellitt. Det skyldes at jorda fyller en mye større romvinkel.

Verdensrommet forøvrig er kaldt, ca. 4 K, eller ca. -269 grader Celsius. Det betyr at de flatene på en satellitt som vender mot verdensrommet, blir utsatt for en kraftig avkjøling.

Ved siden av sollyset kan vi si at en satellitt er omgitt av en viss romvinkel jord med temperatur 255 K og i resten av romvinkelen et verdensrom med en temperatur på 4 K.

Når en satellitt kommer inn i jordskyggen, vil temperaturen synke raskt. Lavbanesatellitter kan tilbringe en stor del av tiden i jordskyggen, mens geostasjonære satellitter vil passere jordskyggen i løpet av opp til 70 minutter rundt midnatt noen døgn omkring vår- og høstjevndøgn.

Ved siden av å påvirke varmebalansen i satellitten vil kraftig solstråling føre til lokal oppvarming av en satellitt. Hvis materialet utvider seg som følge av oppvarmingen, kan det føre til mekaniske deformasjoner. Det kan blant annet føre til at antennereflektorer forandrer form og da vil de ikke lenger være perfekte speil for radiobølgene. Konsekvensen er redusert antennevinning og kanskje avvik i stråleretning.



# Romsøppel

Forfatter: Gunnar Stette, Narom  
[Romsøppel \(11192\)](#)



I perioden oktober 1957 til utgangen av 2009 ble det skutt opp ca. 6 000 satellitter, og ved inngangen til år 2010 ble ca. 800 av disse regnet for å være aktive. Denne aktiviteten har ført til at et stort antall gjenstander, utbrukte satellitter og deler av bæreraketter samt partikler fra sotflak til slagg fra rakettmotorer går i baner rundt jorda. Dette betegnes som romsøppel.

I tillegg er det mikrometeoritter med høy hastighet i rommet rundt jorda. På grunn av de høye hastighetene vil et treff av selv en liten partikkel gjøre store skader.

NASA antar at antall gjenstander med en størrelse på over 10 cm i 2009 er 19 000, antallet gjenstander med størrelse mellom 1 og 10 cm ca. 500 000. Den kinesiske romorganisasjonen antar at antall partikler større enn 1 mm er omrent 40 millioner. Det er størst bekymring for partiklene mellom 1 og 10 cm. De er for mange til å bli kontinuerlig overvåket, og de kan gjøre enorme skader på et romfartøy.

## Meteoritter

Vi skjelner mellom meteoritter, som stammer fra verdensrommet, og romsøppel eller skrap som er resultatet av menneskelige aktiviteter. Med meteoritter mener vi legemer som stammer fra andre himmellegemer, og som befinner seg i det interplanetariske rom nær jorda. Hastigheten kan være i området fra 11,1 km/s, som er den andre kosmiske hastighet ved jordoverflata, til flere titalls km/s. For partikkeldiametre mindre enn 1 millimeter er tettheten av meteoritter høyere enn for menneskeskapt søppel.

Det er laget en modell for strømmen av meteoritter (Grün et al. 1985). Den viser at antallet som strømmer gjennom en flate på  $1 \text{ m}^2$  per år, er  $10^{-7}$  for 1 grams partikler og 1 per  $\text{m}^2$  per år for partikler på  $10^{-5}$  gram, tilsvarende 0,01 mikrogram. Dette gjelder for det område jordkloden befinner seg i i forhold til sola, og uten å ta hensyn til selve jordkloden som delvis vil skjerme for meteoritter og delvis tiltrekke meteoritter på grunn av tyngdekraften. Det vil i tillegg være variasjon i tettheten gjennom året, når jorda treffes av meteorsvermer. For partikler større enn 1 mm er det menneskeskapt romsøppel som dominerer.

## Typer avfall

De største gjenstandene i baner rundt jorda er satellitter som ikke lenger er i bruk, og deler av raketttrinn. Her er det tale om gjenstander som kan observeres både i LEO og i GEO. Baneparametrene er kjent og de registreres i kataloger slik at eventuelle kollisjoner med andre satellitter kan varsles. Det samme gjelder mindre gjenstander med størrelse fra 10 cm og oppover i LEO.

Andre gjenstander i rommet kan være mindre deler av satellitter og raketts, som deler som skyldes bruk av eksplosiver, blant annet for å skille deler av en bærerakett. Gjenstander med diameter på fra 1 cm til 10 cm representerer et stort problem. De er for små, og for mange, til at de kan katalogiseres enkeltvis. Samtidig er hastigheten så stor at en kollisjon kan skape enorme skader.

### Alta-meteoritten

I 1902 ble det i Alta funnet en meteoritt i to deler. Den tyngste veide 77,5 kg og den minste 1,1 kg. På verdensbasis finnes 5–10 meteoritter hvert år.

Antisatellittvåpen produserer mye skrot!

Det finnes også mindre menneskeskapte partikler, som blant annet kan være biter av maling, sotpartikler eller slagg fra forbrenning i rakettmotorer. Astronauter har også mistet forskjellige gjenstander, som kamera, hanske, tang og tannbørste, uten at dette har bidratt så mye til å øke sannsynligheten for kollisjon i rommet.

### Forhold i LEO

Her er det god kjennskap til gjenstander ned til 10 cm, og det er mulig, om nødvendig, å foreta unnvikende manøvrer. For mindre gjenstander er det nødvendig å beskytte seg på forskjellige måter. En metode er å bruke et skjold som får partiklene til å eksplodere, forhåpentligvis uten at restene fra eksplosjonen har for stor hastighet, slik at neste overflate greier å stoppe delene. Partikkeltastigheten kan være på flere km per sekund. Romferja forsøker å fly på en slik måte at den mest robuste enden er rettet mot forventet partikkeltstrøm.

### Forhold i GEO

I GEO-ringen kan objekter med størrelse ned til 50 cm observeres ved hjelp av optiske teleskop og radar, og de blir katalogisert. ESA har et teleskop på fjelletoppen Teide på Kanariøyene, og det kan detektere gjenstander ned til 15 cm i den geostasjonære ringen. Satellitter som er tatt ut av drift, vil langsomt forandre bane, men farene for kollisjoner eksisterer. Kollisjonshastigheten vil imidlertid være mye lavere, kanskje 100 meter per sekund. Kollisjoner er da mindre dramatiske, men de kan føre til skader på satellittene.

### Hva kan gjøres?

Problemet med romsøppel øker stadig, og det arbeides med forskjellige tiltak for å redusere økningen. For det første må utforming av satellitter og bæreraketter være slik at de nødvendige operasjonene, som adskillelse av trinn etc. ikke unødvendig skaper løse deler som frigjøres. Brenselprosessen må også gjøres slik at generering av slaggpartikler reduseres.

Satellitter i LEO bør ikke ha en levetid i rommet på mer enn 25 år. Bruk av drivstoff for reduksjon av hastigheten når de tas ut av drift vil sikre at de kommer inn i atmosfæren og brenner opp. Dette gjennomføres for iridium-satellittene. Alternativt bør de utstyres med elementer som øker friksjonen i den øvre delen av atmosfæren, eventuelt som kan tas i bruk når brukstiden er omme, som ballonger.

For satellitter i GEO er det anbefalt å flytte satellittene til en høyere bane, gravbane, og dette gjøres for mer enn 50 % av satellittene. Kostnadene for dette er drivstoff tilsvarende 3 måneder banekontroll, og dermed 3 måneder tapt driftstid.

Når det gjelder de små partiklene, så vil de først forsvinne i de laveste banene. Forholdet mellom tverrsnitt og masse øker for de små partiklene, og dermed vil oppbremsing på grunn av luftmolekylene være mest effektivt.

### Er det mulig å fjerne skrot fra rommet?

Risikoene og kostnadene ved skader av romfartøyer er så store at det vurderes å fjerne av gjenstander fra rommet. Flere romorganisasjoner vurderer nå slike prosjekter, men de er teknologisk meget utfordrende.

I 2007 ble en kinesisk værsatellitt i polbane ødelagt av en kinesisk satellittprosjekt til som beveget seg i motsatt retning med en hastighet på 8 km/s. Denne operasjonen skapte mer enn 2 300 gjenstander i rommet med diameter på 5 cm, mer enn 35 000 med en størrelse på 1 cm, og over 1 million med størrelse på 1 mm eller større. Dette skapte sterke protester i flere land, ikke minst siden kollisjonen fant sted i 850 km høyde, som er mye bruk av LEO-satellitter. Friksjonen i atmosfæren er lav i slike høyder, og det betyr at søppelet vil være i bane i minst 35 år.

# Satellittplattformer

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellittplattformer \(9587\)](#)

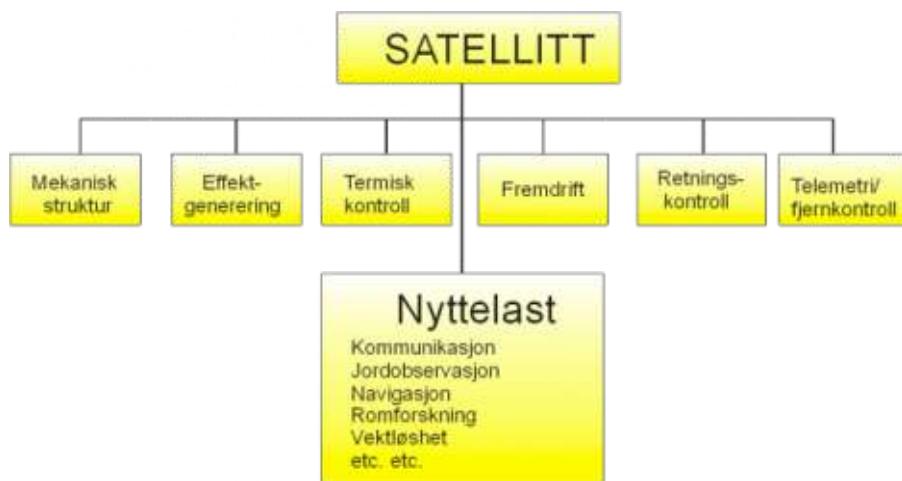
En satellitt i rommet består av to hoveddeler. Den ene delen skal utføre de funksjonene som er bestemt av anvendelsen, og den kaller vi nyttelasten. Den vil være forskjellig for kommunikasjonssatellitter, jordobservasjonssatellitter og navigasjonssatellitter.

Den andre delen, som skal sørge for at nyttelasten får de riktige driftsbetingelsene, kaller vi plattformen. Viktige funksjoner for plattformen er å sørge for at satellitten holder seg i riktig bane, at pekeretningene er korrekt, at det er tilførsel av energi til nyttelasten, at temperaturen er innenfor toleransegrensene og at det er mulig å overføre data mellom plattform/nyttelast og kontrollstasjoner på bakken. Utvikling av satellittplattformer er kostbar, og derfor vil industrien utvikle plattformer som kan brukes til flest mulige anvendelser.

## Funksjoner

En satellitt skal utføre bestemte funksjoner. Det kan være overføring av signaler, som ved satellittkommunikasjon, eller å ta bilder av jordoverflata som ved jordobservasjon, eller observere verdensrommet. Den enheten som skal utføre de bestemte funksjonene kalles nyttelasten.

Men for at nyttelasten kan utføre funksjonene sine må den ha riktige arbeidsbetingelser, den må tilføres elektrisk effekt, den må ha riktig temperatur og den må være i riktig bane og ha riktig retning i rommet. Dessuten må det være mulig å kommunisere med nyttelasten, motta data om tilstanden i nyttelasten og sende instrukser for å gjennomføre visse funksjoner, som forandring av forsterkning eller forandring av retning for et kamera. Hovedkomponentene i en satellittplattform er vist på figuren.



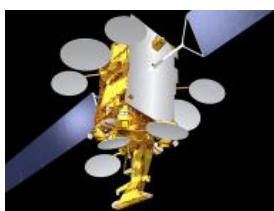
Plattformfunksjoner

Forfatter: [Gunnar Stette](#)

# Plattformtyper

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Plattformtyper \(9588\)](#)

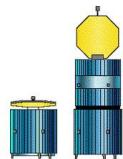


Utvikling av satellitter er enormt kostbart. Derfor vil romindustrien utvikle generelle plattformer som kan brukes til flere formål. Dette gjelder både de store plattformene som brukes til kommunikasjons-satellitter, som Hughes H376, og plattformer for studentsatellitter, som CubeSat. Hovedparametrene for satellittplattformene er hva de kan tilby til nyttelasten, volum, masse og effekt. Dessuten er det av betydning hvordan de kan integreres i forskjellige bæreraketter.

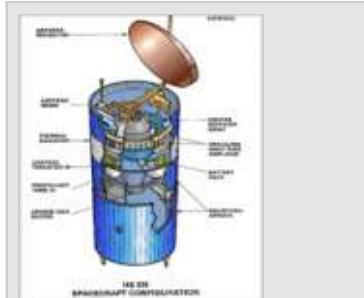
## Store telekommunikasjonssatellitter

Den mest kjente satellittplattformen for kommunikasjonssatellitter er HS 376 fra Hughes Aircraft Corporation. Den er tilgjengelig i mange versjoner, med effekt for nyttelast fra 800 til 2000 W. Inntil 1998 var det bestilt eller bygget 57 plattformer av denne typen.

For å øke overflaten for solcellene er panelene sylinderiske og konstruert som et teleskop. Disse kan trekkes ut når satellitten er i geostasjonær bane. Thor II- og Thor III-satellittene ble bygget på denne plattformen, og Thor III hadde 14 Ku-båndtranspondere med hver 47 watt vandrebølgerørsvorsterkere.



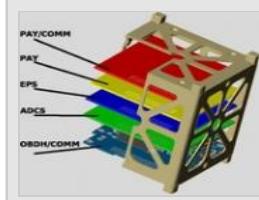
HS 376 Plattform  
Opphavsmann: [Hughes](#), [Boeing](#)



HS 376 Plattform  
Opphavsmann: [Hughes](#), [Boeing](#)



HS 601 satellittplattform  
Opphavsmann: [Hughes](#), [Boeing](#)



HINCUBE, studentsatellitt  
bygget ved Høgskolen i  
Narvik  
Opphavsmann: [HiN](#)  
[Høgskolen i Narvik](#)

Den treaksestabiliserte HS 601 plattformen ble tatt i bruk i 1995 og er den mest solgte plattformen i verden. I grunnkonfigurasjonen kan den levere 4800 watt til nyttelasten, men det finnes også en versjon for spesielt høy effekt og den kan levere 10 000 watt. Den største plattformen, HS 701, kan ta en nyttelast opp til 1200 kg og levere en effekt på 15 kW.

Eurostar-plattformen fra Matra Marconi Space, nå EADS Astrium. Den siste versjonen, Eurostar 3000, er konstruert for en levetid på fra 10 til over 15 år.



Masse ved Eurostar 3000  
oppskyting er opp til Opphavsmann: [EADS Astrium](#)  
4600 kg, og nyttelasten kan være opp til 1000 kg med et effektforbruk på 6 til 12 kW.

## Studentsatellitter

De siste årene har det vært konstruert og skutt opp i bane et stort antall studentsatellitter. Mange av disse har vært basert på bruk av en standard felles mekanisk struktur, CubeSat, med et volum på 1 dm<sup>3</sup> og en masse på maksimalt 1 kg. Det er også utarbeidet standardiserte løsninger når det gjelder integrering i bærerakett og frigjøring fra raketten. Bruk av en standard har gjort det mulig for studentene å konsentrere seg om selve funksjonene i satellitten, inkludert viktige plattformfunksjoner som strømforsyning, retningskontroll, og telemetrisystem.

# Mekanisk konstruksjon

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Mekanisk konstruksjon \(9589\)](#)

Den mekaniske konstruksjonen av en satellitt er viktig for ytelsen for satellitten. Utfordringen er å oppnå den ønskede styrke og stivhet med minst mulig masse. Som en del av den mekaniske strukturen har vi også mekanismer som skal utføre visse operasjoner, enten ved bestemte anledninger eller kontinuerlig gjennom hele levetida for satellitten, uten vedlikehold.

## Krav til mekanisk struktur

Kravene til den mekaniske strukturen er flere:

- **stor styrke mot brudd og varig deformasjon.** Oppskytingsfasen er kritisk med store påkjenninger, både statiske krefter og sterke vibrasjoner. Satellitten må "overleve" denne fasen uten varig skade.
- **stor stivhet.** Plattformen skal være bærer for utstyr hvor blant annet pekeretningen er korrekt. Det gjelder både kommunikasjons- og jordobservasjonssatellitter. Da er det viktig at fundamentet er stødig.
- **lav masse med gitt stivhet og styrke.** Oppskyting er kostbar målt i kroner per kg masse. Når total masse er begrenset, ville reduksjon i plattformmasse kunne gi øket mengde drivstoff for banekontroll, og dermed lengre levetid.
- **lav termisk deformasjon.** I rommet vil deler av satellittene kunne bli utsatt for solbelysning og dermed sterk lokal oppvarming, samtidig som andre deler av den mekaniske strukturen blir sterkt avkjølt. Dette må ikke føre til mekaniske deformasjoner.
- **gode elektriske, elektrostatiske og magnetiske egenskaper.** Miljøet i rommet er krevende. Et problem som er vanskelig å håndtere, er elektrostatisk opplading som skyldes at satellitten beveger seg i plasma. Slik opplading kan føre til utladninger som kan ødelegge deler av satellitten.
- **motstandsevne mot degradering** på grunn av vakuum, sublimering og erosjon.

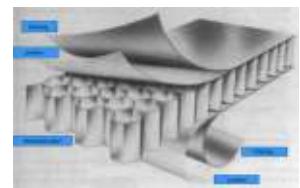
## Mekanismer

En satellitt vil ofte være utstyrt med mekanismer av svært forskjellig slag. Noen av disse vil operere kontinuerlig, som for eksempel styringen av solcellepanelene for geostasjonære satellitter. Disse må gjøre én omdreining i løpet av 24 timer. Satellitter kan også være utstyrt med gyroer som skal rotere med flere tusen omdreininger per minutt i hele satellittens levetid, flere år. Smøring er ett av problemene her. Andre mekanismer skal utføre bare en enkelt operasjon, som for eksempel å folde ut solcellepanelene etter at satellitten er plassert i geostasjonær bane.

## Materialer

Det er to hovedtyper materialer som benyttes i satellittplattformer: metalliske materialer og keramer. De vanligste metalliske legeringene er basert på aluminium, magnesium og titan.

En spesiell konstruksjon som er mye brukt er honeycomb (bikube-) -struktur. Den er meget lett, sterk og har stor stivhet. Når dette materialet skal benyttes i satellitter vil det være problemer med vakuum. På bakken inneholder cellene luft, og de må enten utgasses før oppskyting, eller utstynes med luftehull.



Honeycombstruktur.  
Forfatter: [Narom](#)

## Polymere kompositmaterialer

Hovedtyper er:

- fiberforsterkede materialer
- matrisematerialer
- termoplastiske materialer

## Styrkeberegninger

Styrkeberegninger for en satellittplattform må omfatte både statiske og dynamiske forhold. Her benyttes "finite element"-metoden. Strukturen deles da inn i et stort antall elementer hvor lastfordeling, elastiske egenskaper og grensebetingelsene er kjent. Samme metodene benyttes også til styrkeberegnning av skipsskrog og andre mekaniske konstruksjoner.

De dynamiske egenskapene for plattformen må så kobles med de dynamiske egenskapene for raketten. Det er da mulig å studere vibrasjonsforholdene og bestemme hvor forsterkninger er nødvendig.

# Rotasjonsstabilisering

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Ratasjonsstabilisering \(9590\)](#)

Den første satellitten, Sputnik, hadde kuleform, og den var utstyrt med antenner som var tilnærmet omnidireksjonelle. Det vil si at de kunne sende og motta signaler i alle retninger. Dette var lite effektiv bruk av sendeffekt, men det var nødvendig fordi man den gang manglet retningskontroll for satellitten.

For å kunne utnytte satellitter effektivt var det nødvendig å utvikle systemer for retningskontroll, det som på engelsk kalles attitude control, og de løsningene som ble utviklet var bestemmende for det geometriske utformingen av plattformen. Utviklingen begynte med de geostasjonære satellittene. Det ble utviklet en metode basert på rotasjonsstabilisering, som førte til tønneformede satellitter. Denne teknikken ble utviklet langt og kunne brukes for store kommunikasjonssatellitter.

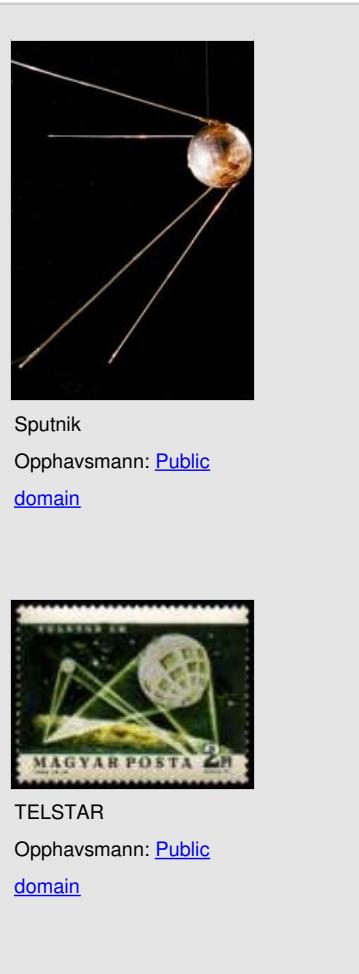
Men rotasjonsstabiliseringen hadde også sterke begrensninger, ikke minst når det gjaldt generering av effekt med solcellepaneler og når det gjaldt styring av kompliserte antennesystemer. Det ledet til utvikling av full retningskontroll om de tre ortogonale aksene, treaksestabilisering.

## Ingen retningskontroll

Den kuleformen som de første satellitten hadde, skyldtes at teknologien for å holde den i en bestemt retning i rommet ikke var utviklet. En slik satellitt uten kontrollert orientering eller pekeretning har begrensede anvendelser. Som reléstasjon for signaler ville den sende effekten i alle himmelretninger, og bare en liten del ville falle på de ønskede områdene på jordoverflata.

Til observasjonsformål ville den også være uegnet hvis oppgaven bestod i å observere spesielle mål, enten det er i verdensrommet eller på jorda. De laveste kravene til retningskontroll kan vi bare ha for vitenskapelige satellitter som skal måle tilstander i det rommet de befinner seg i, og overføre begrensede datamengder til mottakerstasjoner på bakken.

En satellitt som representerte en milepel når det gjelder kommunikasjon via satellitt var TELSTAR, som stod for den første direkte overføring av TV-signaler mellom Europa og Nord-Amerika. Som vist på figuren var den uten retningskontroll. Dermed ble tilgjengelig effekt lav, og antennevinning for mottaking og sending var lav. Dermed måtte jordstasjonene være store.



## Rotasjonsstabilisering

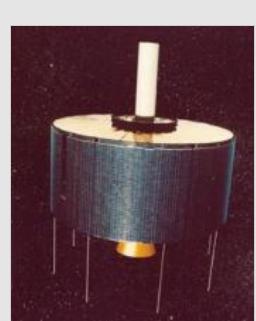
De første kommersielle telesatellittene var rotasjonsstabiliserte, og de ble utstyrt med en antenn som sendte effekten i en vifteform rundt rotasjonsaksen. Da ville nødvendigvis en stor del gå ut i verdensrommet og dermed være tapt. Dette var tilfellet med INTELSAT II, som ble brukt til telefontrafikk mellom Europa og USA.

Det var en stor forbedring av effektiviteten da satellittene kunne utstyres med et antennesystem som roterte i motsatt retning med samme hastighet slik at det var kontinuerlig rettet mot jordkloden. Etterfølgeren, INTELSAT III, hadde et antennesystem som hadde form av et speil som reflekterte signalet mot jorda. Denne forbedringen økte overføringskapasiteten betraktelig.

Senere er antennesystemene utviklet videre og blitt stadig mer avansert, men kravet har vært at de har en nøyaktig kontrollert motrotasjon som holder pekeretningen fast. En stor teknologisk utfordring er å overføre signalene i adskilte kanaler med minst mulige tap mellom en roterende satellittplattform og et motroterende antennesystem. Typisk omdreiningshastighet for å oppnå tilstrekkelig gyrokopisk stivhet er 60 til 120 omdreininger per minutt.

Bruk av motroterende antenner skaper et stabilitetsproblem. Den motroterende massen i antennesystemet reduserer treghetsmomentet om symmetriaksen og stiller større krav til massefordelingen i selve plattformen.

En annen stabil tilstand er nutasjon, dvs. at rotasjonsaksen beskriver en kjegle omkring denne aksen, slik vi ser det for en snurrebass hvor aksen ikke har en fast retning. Denne nutasjonen er ønskelig å fjerne da den fører til pekefeil. Det må gjøres ved å fjerne "overflødig" rotasjonsenergi, og dette er generelt et problem i rommet. Energitap kan skje ved å utstyre satellitten med masse som kan bevege seg innbyrdes på en slik måte at det fører til friksjon som forbruker energi, slik som hjul med friksjonskobling til hovedstrukturen, kuler som skvalper i væskefylte rør og solcellepaneler som vibrerer.



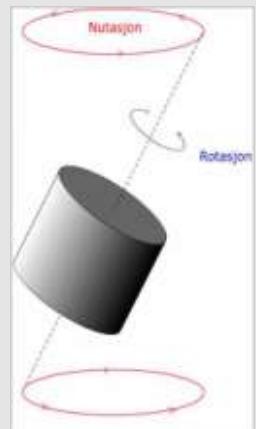
Intelsat 2

Opphavsmann: [Public domain](http://Public.domain)



Intelsat 3

Opphavsmann: [Public domain](http://Public.domain)

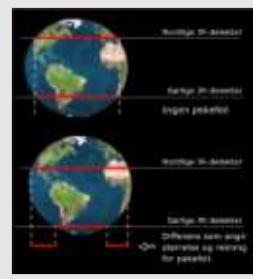


Nutation

### Måling av retning for rotasjonsstabiliserte satellitter

Hvordan kan det registreres at rotasjonsaksen er normalt på ekvatorialplanet, og at antennesystemet roterer med nøyaktig hastighet og fase? Her benyttes ofte infrarøde (IR) detektorer. Det er halvlederkomponenter som virker som mottakerantennene for infrarøde signaler. Da infrarøde signaler har kort bølgelengde, vil selv små IR-sensorer ha stor retningsselektivitet. Når en slik sensor rettes mot et legeme, vil utgangseffekten være proporsjonal med den fysiske temperatur i det infrarøde bånd.

Jordkloden har en temperatur på typisk 250 K, mens det kalde verdensrommet har en temperatur på typisk 4 K. Når en slik detektor monteres på en roterende satellitt, og når strålen passerer jordhorisonten sett fra satellitten, vil det skje en markert forandring av mottatt effekt. Figuren viser mottatt effekt fra to IR-sensorer som sitter overfor hverandre på den roterende satellitten men som har litt forskjellig retning nord-sør. Hvis satellittaksen er nøyaktig perpendikulær ekvatorialplanet vil pulsene fra begge IR-sensorene være nøyaktig like lange. En helning av satellittaksen i planet jordakse - satellitt vil føre til at pulsene får forskjellig lengde, og denne forskjellen vil gi informasjon om både feilretning og størrelsen på vinkelfeilen. En detektor på det motroterende antennesystemet vil angi når det peker mot jorda, og det skal være sentrert i forhold til de signalene som er vist på figuren.



Retningskontroll  
rotasjonsstabilisert satellitt  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

## Store rotasjonsstabiliserte satellitter

Teknikken med rotasjonsstabiliserte satellitter har vært utviklet langt og er blitt brukt for store kommunikasjonssatellitter, blant annet for Hughes plattform 376, som er benyttet for Intelsat 4a. For å forbedre stabilitetsegenskapene er det mulig å benytte momenthjul. Disse kan øke trehetsmomentet om en ønsket akse. Siden trehetsmomentet for et gitt hjul er proporsjonalt med kvadratet av omdreiningshastigheten, og siden en ønsker så lav masse som mulig innenfor et begrenset volum, ønsker man så stor omdreiningshastighet som er forenlig med effektforbruk og driftssikkerhet. Slike hjul kan ha rotasjonshastigheter på typisk 3000 til 4000 omdreininger per minutt.



Intelsat 4a  
Opphavsmann: [Public domain](#)

# Treaksestabilisering

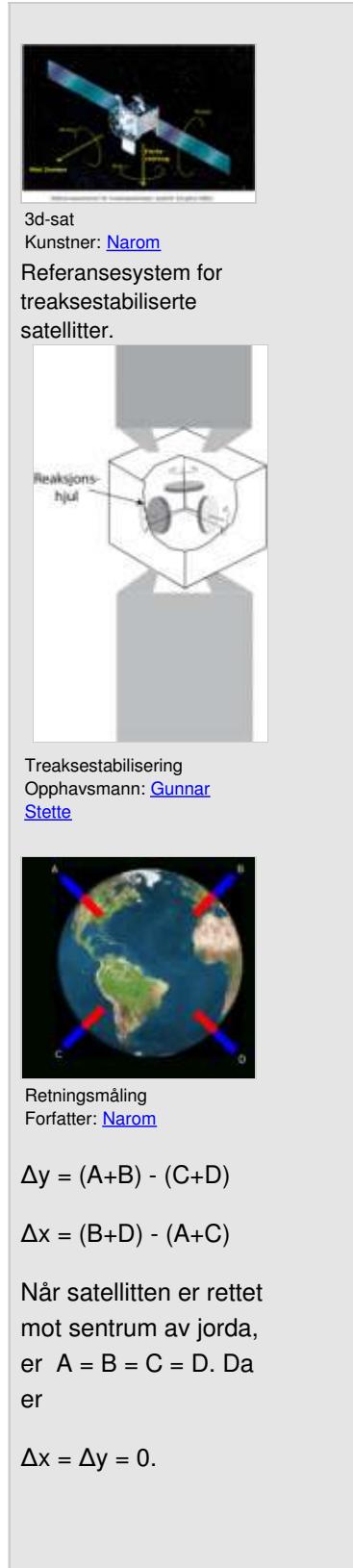
Forfatter: Gunnar Stette

[Treaksestabilisering \(24018\)](#)

Med stadig økende krav til generering av effekt og med stadig mer kompliserte antennesystemer, ble rotasjons-stabiliserte plattformer etter hvert utilstrekkelige. Det ble derfor utviklet satellittplattformer som hadde styring av bevegelsen om alle aksene, og som derfor kunne utformes geometrisk mer fritt. Solcellepanelene for eksempel kunne settes på vinger som kontinuerlig ble rettet inn mot sollyset, etter som satellittene beveget seg i bane rundt jorda. Denne typen satellitter kalles treaksestabiliserte.

## Referansesystem

Det referansesystemet vi benytter ved retningskontroll av geostasjonære satellitter, er vist på figuren. Det viser en satellitt som beveger seg østover i ekvatorialplanet. Venstre solcellepanel peker mot nord. Nadir er retningen fra satellitten til fotpunktet, skjæringspunktet mellom jordoverflata og ei linje fra satellitten til jordsentrum. Betegnelsene er hentet fra det maritime fagspråket, og vinklene representerer rull, stamp og giring (roll, pitch and yaw).



## Styring av treaksestabiliserte satellitter

Problemet i verdensrommet er at vi mangler et fast punkt. Derfor må vi benytte **reaksjonkraften** fra raketter for å kunne bevege en satellitt. Hvis vi vil dreie den, må vi på samme måten benytte det **reaksjonmomentet** vi får ved å akcelerer eller retardere et momenthjul. Vi kan oppnå hvilken som helst rotasjon av en satellitt ved å benytte tre momenthjul, ett om hver hovedakse i et xyz-system, som vist på figuren. Siden reaksjonshjulet har mindre treghetsmoment enn satellittplattformen, vil vinkelforandringen for satellitten bli tilsvarende mindre enn vinkelforandringen for reaksjonshjulet.

## Momenhjul

Momenhjul må ikke forveksles med gyrohjul som har til hensikt å øke den gyrokopiske stivheten.

## Måling av retning for treaksestabiliserte satellitter

Det prinsippet som benyttes for måling av retning for rotasjonsstabiliserte satellitter (se Rotasjonsstabilisering), fungerer ikke for treaksestabiliserte. Da kan det i stedet benyttes et prinsipp som vist på figurene.

Her benyttes IR-detektorer med en mottakeråpning som har form av en spalte. Et system med fire slike detektorer rettes mot jorda, og effekten fra hver av dem registreres og sammenlignes. Når en del av et synsfelt for en detektor dekker jordoverflata, som er betydelig varmere enn verdensrommet, vil effekten være proporsjonal det arealet som dekker jorda, vist med rødt på figurene. Når gruppen av de fire IR-sensorene er rettet mot sentrum av jorda, vil hver sensor peke mot kanten av jorda og effekten fra hver av detektorene være den samme. Verdiene for differensspenningen  $\Delta x$  og  $\Delta y$  er da null.

Måling av retning med infrarøde detektorer kan skje både ved dag og natt, da det er varmeutstrålingen som betyr noe. Det kan også utføres om det er skydekke på jorda, fordi skydekket er lavt i forhold til jorddiameteren, og fordi temperaturen på skydekket er betydelig høyere enn for det kalde verdensrommet.

Problemet oppstår når solskiva kommer innenfor synsfeltet til IR-sensorene. Det skjer når satellitten er nær kanten av jordskyggen. Da må andre enheter overta, for eksempel gyro. Gyro er også viktig for kontroll av retninger under banemanøvrer.

Ved siden av å måle retning til jorda kan det være viktig å måle retning til andre himmellegemer, i første rekke til sola, blant annet for innretning av solcellepaneler. Sola er ei kraftig, tilnærmet punktformet signalkilde.



# Gradientstabilisering

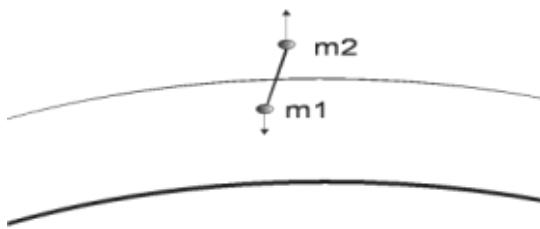
Forfatter: Gunnar Stette, Narom  
[Gradientstabilisering \(24539\)](#)



En satellitt utstyrt med en lang bom og med en masse i enden av bommen har en tendens til å innrette seg slik at aksen med lavest treghetsmoment peker mot jordas sentrum. Dette kan i visse tilfeller benyttes til retningskontroll av satellitter.

## Prinsipp

Den kraften som retter inn satellitten, er bestemt av bomlengde og bommasse. Kraften er videre bestemt av størrelsen på gradienten for gravitasjonsfeltet. Det betyr at den egner seg mest for satellitter i lav bane. Prinsippet for gradientstabilisering er vist på figuren.



Gradientstabilisering  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)

Fordelen med denne stabiliseringsmåten er at den er passiv. Det er ingen bevegelige deler, og det kreves ingen energitilførsel.

En ulempe er at gradientstabiliseringsmekanismen ikke har noen innebygget dempende faktor. Det fører til at satellitten vil "pendle", med mindre den utstyres med spesielle dempningsmekanismer. Dermed gir metoden en begrenset nøyaktighet.

Metoden er likevel anvendelig til forskjellige formål. Vitenskapelige satellitter for eksempel kan være utstyrt med en mast for måling av tilstanden i banen (ionosfæren), og i visse tilfeller kan en slik målebom kombineres med gradientstabilisering.

# Fremdriftssystemer

Forfatter: Gunnar Stette, Narom  
[Fremdriftssystemer \(9593\)](#)

Det er flere behov for korreksjon av baneparametre og pekeretning under drift av satellitter i rommet. Det kan også være behov for "flytting" av satellitter til andre baneposisjoner. Her dreier det seg ofte om mindre korreksjoner, og til det brukes små rakettmotorer, trustere, av forskjellig slag. Et viktig hensyn er systemene for fremdrift er enkle, stabile og pålitelige, og at operasjonene er enkle.

## Behovet for banekorreksjoner

Satellittbaner påvirkes av forskjellige krefter, i tillegg til det sfæriske tyngdefeltet, slik at baneparametrene forandrer seg. Det blir stadig sterkere krav til nøyaktighet, at satellittene blir i den riktige baneposisjonen.

Den geostasjonære bane er en ettertraktet, begrenset naturressurs. For å få plass til flest mulige satellitter må de holdes på sine tildelte plasser så nøyaktig som mulig. Internasjonale normer er at de skal holdes innenfor en "boks" på  $\pm 0,1^\circ$ , inklinasjon og øst-vestposisjon, men praksis nå er å holde de innenfor  $\pm 0,05^\circ$ . Stabil posisjon vil også sikre at større antenner kan operere uten aktiv styring, og det kan gjøre jordstasjonene mye billigere.

Noen ganger er det også nødvendig å forandre baneposisjon. Intelsat, som opererer ca 25 satellitter i geostasjonær bane, vil kunne flytte disse etter som hvordan trafikken i de forskjellige geografiske områdene utvikler seg. Da Telenor kjøpte den britiske TV-satellitten Marco Polo og døpte den om til Thor I, "flyttet" de satellitten fra  $31^\circ$  vest til  $1^\circ$  vest.

I operative systemer er det nødvendig å ha reservesatellitter i bane som kan ta over ved eventuelle feil i aktive satellitter. Da er det viktig å holde antallet reservesatellitter så lavt som mulig. Iridium-systemet, med 11 satellitter i 6 baneplan, har en reservesatellitt i hvert plan. Hvis en operativ satellitt feiler, må reservesatellitten flyttes til riktig plass i konstellasjonen.

Andre operasjoner som krever framdriftsmidler i satellittene, er korreksjon av pekeretninger og forandring av rotasjonshastigheter. Det er også aktuelt å fjerne energi som har samlet seg opp i reaksjonshjul på grunn av usymmetriske krefter som har virket på treaksestabiliserte satellitter. Slik overskuddsenergi kan fjernes i en kombinasjon av oppbremsing av hjul og avfyring av et rakettpar.

Dette kommer i tillegg til det som er behandlet tidligere, overføring av satellitter fra overføringsbane til den geostasjonære bane.

## Drivstoffforbruk til forskjellige formål

For å sammenfatte de forskjellige operasjonene, og for å få et inntrykk av energiforbruket til de forskjellige operasjonene, kan vi se på hastighetsforandringsbudsjettet for en geostasjonær kommunikasjonssatellitt, INTELSAT IV. På grunn av sammenhengen mellom drivstoffmengde og hastighetsforandring som er gitt av rakettligningen for en bestemt satellitt, kan vi uttrykke forbruket både som drivstoffmengde i kg og som hastighetsforandring  $\Delta v$  m/s.

## Budsjett for hastighetsforandring og drivstoff for INTELSAT IV

	Dv (m/s)	m (kg)
Øst-vest-korreksjon og forandring av baneposisjon	4,78	1,5
Rotasjon og rotasjonskontroll	14,6	4,7

Korreksjon av pekeretning	0,31	0,1
Korreksjon av bane ved øppskyting	54,9	17,8
Inklinasjonskontroll	358,4	115,9
Total hastighetsforandring (m/s)	433,0	140,

Av tabellen ser vi tydelig at det er inklinasjonskontrollen som krever mest energi fra fremdriftssystemet til satellitten. Totalt utgjør drivstoffet ca. 20 % av den totale massen som skytes opp. Det er derfor ikke så rart at det arbeides intenst med å redusere den nødvendige massen for drivstoffet ved å utvikle mer effektive motorer og mer effektive strategier for banekorreksjoner.

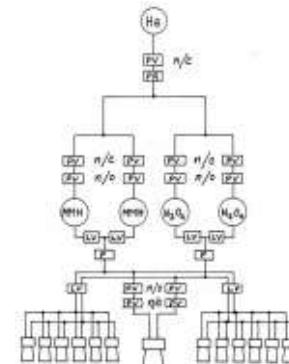
I den sammenheng er valg av metode for overføring til geostasjonær bane interessant. De første apogeummotorene benyttet fast brennstoff, og da måtte rakettmotoren brenne i ett strekk. Med flytende brennstoff kan motorene slås av og på. Ved å bruke de samme drivstofftankene både til apogeummotor og til andre korreksjoner, såkalt UPS (Unified Propulsion System), ville ubenyttet drivstoff for apogeummotor kunne benyttes av de andre dysene til å forlenger driftstiden for satellitten. Ariane 4 var en rakett med høy presisjon. Det var mindre behov for korreksjon ved posisjonering i geostasjonær bane. Denne presisjonen kunne dermed utnyttes til å forlenger den tiden satellitten kunne holdes i geostasjonær bane og dermed forlenget levetid.

For korreksjon av baneparametrene under vanlig drift er det også utviklet teknikker for utnyttelse av stråletrykket ved bruk av såkalte solseil.

### Fremdriftssystem for treaksestabilisert satellitt

Fremdriftssystemet for en treaksestabilisert satellitt (TELE-X) er vist på figuren. Under satellitten sitter apogeummotoren som har en skyvkraft på 400 N. Den bringer satellitten fra overføringsbane til geostasjonær bane, den har flytende brennstoff, den kan startes og stoppes. Sirkulariseringen av banen ble gjennomført i tre trinn. For forskyvning i x og y-retning er det montert 10 N-motorer på sidene av plattformen, som figuren viser.

Drivgassen er i dette tilfellet MMH med  $N_2O_4$  som oksydator. Det er to sett tankes, redundans, for å øke påliteligheten. For å presse ut drivstoffet, som er nødvendig for en satellitt i vektløs tilstand, brukes komprimert heliumgass.



Fremdriftssystemet i Tele-X  
Opphavsmann: [Public domain](#)

Systemet har én apogeummotor. De andre dysene er duplisert. Åpning og lukking av ventilene skjer ved hjelp av fjernstyring fra bakken. Der bestemmes hvor stor mekanisk impuls som skal genereres, og dermed hvilken hastighetsforandring som skal gis.

# Generering av energi i rommet

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Generering av energi i rommet \(9591\)](#)



Både Hermann Potocnik (1929) og Arthur C. Clarke (1945) foreslo å skaffe strøm til drift av satellittene fra solenergien. De tenkte å bruke en dampmaskin som kunne drive elektriske generatorer. Det ville være dampmaskiner med høy effektivitet. Den løsningen som benyttes nå er bruk av solceller, halvlederkomponenter som omformer energien fra sollyset til elektrisk strøm. Strømforsyning og energilagring er viktige komponenter i en satellittplattform.

## Historisk utvikling

Hermann Potocnik foreslo i en bok publisert i 1929 å skaffe den nødvendige effekten til sin romstasjon fra solenergien. Sollyset ble fokusert i et parabolsk speil for å generere dampen som skulle drive strømgeneratoren. Avkjøling, kondensering, av dampen ville skje ved utstråling til det kalde verdensrommet.

Effektiviteten for dampmaskiner er gitt av den såkalte Carnot-syklusen, og her inngår høyeste og laveste temperatur i prosessen. Produksjon av dampen ville skje ved hjelp av energi fra sola, som har en overflatetemperatur på ca. 6000 grader, mens avkjølinga ville oppnås ved å stråle energi ut mot det kalde verdensrommet, som har en temperatur på knapt 4 grader over det absolute nullpunkt,  $-168^{\circ}\text{C}$ .

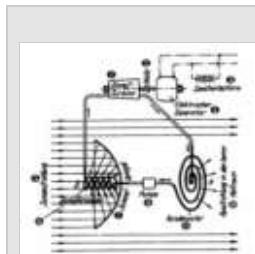
Arthur C. Clarke foreslo samme løsning i sin artikkel fra 1945.

I et etterord til artikkelen, skrevet etter at de første atombombene var sprengt i august 1945, skriver Clarke at den mest sannsynlige energikilden ville være atomenergi.

Ingen av disse spådommene slo til i første omgang. Mellom hans artikkel og den første oppskyting av satellitter ble faststoffysikken utviklet, og det ble utviklet halvlederelementer, solceller, som kunne forvandle sollys til elektrisk strøm.

Generering av effekt har alltid vært en flaskehals for utvikling av de fleste rombaserte systemene. Dette gjelder også for kommunikasjonssatellittene, spesielt de som skal kringkaste TV-bilder til små hjemmemottakere. Intelsat III-satellitten, som var den første som ble brukt til regelmessig interkontinental telekommunikasjon, var basert på et effektforbruk på ca. 100 watt. En moderne kringkastingssatellitt har en energiproduksjon på typisk 15 kW. Romstasjonen, ISS (the International Space Station), har et effektbehov i størrelsesorden Megawatt.

Romfartøyer vil hovedsakelig skaffe energien sin fra sollyset, men for de aller fleste satellittbanene vil satellittene tidvis komme i jordskyggen. For eksempel vil geostasjonære satellitter i løpet av to perioder hvert år, rundt vår- og høstjevndøgn, passere gjennom jordskyggen. Hvis det kreves kontinuerlig drift, må satellittene også utstyres med muligheter for lagring av energi. I dag brukes batterier til dette formålet, men batteriene er en av de mest kritiske komponentene i en satellitt. Vekten er høy, ytelsen går ned med tiden og det er vanskelig å prediktere levetiden.



Strømforsyning foreslått

av Potocnik

Opphavsmann: [Public domain](#)

Det er derfor stor interesse for å finne alternative energilagringsmetoder, og det arbeides derfor intenst med utvikling og forbedring av teknologi for effekt-generering og lagring. Mekanisk lagring i svinghjul og elektrokjemisk lagring i brenselceller er mulige alternativer.

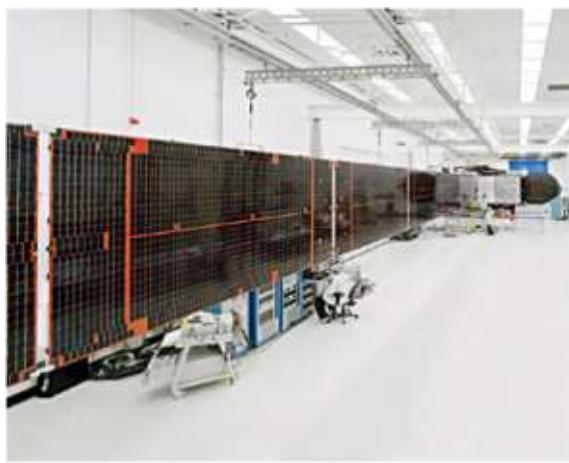
## Solceller

Den første praktisk anvendbare solcellen ble utviklet ved Bell Labs i 1954 og brukt på Vanguard 1 i 1958. Strømmen genereres i en pn-overgang. Solceller lages i størrelse 2 x 2 eller 2 x 4 cm, og de har en tykkelse på 0.2 mm. Solceller skades av høyenergistråling fra solen, og de må derfor gis et beskyttende lag, noe som øker vekten. Den karakteristiske blå fargen for solcellepaneler skyldes dette belegget.

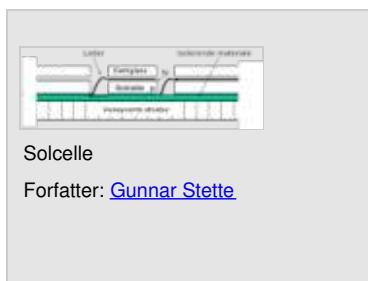
Virkningsgraden er i området 10 til 20 %, avhengig av type. Solceller av silisium har typisk en virkningsgrad på 16 %, mens den er typisk 19 % for Gallium-Arsenid, som blir stadig mer brukt. Nå er det også utviklet gallium-arsenidceller med en virkningsgrad på så mye som 27 %. Dette er basert det forhold at gallium-arsenid er gjennomsiktig. Nederst ligger et lag som absorberer rødt lys, over det et lag som absorberer grønt lyst, og øverst et lag som absorberer det mest energirike blå lyset. Slike solceller er kostbare å fremstille, med det kan være en lønnsom investering.

Et annet viktig mål for effektiviteten for et solcellepanel, ved siden av Watt per kvadratmeter, er antall watt per kg solcellepanel. For en rotasjonsstabilisert satellitt er typisk verdi 10 W/kg mens den for en treaksesstabilisert satellitt med styrbare solcellepaneler kan komme opp i 50 W/kg ved slutten av levetiden med silisiumceller, og opp til 110 Watt per kg for gallium-arsenidceller. Strøm-spennings-karakteristikken for ei slik solcelle er vist på figuren. For å få tilstrekkelig spenning og strømstyrke må solcellene bygges sammen i grupper.

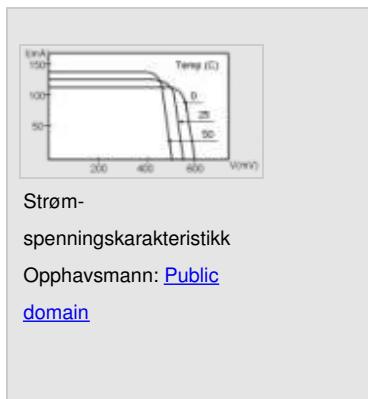
Det arbeides nå med utvikling av en helt ny type solceller. De er laget av amorf silisium. De kan lages med tre lag, og hvert lag kan avstemmes til en spesiell farge, blått, grønt og rødt. Disse solcellene er ekstremt tynne og lette, og kan monteres på forskjellig underlag, fra kapton til antennereflektorer. Virkningsgraden er typisk 13%, den er lite avhengig av temperaturen, og effektutbyttet kan komme opp i 400 Watt per kg.



Solcellepanel  
Opphavsmann: [ESA](#)



Solcelle  
Forfatter: [Gunnar Stette](#)



Strøm-  
spenningskarakteristikk  
Opphavsmann: [Public  
domain](#)

Seriekobling av solcellene gir addisjon av spenningene. For å få en spenning på 50 volt kan typisk 120 celler kobles i serie. For å øke strømstyrken parallelakkobles flere slike solcellekjeder, og da adderes strømstyrken. Med 40 kjeder i parallel vil strømstyrken være ca. 6 A. Hver seriekobling er beskyttet ved hjelp av dioder slik at en kortslutning i en slik kjede ikke skal sette hele panelet ut av drift. Flere slike enheter kobles så sammen til hele solcellepaneler som skal forsyne satellitten med effekt. Satellitter med store effektbehov, for eksempel de som skal brukes til TV-kringkasting, må ha solcelle paneler med store arealer, og slike arealer må være sammenbrettet eller sammenrullet under oppskyting.

#### Degradering av solceller

Effektiviteten for solceller synker over tid på grunn av stråling fra sola og kosmisk stråling. Reduksjonen vil være avhengig av type solcelle og av den skjerming som panelene er utstyrt med. For en geostasjonær satellitt kunne en reduksjonen til 70 % per år være typisk. Dette har stor betydning for dimensjonering av strømforsyningen. Ofte er det slik at trafikken, og dermed effektbehovet, øker over en satellitts levetid, og samtidig reduseres kapasiteten. Dessuten konstrueres satellitter for stadig lengre levetid. Strømforsyningen må derfor dimensjoneres etter behov og ytelse ved slutten av levetiden, EOL (End of Life).

Satellitter i molniya-type bane, som går gjennom Van Allen-beltene, må ha ekstra skjerming av solcellene, noe som typisk kan doble vekten per kvadratmeter panel.

# Termisk kontroll

Forfatter: Gunnar Stette, Narom  
[Termisk kontroll \(9592\)](#)

En satellitt i rommet befinner seg i et termisk krevende miljø. Den kan bli utsatt for sollys med en intensitet på rundt  $1360 \text{ W/m}^2$  avhengig av årstiden, og en jordstråling på  $200 \text{ W/m}^2$ . I deler av tiden kan den være i jordskyggen, omgitt av et verdensrom med en temperatur på ca. 4 K, altså  $-268^\circ\text{C}$ . I satellitten vil det være forskjellige varmekilder, som for eksempel effektforsterkere i en kringkastingssatellitt, og denne varmen må ledes bort. Solbelysning kan gi lokale oppvarminger som fører til mekanisk deformasjon av antennespeil, og slik deformasjon kan forandre strålingsdiagrammet. Mye av utstyret i satellitten må opereres innenfor relativt smale temperaturtoleranser sett i forhold til de temperaturvariasjonene som kan forekomme i rommet. Termisk konstruksjon av en satellitt er derfor en krevende oppgave som krever omfattende analyser. Konstruktøren har en rekke metoder og komponenter tilgjengelig for å holde de forskjellige delene av satellitten innenfor temperaturgrensene.

## Krav til temperaturkontroll

De forskjellige komponentene i en satellitt må holdes innen visse temperaturgrenser for at de skal fungere korrekt. Noen typiske verdier er vist i tabellen:

Batterier NiH2	-5 °C til 20°C
Solceller	-100 °C til +100 °C
Elektronikk	10 °C til 50 °C
Drivstofftanker	+10 °C til +50 °C

## Passiv termisk kontroll

Det enkleste og mest brukte hjelpemiddel for temperaturkontroll er å gi de forskjellige flatene belegg som påvirker varmestråling og absorpsjon. Absorpsjon av effekt,  $P$ , for en flate utsatt for sollys er bestemt av absorpsjonskoeffisienten,  $\alpha$ , arealet,  $A$ , og strålingsintensiteten,  $C$ . For stråling fra sola varierer den med avstanden, altså med årstiden, fra  $1326 \text{ W/m}^2$  midtsommers til  $1418 \text{ W/m}^2$  midtvinters.

$$P_{\text{abs}} = C \cdot \alpha \cdot A$$

En flate vil også stråle ut energi. Den utstrålte effekten er avhengig av emisjonskoeffisienten,  $\epsilon$ , Stefan-Bolzmanns konstant,  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ T}^4\text{)}$  og den absolutte temperaturen  $T$ .

$$P_{\text{utstr}} = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4$$

Både absorpsjonskonstanten og emisjonskonstanten er ubenevnte tall mellom 0 og 1. Det er forholdet mellom emisjonskonstant og absorpsjonskonstant som er viktig for bestemmelse av den temperaturen en flate vil få. Tabellen viser disse verdiene for noen aktuelle overflater.

	$\alpha$	$\epsilon$	$\alpha/\epsilon$
Hvit epoxy på substrat	0,25	0,890	0,28
Svart maling	0,975	0,874	1,12
Gull	0,30	0,023	13
Optisk solreflektor	0,077	0,79	0,10
Solceller	0,80	0,90	0,90

Likevektstemperaturen er altså avhengig av forholdet mellom  $\alpha$  og  $\epsilon$ , og disse koeffisientene varierer sterkt for forskjellige overflater, som vist i tabellen.

## Aktiv termisk regulering

I en geostasjonær satellitt er det nord og sydpanelene som alltid peker mot kaldt verdensrom, og som er best egnet for å avgive termisk energi. Oppgaven blir dermed å transportere energien til disse panelene, og det gjøres i stor grad med varmeregulatorer. Det brukes hovedsakelig tre typer aktive temperaturregulatorer:

### Varmerør, heat pipes

Disse er basert på fordampning og kondensering av en væske og virker på samme måte som aggregatet i et absorpsjonskjøleskap. Røret inneholder ei væske som fordamper der hvor røret er varmt, og kondenserer hvor røret avgir varme til omgivelsene. Ved hjelp av et egnet porøst stoff, en veke, vil kapillærkraftene føre væska tilbake til den varme delen hvor den igjen fordampes. Varmerøret blir dermed et lukket system.

Valg av væske i varmerøret er bestemt av hvilke temperaturer det opererer ved. Ammoniakk, som er vanlig i kjøleskap, kan brukes over temperaturområdet fra 200 K til 500 K.

Metanol har et litt smalere temperaturområde. For høye temperaturer brukes materialer som kvikksølv og litium. Ved de lave temperaturene benyttes oksygen, hydrogen eller nitrogen. Ved de laveste temperaturene, 15 K, brukes hydrogen.

For å få et inntrykk av varmetransportkapasiteten for slike rør kan vi se på de som ble brukt i MARECS-satellitten fra ca. 1980. Den ble utviklet av ESA og var den første operative satellitten i INMARSAT-systemet. Et varmerør av aluminium med diameter 15 mm og med ammoniakk som gass kan transportere 200 watt effekt over en avstand på 1 meter når temperaturforskjellen er 1 grad. Massen for et slikt rør var 0,4 kg, og det har den fordelen at det hverken trenger effektilførsel, eller at det har bevegelige deler. Dagens varmerør har større kapasitet, over 500 watt per meter.

For enda større yteler kan det være hensiktsmessig å bruke varmerør hvor vesken blir pumpet, som i et vanlig kjøleaggregat, da disse har større ytelse. I bemannede romfartøyer har varmerør med pumper vært brukt i lang tid

### Skjermer og persiener

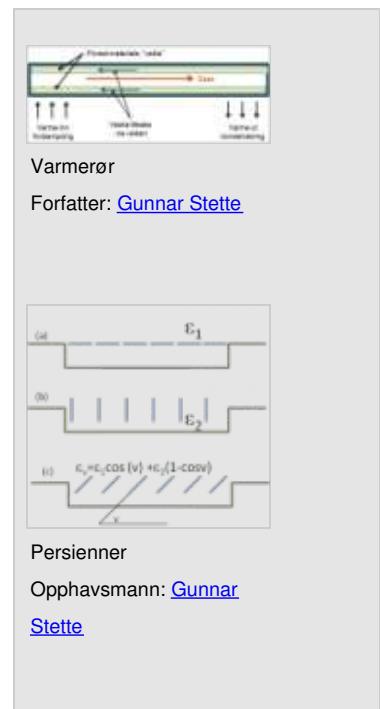
Skjermer og persiener kan brukes til å variere emisjons- og absorpsjonsegenskapene for overflater, som vist på figuren.

### Elektriske varmeelementer

Dette er ganske enkelt små "varmeovner" som kan brukes til lokal oppvarming av kritiske komponenter, som for eksempel hydrasintanker, siden hydrasin fryser ved 0 °C. Rør for flytende drivstoff vil gjerne være pakket i isolerende materiale med varmeelementer som kan aktiveres ved behov.

Oppvarmingsgraden kan skje ved en kontinuerlig regulering av strømstyrken eller ved å styre bredden og frekvensen for strømpulser med standard styrke.

Den termiske konstruksjonen av en satellitt vil være basert på normal drift av de forskjellige systemkomponentene. I en kommunikasjonssatellitt vil for eksempel effektforsterkerne alltid være aktiv og utvikle sterkt varme. Dette vil være tatt hensyn til. Hvis, på grunn av feil, "vedlikehold" eller andre forhold, slike komponenter er ute av drift, vil det føre til en unormal nedkjøling. Da kan det være nødvendig å ha en varmekilde som aktiveres og som opprettholder den normale varmeutviklingen i satellitten. Da brukes varmeelementer.



# Telemetri og fjernkontroll (TT&C)

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Telemetri og fjernkontroll \(TT&C\) \(9594\)](#)

Telemetri og fjernkontrollsystemet, det som ofte betegnes TT&CM (Telemetri, Telecommand, Control and Monitoring) eller bare TT&C, er en viktig del av ethvert satellittsystem. Det sørger for innsamling og distribusjon av data om bord i satellitten og overføring av informasjonen via TT&C-stasjoner mellom satellitten og kontrollstasjonen på bakken. En kontrollstasjon kan betjene flere satellitter og overføre data via TT&C-stasjoner som kan være plassert langt fra kontrollstasjonen. En annen funksjon som inngår, er avstandsmåling, som benyttes for bestemmelse av baneparametrene og satellittposisjonen. Satellitten må utstyres slik at informasjon kan overføres begge veier selv om satellitten er ute av stilling og i feil bane.

## Funksjonskrav

Utformingen av systemene vil være avhengig av funksjon og banetype for satellittene. Geostasjonære satellitter vil ha en kontinuerlig forbindelse med lav datarate. Vitenskapelige lavbanesatellitter vil bare være tilgjengelige i korte perioder, og det vil normalt kreve høyere kapasitet. Det kreves forbindelse til satellittene både i oppskytingsfasen og i normal drift.

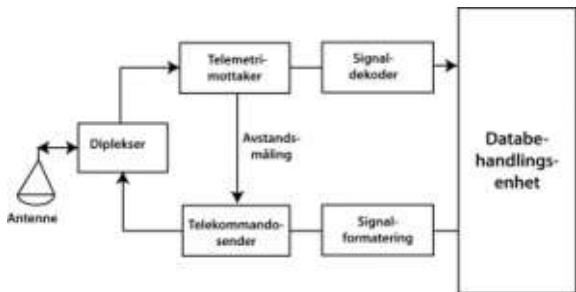
Dessuten må overføringssystemet utformes slik at det fungerer selv om satellitten mister retningskontrolen. Det vil med andre ord si at satellitten må være utstyrt med telemetrianntenner som stråler i alle retninger. For bemannede flukter er det absolutt nødvendig med kontinuerlig forbindelse begge veier til enhver tid. Ved siden av forbindelse satellitt–jord er det opprettet datarelésatellitter i geostasjonær bane som skal sørge for kontinuerlig forbindelse til romfartøyer i enhver posisjon. Det er spesielt effektivt å bruke slike datarelésatellitter for oppfølging av lavbanesatellitter.

Det er ønskelig at en satellitt i størst mulig utstrekning skal være selvstyrт og at det bare så sjeldent som mulig skal være nødvendig å sende styreordrer fra bakken. Det er også viktig at styringskanalene beskyttes mot interferens som kan gi uønskede kommandoord med katastrofalt resultat. Et av de systemene som er i bruk, er basert på en verifikasiing av mottatt instruks over telemetri-forbindelsen før ordenen iverksettes. Et annet system er basert på beskyttelse av kodeord ved bruk av omfattende feildetekterende koding. For militære satellitter kan det også være nødvendig å bruke kryptering på fjernstyringskanalen for å hindre at en satellitt settes ut av spill.

## Overføringssystem

De fleste satellittene, og spesielt alle ESA-satellittene, er utstyrt med en spesiell TT&C-transponder for overføring av styringssignalene til satellitten, telemetridata fra satellitten. Den gjør det også mulig å foreta nøyaktig avstandsmåling. Et signal på opplink sendes tilbake til jordstasjonen, og da kan jordstasjonen måle forsinkelsen og dermed avstanden. Tidligere ble det brukt analog modulasjon for avstandsmåling, men nå benyttes ofte spredt spektrumsignaler av samme type som benyttes for satellittnavigasjon. Avstandsmåling kombinert med pekedata for jordstasjonsantenna gir et estimat for satellittposisjonen, men det kan være mer effektivt å foreta avstandsmåling fra flere jordstasjoner som ligger mest mulig langt fra hverandre.

Blokkdiagram for en slik transponder er vist på figuren.



TTC

Forfatter: [Gunnar Stette](#)

Tidligere ble VHF-båndet (130 MHz) brukt for disse funksjonene. Nå er det hovedsaklig S-bånd (2 GHz) som blir brukt. Med et økende antall satellitter i drift må også X-bånd (8 GHz) tas i bruk.

Den kritiske komponenten i dataoverføringene er TT&C-antenna på satellitten. Den må ha tilnærmet samme vinning i alle retninger og det betyr at antennevinningen er mindre enn 1, altså under 0 dB. MARISAT-satellitten ble utstyrt med en antenn (VHF) på toppen av antennesystemet, som figuren viser.

For NATO III-satellitten ble det brukt en helt annen løsning. Den ble utstyrt med en rekke kryssede dipoler (S-bånd) plassert rundt "midjen" av satellitten, og da vil mest sannsynlig alltid en av disse peke mot en TT&C-stasjon på jorda.

OLYMPUS har også TT&C-antenne (S-bånd) på toppen av antennesystemet.

For å oppfylle kravene til linkbudsjettet (se relatert fagstoff) kan lav antennevinning i satellitten kompenseres ved å bruke store antenner for TT&C-stasjonene, og her er det større frihet. Typiske antennediameterer for disse stasjonene kan være i området 10 til 25 meter. I visse vanskelige situasjoner har det vært brukt stasjoner med antenner opp til 70 meter diameter.

## Datatyper

Vi kan skjelne mellom forskjellige typer data.

### "Husholdningsdata"

Dette er data for den normale drift av satellitten og omfatter temperaturinformasjon fra elektronisk utstyr, solcellepaneler, trykk i drivstofftanker, strømmer og spenninger i det elektroniske systemet, statusinformasjon som viser hvilke enheter som er i bruk, og hvilke modi de opererer i. Antallet parametre som overvåkes, kan være opp til 100 for store kommunikasjonssatellitter. Oppdateringstida kan dreie seg om noen minutter. Dermed blir dataoverføringskapasiteten som kreves til slike data ganske liten, noen hundre bit per sekund.

### Retningsinformasjon

Dette omfatter data fra forskjellige sensorer, inkludert akselerometer, som mäter stillingen for satellitten relativt til sol, jord og stjerner. Oppdateringshastigheten må her være høyere, typisk fra en til fire ganger per sekund. Oppløsning og nøyaktighet må være høy, slik at den totale datahastigheten kan bli større.

### Nyttelastinformasjon

Hva som overføres om nyttelosten, er svært avhengig av funksjon og banetype. Typiske parametre som måles er temperaturen på effektforsterkerne, spenning og strømstyrke fra strømforsyningen, informasjon om konfigurasjonen for redundante deler, forsterkningsverdier (gain setting) og måling av signaleffekter i overføringskjeden.



## Vitenskapelige data

For visse satellittprosjekter skjer innsamling av data i satellitten, og slike data må leses ned til jordstasjoner når de er innenfor sikt. Her kan det dreie seg om store datamengder, titalls megabyte, som er meget forskjellig fra de moderate datamengdene som leses ned under normal drift.

### Koding av telemetridata

Det tradisjonelle systemet for overføring av telemetridata fra en satellitt er tidsdelt sampling av analoge kanaler fulgt av analog/digital omforming, ofte med 8 bit kvantisering. De analoge datasignalene er multiplexert med signaler som i utgangspunktet er digitale. Analoge bredbåndssignaler overføres ved å frekvensmodulere disse på bærebølgen via en spenningsstyrt oscillator (VCO = Voltage Controlled Oscillator). Nå er det mer aktuelt å gå over til pakketransmisjon for telemetridata.

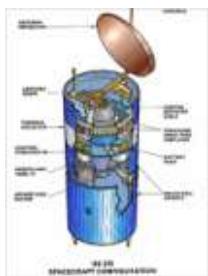
### Signalformat

Det første skritt ved utforming av et telemetrisystem er å sette opp en liste med alle parametrerne som skal overføres, og angi type informasjon og hvor ofte den må overføres. For dataoverføring over et system med pakketransmisjon konstrueres et dataformat ved at de forskjellige telemetrisignalene settes inn i en ramme, og de forskjellige rammene multiplexeres inn i en superramme.

## Eksempel på satellittplattformer

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

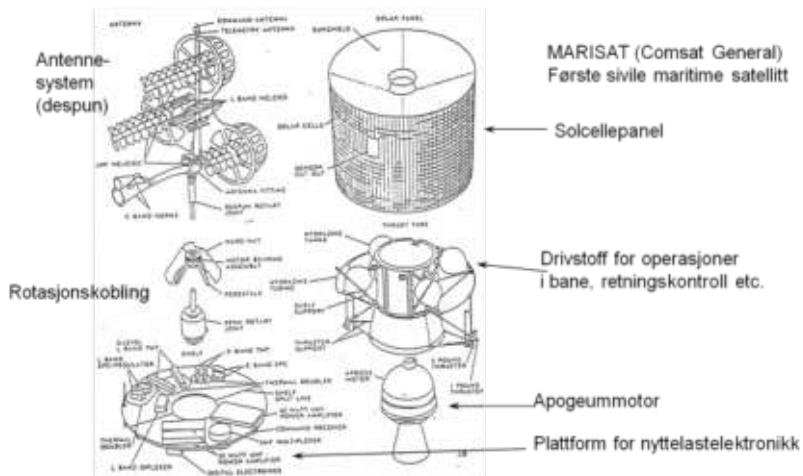
[Eksempel på satellittplattformer \(9595\)](#)



De moderne applikasjonssatellittene er blitt store, avanserte og kompliserte. En av historiens mest vellykkede plattformer for geostasjonære kommunikasjonssatellitter er Hughes HS376, som er rotasjonsstabilisert. For å illustrere de fundamentale funksjonene for satellitter er det hensiktsmessig å gå tilbake til tidlige versjoner, som var mer oversiktlig. Her skal vi se på de to hovedtypene: verdens første maritime satellitt Marisat, som var rotasjonsstabilisert, og den treaksestabiliserte ESA-satellitten OLYMPUS.

### Rotasjonsstabilisert satellitt, MARISAT

Figuren viser en rotasjonsstabilisert satellitt, den første maritime satellitten, fra den tid satellittene var enkle og oversiktlig.



MARISAT  
Opphavsmann: [COMSAT](#)

Sentralt i plattformen sitter apogeummotoren, som hadde fast brennstoff, og over den sitter tanker for drivstoff til banekorreksjoner o.l. Det som var etterstebet under konstruksjonen, var å sikre den dynamiske stabiliteten.

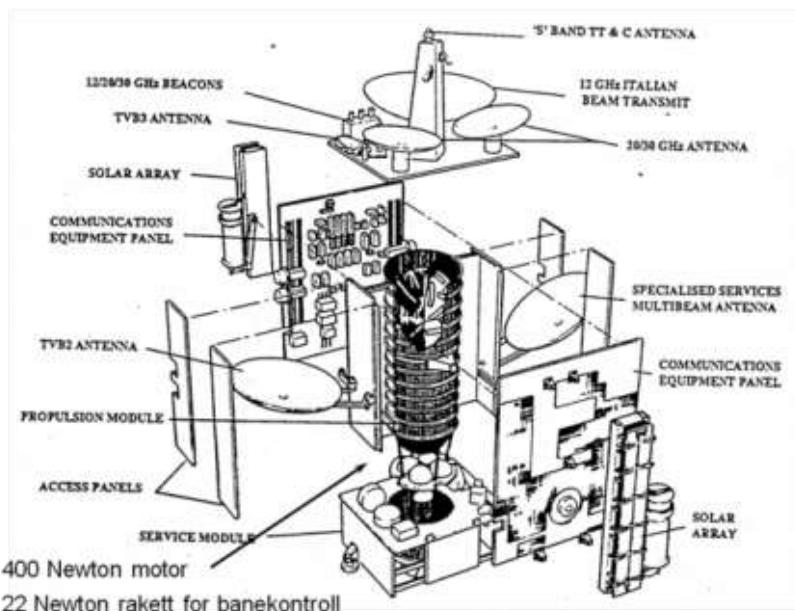
Nyttelastelektronikken er plassert på en plate sentralt i satellitten. Massen er videre lagt så nær omkretsen av den sylinderiske strukturen som mulig for å sikre stort dreiemoment om hovedaksen. Plassering av platen nær midten sikrer et lavt dreiemoment om de andre aksene.

Solcellepanelene har åpninger for IR-sensorer som registrerer pekeretning, og her er åpning for dyser for retning og posisjonskontroll. Siden satellitten roterer, må dysene avfyres til nøyaktig rett tid.

De største antennene ble brukt for en amerikansk militær nyttelast som opererte på UHF-bånd, men de små antennene var for sivil kommunikasjon på L-bånd. Det var derfor mange forskjellige signaler som måtte passere fra den roterende plattformen til den delen som kontinuerlig var rettet mot jorda (despun). Disse signalene ble overført via en såkalt "rotary joint".

### Treaksestabilisert satellitt, OLYMPUS (ESA)

Figuren viser en treaksestabilisert satellitt, ESAs Olympus, hvor formålet i første rekke var utvikling av en stor europeisk plattform.



Olympus  
Opphavsmann: [ESA](#)

En stor apogeummotor er sentralt plassert for at konstruksjonen skal kunne ta opp den store kraften når den brenner. Antennene er foldet sammen under oppskyting, og solcellepanelene er opprullet. Elektronikken, og spesielt effektforsterkerne, som produserer mye varme, er plassert på nord og sør-panelene, som er rettet mot det kalde verdensrommet.

Satellitten hadde en konstruksjonssvakhet når det gjaldt retningskontroll, idet de infrarøde sensorene som skulle detektere jordhorisonten, feilet. På et visst tidspunkt mistet den styring. Den roterte som en padleåre med solcellepanelene i en slik retning at solcellene ikke ble belyst. Dermed ble telemetriforbindelsen avbrutt og satellitten var ute av kontroll. Dessuten var den i drift østover i geostasjonær bane (en selvmotsigelse), men ved forente anstrengelser av organisasjoner i Australia og USA ble den brakt tilbake til livet. En antenne på toppen er tilnærmet omnidireksjonell, og den kunne brukes til overføring av telemetridata selv om retningskontrollen var tapt.

## Satellittanvendelser

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellitter, nyttelaster og anvendelser \(45182\)](#)

Satellitter har mange forskjellige anvendelser. Begrepet "applications satellite" (nyttesatellitt) benyttes ofte om romsegmenter som inngår i etablerte anvendelsesområder som telekommunikasjon, kringkasting og navigasjon. En viktig anvendelse er overvåkning av jordkloden, både for å registrere den øyeblikkelige tilstanden som vær og vegetasjon og for å følge langtidsutvikling knyttet til klima.

Romteknologien har åpnet for mange nye anvendelser av satellitter, ikke minst til studier av vektløshet og utforskning av verdensrommet.

# Former for satellittkommunikasjon

Forfatter: Gunnar Stette

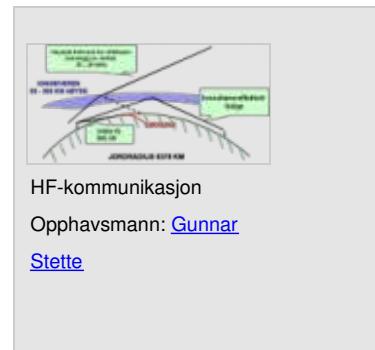
[Former for satellittkommunikasjon \(49324\)](#)



Det er mulig å kommunisere over store avstander, for eksempel fra Norge til Australia, ved hjelp av radiobølger som reflekteres via ionosfæren. Problemet med denne refleksjonsmekanismen var at båndbredden og dermed kapasiteten var sterkt begrenset, og at den varierte med tid og sted. Arthur C. Clarke foreslo i sin berømte artikkel å plasserte reléstasjoner i rommet, i den geostasjonære banen. Det gikk noen år før denne ideen kunne realiseres, men nå har den geostasjonære bane blitt en ettertraktet begrenset naturressurs. Senere er det utviklet også andre kommunikasjonssystemer som benytter satellitter i andre baner, og som kan tilby mange nye tjenester.

## Problemer med bruk av ionosfæren

Ionosfæren har spilt en viktig rolle ved kortbølgekommunikasjon, men den har noen alvorlige begrensninger. For det første en båndbredden begrenset. Hvis frekvensen blir høyere enn 30–40 MHz, vil ikke radiobølgene bli reflektert. Den øvre frekvensen er avhengig av forholdene i ionosfæren og av innfallsvinkelen. Dessuten kan ionosfæren bestå av flere lag, og det kan gi flerveisstrømning som spesielt gjør datakommunikasjon svært vanskelig.



## Satellitter som reléstasjon

De første satellittene var rene reléstasjoner. De tok imot signalet fra senderstasjonen, flyttet signalet i frekvens, forsterket det og sendte det ned til mottakerstasjonen. Disse satellittene fungerte som en "kabel gjennom rommet", eller som en "bent pipe". Grunnen til frekvensforskyvningen er å hindre ustabilitet. Forsterkningen er høy, og en liten lekkasje av signal fra senderantenne til egen mottakerantenne ville gi ustabilitet.



Utfordringen for de første satellittene var å generere nok sendeffekt. Ved overføring av flere signaler, modulerte bærebølger, er det mulig å la dem gå gjennom den samme forsterkeren, men det er mulig å øke kapasiteten ved å fordele signalene til forskjellige forsterkere. Signalene styres til forsterkerne ved hjelp av valg av bærefrekvens og filtre. Kombinasjonen av et båndpassfilter med tilhørende forsterker betegnes en **transponder**, og den er karakterisert ved parametrerne båndbredde og effekt. Når forsterkeren er knyttet til en bestemt antennen med gitt vinning, benyttes ofte produktet av effekt og antennevinning, EIRP, i stedet for transpondereffekt.

Dagens TV-satellitter kan ha et stort antall transpondere. Telenors Thor 6-satellitt har 36 transpondere som er knyttet til antenner med forskjellig geografisk dekning, Norden, Øst-Europa og Sentral-Europa. Transponderbåndbredden er 27 MHz og EIRP over 52 dBW i sentrale deler av strålen.

## Satellitter med regenerering av signalet

Overføringskvaliteten for en satellittforbindelse er bestemt av både opplink (sendeterminal til satellitt) og nedlink (satellitt til mottakerterminal). Vi kan si at den totale støyen er summen av støy på opplink og støy på nedlink. Tradisjonelt har sendeeffekten i satellitten vært en begrensende faktor. På opplink er det billigere å generere høy effekt. Dermed har det vært nedlinkkvaliteten som har vært dominerende.

Ved digital overføring ville det være mulig å demodulere bærebølgen i satellitten og modulere en ny bærebølge før signalet sendes ned til mottakerterminalen. Da vil den totale bitfeilsannsynligheten være summen av bilfeilsannsynlighetene på opp- og nedlink. Det kan lett vises ved å se på kurver for bitfeilsannsynlighet som funksjon av forholdet mellom energi per bit og støytetthet at **addisjon av støy gir dårligere resultat enn addisjon av bilfeilsannsynligheter.**

### Satellitter med signalbehandling om bord

En videreføring av regenerering ville være å innføre svitsjing og ruting i satellitten. Dette åpner for nye systemkonfigurasjoner. I IRIDIUM-systemet blir signalet demodulert og rutet videre fra satellitt til satellitt til det kommer til den satellitten som til enhver tid er nær mottakerstasjonen. Kommunikasjon mellom bærbar terminal og satellitt foregår på frekvenser rundt 1,6 GHz, mens forbindelsene mellom satellittene bruker frekvenser ved 29 GHz. Fordi satellittene beveger seg i forhold til brukerne, og fordi hver satellitt har 48 antennestråler, er det hele tiden nødvendig å forandre veivalget gjennom satellittkonstellasjonen. Forsinkelsen for signalet gjennom en slik forbindelse vil øke på grunn av reformatering og signaleringen i systemet.

I IRIDIUM-systemet er tjenestetypene nokså enhetlig, telefoni og lavhastighetdata. Det er også utviklet systemer med uensartede terminaltyper. Da vil det i tillegg til ruting av signalet også være nødvendig å remodulere slik at bærebølge og datahastighet er tilpasset mottakeren.

DVB-RCS-systemet, DVB med returkanal via satellitt, er utviklet til å omfatte ruting og remodulasjon i satellitten. Trafikken er Internett-orientert, og dermed vil systemet være meget fleksibelt.

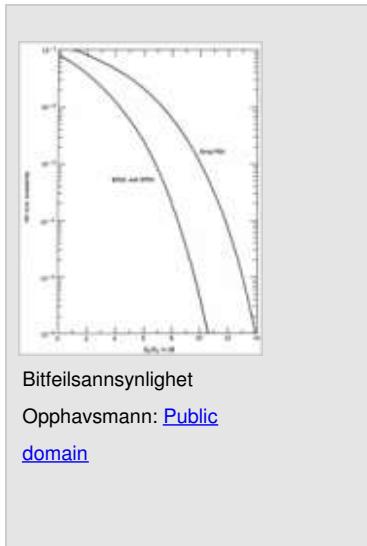
### "Store and forward"-systemer

Det er så langt tale om overføringssystemer for klassisk telekommunikasjon hvor forsinkelsen gjennom satellitten holdes så lav som mulig. En helt annen systemtype er basert på datalagring i satellitten med fysisk transport til en posisjon hvor informasjonen kan leses ned til mottakerstasjonen. En satellitt i polbane er velegnet til slike tjenester. Den vil i løpet av et døgn passere over alle punkter på jordoverflata og "plukke opp" signalet fra sendere i vilkårlige posisjoner. Etter et antall omløp vil den være synlig fra mottakerstasjonen hvor informasjonen kan leses ned. Hvis mottakere er plassert nær en pol, for eksempel på Svalbard, vil forsinkelsen være begrenset til ett omløp.

Fordelen for et slikt system er at én satellitt gir global dekning, og at banehøyden er lav. Det benyttes lave frekvenser i VHF og UHF-båndet. Dermed blir brukerterminalene enkle og billige. Det finnes et kommersielt system basert på et slikt system, Orbcomm. Det blir mest brukt for "maskin-til-maskin"-kommunikasjon, overvåkning av jernbanevogner, containere, oljebrønner, demninger og lignende. Meldingene kan være av forskjellig lengde, fra noen bytes til store filer.

### Andre systemer

I tillegg til systemene utviklet for tradisjonell telekommunikasjon finnes det forskjellige satellitter for spesielle anvendelser, som mottaking av nødsignal fra bøyer som flyter opp ved forlis, til innsamling av data fra sendere montert på ville dyr. Argos-systemet tilhører denne kategorien.



20 hvaler i Stillehavet ble utstyrt med radiosendere som overførte posisjonsdata via en Argos-satellitt. Dette gjorde det mulig å følge bevegelsene over et stort havområde.

# Systemer for satellittkommunikasjon

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Systemer for satellittkommunikasjon \(23805\)](#)

Muligheten for kommunikasjon over store avstander var en viktig drivkraft for utvikling av romteknologi. Fra 1960 til i dag har vi sett utvikling av stadig nye systemer. De første satellittsystemene ble brukt til langdistansekommunikasjon, til å knytte sammen kontinentene. Senere gjorde teknologiutviklingen det mulig å operere med stadig mindre terminaler nærmere brukere, og nå har vi håndholdte satellittelefoner og mottakere for TV-kringkasting.

## Interkontinental kommunikasjon

På den tid kommunikasjon via satellitt begynte å bli mulig, var de globale telesystemene lite utbygget. Den første kabelen for transatlantisk telefoni kom i 1956, og den hadde en kapasitet på 120 kanaler. Derfor var telemynghetene i alle land interessert i å ta satellittteknologien i bruk. Det resulterte i INTELSAT-organisasjonen, som var eiet av en organisasjon med 200 medlemsland, og som bygget ut et globalt system for satellittkommunikasjon.

Satellittstasjoner var store og kostbare på den tid (på grunn av at satellittene var små og svake), og de nordiske land gikk sammen om å bygge en felles stasjon på Tanum, som ligger i Sverige mellom Oslo og Göteborg. Den hadde antennen med diameter på 30 meter og var av samme typen som jordstasjonen i Umm Haraz ved Khartoum, Sudan, som er vist på bildet.

## Nasjonale systemer

Etter hvert som teknologien ble utviklet, ble stasjonene mindre og billigere. Derved kunne anvendelsesområdene utvides. Et gjennombrudd for nasjonal satellittkommunikasjon skjedde i slutten av 1970-årene da det ble bygget et satellittsystem, Norsat, for kommunikasjon med oljeplattformene i Nordsjøen. Det var basert på å leie satellittkapasitet fra INTELSAT og var det andre i verden etter Algerie i sitt slag, og det første i Europa. Stasjoner på plattformene kunne da kommunisere med en stasjon på Eik i Rogaland.

Senere ble dette systemet utbygget til også å omfatte Svalbard, noe som var en revolusjon av kommunikasjonsforholdene for denne øygruppa, med automattelefoni, Internett og TV begge veier. I 2004 ble det lagt kabler til Svalbard. Disse er basert på overføring av lyssignaler over glassfiber, og de har en overføringskapasitet i størrelsesorden flere titall tusen megabit per sekund, og de kan erstatte mange av satellittsystemene.

## Bedriftskommunikasjon

Den videre utviklingen førte til utbygging av bedriftsinterne satellittsystemer, de såkalte VSAT-systemene, som særlig fikk utbredelse i USA. I Europa var det inntil 1990-årene en strikt monopollovgivning som begrenset utbyggingen.

## Maritim kommunikasjon

På ett område har satellitter en helt unik funksjon. Det gjelder kommunikasjon med skip på de store hav. Her er det ingen konkurrerende teknologi. En internasjonal organisasjon, INMARSAT, hvor Norge spilte en viktig rolle, utviklet det første internasjonale, sivile maritime satellittsystemet, og det ble satt i drift i 1982. Den driver nå satellitter over hvert av de store havområdene. I første omgang var INMARSAT beregnet på bruk på større skip, med relativt store og kostbare skipsstasjoner.



Jordstasjon i INTELSAT-systemet, 30 meter antennediameter, Umm Haraz, Sudan.

Fotograf: [Gunnar Stette](#)



Eik jordstasjon var sentral i satellittsystemet for plattformene i Nordsjøen og senere også for Svalbard og for kommunikasjon med skip. Opphavsmann: [Telenor](#)



VSAT(Very Small Antenna Aperture)-terminaler i lukkede nett for næringslivet.



Prinsippskisse for INMARSAT-systemet for å knytte mobile brukere til det globale nettet. Opphavsmann: [INMARSAT](#)



Det er mulig med direkte kommunikasjon til håndholdte terminaler ved bruk av store flerstråle-antennene i satellitten.

Forfatter: [Boeing](#)

Teknologiutviklingen førte også her til at stasjonene stadig ble mindre og billigere, og dermed vokste det potensielle markedet. Nå omfatter INMARSAT-systemet et bredt spektrum av stasjoner og tjenester. Ikke minst har de bærbare terminalene for telefoni og dataoverføring med tilgang til Internet fått stor utbredelse.

Opphavsmann: [Hughes](#)

Satellitter har også spilt en viktig rolle i systemer for alarmering og nødkommunikasjon, ikke minst viktig for skip på fjerne hav.

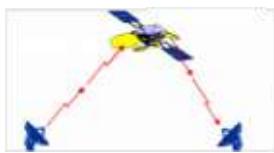
### Mobilkommunikasjon

Ved siden av utviklingen av de maritime systemene har vi fått systemer som representerer en utvidelse av de vellykkede jordbundne mobilsystemene. De benytter seg både av satellitter i geostasjonær bane, som ACeS og Thuraya, og av satellittkonstellasjoner i lavere baner, som Iridium og Globalstar.

# Hvordan fungerer en telesatellitt?

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Hvordan fungerer en telesatellitt? \(49224\)](#)



Den prinsipielle virkemåten for en satellitt er meget enkel. Den er en reléstasjon i rommet med ei mottakerantenne rettet mot jorda, en forsterker og en sender som mater sendeantenner som er rettet mot de områdene på jorda som skal dekkes. Den praktiske realiseringen er derimot meget utfordrende. En typisk geostasjonær kommunikasjonssatellitt, 36 000 km over jordoverflata, veier ved oppskyting typisk 3 tonn, og den skal forsynes med opptil 15 kW effekt, natt og dag, i sol og skygge. Satellitten må holdes i riktig posisjon og med riktig orientering. En kringkastingssatellitt for TV som dekker Norden, har en antennestråle med en diameter på 3 grader, og den må styres tilsvarende nøyaktig for å holdes på målet.

La oss se på noen grunnleggende teknologiske forhold som forklarer muligheter og begrensninger ved satellittkommunikasjon:

Det mottatte signalet må alltid være kraftigere enn støyen. Ved digital overføring må energien i hver bit vi mottar, være ca. 10 ganger større enn den støyen som er i en båndbredde på 1 Hz. Det betyr også at jo høyere datahastighet vi skal overføre, desto større effekt kreves, og nødvendig effekt er proporsjonal datahastigheten.



Antenner

Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

En større antenn samler opp mer mottatt effekt. Når en satellitt belyser jordoverflata med en viss effekt per kvadratmeter, vil den mottatte effekten være proporsjonal med antennearealet. Når Telenor sender satellitt-TV til Norge, vil sendeffekten fordeles over Norden, og hvis sendeffekten er 100 watt, sier det seg selv at effekten per kvadratmeter blir ganske liten.

En stråle fra satellitten vil være rettet mot dekningsområdet, men det vil også falle litt effekt utenfor hovedstrålen. Den som er i Spania, kan for eksempel motta norsk TV selv om effektettheten på bakken er lavere, kanskje med en faktor på 3. Hvis til gjengjeld mottakerantenna som benyttes, har tre ganger så stort areal, blir mottatt effekt den samme og kvaliteten like god.

Ved radiotransmisjon avtar signalstyrken med kvadratet av avstanden. Grunnen til det er at effekten brer seg utover fra senderen som en kuleoverflate, og med økende avstand vil den øke kvadratisk.

Derfor vil effekten per kvadratmeter synke med kvadratet av avstanden. En geostasjonær satellitt er typisk 40 000 km fra mottakeren, og det betyr at om effekten ble sendt fra satellitten i alle retninger, ville effekten måtte fordeles på en overflate som var 40 ganger så stor som hele jordoverflata. Satellittantennen må "styre" effekten til dekningsområdet på bakken

Vi kan sammenfatte de teknologiske parametrerne i en omfattende ligning som gir sammenhengen mellom alle parametrerne i systemet. Poenget med denne er å vise at det som betyr noe, er at produktet av de forskjellige faktorene må nå en viss verdi, størrelsesorden 10. Samtidig er det slik at de enkelte parametrerne kan velges relativt fritt. Hvis for eksempel mottakerantenna er liten, må senderantenna være tilsvarende større. Detaljene skal vi imidlertid ikke bry oss med her.



$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left(\frac{P_{sat} \cdot G_{sat}}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda}{4\pi d} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{G_m}{T_m} \cdot \frac{1}{R}\right) \cdot \text{Data rate}$$

Sendeffekt (W)  
Antenneveivning sender  
Bølgelengde  
Antenneveivning mottaker  
Støyeffektetthet (W/Hz)  
Avstand  
Boltzmanns konstant =  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ W/Hz/K}$   
Mottaker støytemperatur (K)

Ligning  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

Parameteren R = Datarate er av stor betydning i regnestykket. Hvor mange bit per sekund kreves for overføring av tale? De første sivile systemene var basert på 64000 bit/s per kanal (PCM = Pulse Code Modulation). Nå kan denne overføringshastigheten reduseres til under 6400 bit/s. Det betyr igjen at sendeffekten kan reduseres med en faktor på 10, at antennearalet kan reduseres med samme faktor, eller det kan overføres 10 samtaler i stedet for én. For TV har reduksjonen i nødvendig datahastighet vært enda mer dramatisk, fra ca. 250 Mbit/s til ca. 2 Mbit/s. Uten denne reduksjonen ville digital TV-kringkasting ikke være realiserbart. Nå er det mulig å erstatte én analog TV-kanal med kanskje 20 digitale kanaler som dessuten har høyere overføringskvalitet og mulighet for tilleggstjenester

Møysommelig teknologisk utviklingsarbeid over noen tiår har gitt store forandringer, som følgende eksempel viser. Den 10. juli 1962 ble det for første gang overført levende bilder mellom Amerika og Europa. Det skjedde ved bruk av satellitten Telstar som ikke hadde retningsstyring, og som derfor ikke kunne rette inn antenner mot jordkloden. Følgen var at den lille effekten den sendte ut, ga så lav signalstyrke på bakken at mottakerstasjonen måtte være kjempestor. Den europeiske stasjonen i Pleumeur Bodot var 60 meter høy og veide 340 tonn.

Satellitten, som veide ca. 80 kg, var ikke i geostasjonær bane, slik at den var synlig samtidig fra Amerika og Europa bare i en 10 til 20 minutters periode ved hvert omløp. Likevel var dette en presentasjon som blant annet ble markert ved utsendelse av spesielle frimerker i flere land.

Dagens TV-satellitter er i geostasjonær bane og sender 24 timer i døgnet året rundt. De har en kapasitet på typisk 1000 Mbit/s og kan dermed betjene et område på størrelse av Europa med opp til 500 samtidige TV-program til mottakerantennene med en diameter på 60 cm.

Innenfor de andre anvendelsesområdene ser vi en liknende utvikling.

# Mobil satellittkommunikasjon

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Mobil satellittkommunikasjon \(24039\)](#)

I 1970-årene forliste to store tankskip, "Berge Istra" og "Berge Vanga". Når radioforbindelsen til skip ble brutt, kunne dette skyldes ugunstige ionosfæriske forhold. Dermed kunne det gå mange dager før leting etter overlevende ble igangsatt. "Berge Istra" forsvant i Stillehavet i 1976, og etter en tid ble letingen oppgitt. Etter 20 døgn ble tilfeldigvis to overlevende spanske matroser funnet på en flåte. Søsterskipet "Berge Vanga" forsvant sporløst i Sør-Atlanteren i 1979, og ingen av de 40 om bord ble berget.

Disse hendelsene rystet det norske samfunnet og bidro til at Norge gikk sterkt inn for å utvikle et kommunikasjonssystem som kunne forbedre sikkerheten på havet. INMARSAT-organisasjonen ble etablert og dette systemet ble en formidabel suksess, også kommersielt, ikke minst fordi systemet kunne anvendes av stadig større brukergrupper. Nå utvides systemene til å omfatte stadig større terminaltyper, inkludert håndholdte telefoner.

## Systemstruktur

Systemstrukturen for INMARSAT er vist på figuren, og funksjonen er enkel. La oss gjøre en sammenligning med et mobilsystem av typen GSM. Hver mobiltelefon lytter kontinuerlig på signaler fra nærmeste basestasjon. Et anrop til eller fra en mobiltelefon går derfor til basestasjonen og videre via linjer til en mobilcentral som setter opp sambandet til det vanlige telenettet. Fordi radiobølgene ved disse frekvensene stort sett går i rette linjer, må vi ha et stort antall basestasjoner for å dekke et land.

Funksjonen for INMARSAT-systemet er å sette opp forbindelsen fra den mobile terminalen til en "basestasjon" (jordstasjon) som er knyttet til det vanlige telenettet. Fordi skipene befinner seg utenfor området for fri sikt, må forbindelsen gå via en reléstasjon i rommet. Denne reléstasjonen tar imot radiosignalene fra skipet, forsterker dem, og sender dem til jordstasjonen. For øvrig er funksjonene meget nær de samme, og systemet kan utvides til forskjellige typer trafikk og forskjellige typer jordstasjoner.

Hovedutfordringene ved utvikling av INMARSAT-systemet var effektiv utnyttelse av satellitteffekten. Brukerterminalene må være så små og kompakte som mulig, og med små terminalantennene settes store krav til ytelsen for satellittene.

## Terminal- og tjenestetyper

### INMARSAT A



INMARSAT  
Opphavsmann:  
[INMARSAT](#)



INMARSAT A  
Opphavsmann: [NERA](#)



Satellitephon  
Opphavsmann: [NERA](#)



INMARSAT Mini  
M  
Opphavsmann:  
[NERA](#)

De første terminalene, INMARSAT A, beregnet på store skip, hadde en antennediameter på typisk 1,2 meter, og vekten av elektronikken kunne være fra 30 til over 100 kg. Terminalene var også ganske kostbare. Tjenestetilbudet var telefoni og teleks, og den totale overføringskapasiteten var begrenset. De aller første satellittene, Marisat, kunne overføre 3 samtidige telefonsamtaler. Den neste, MAROTS, hadde en kapasitet på rundt 50 kanaler. Siden har kapasiteten bare øket. Telekstjenesten, som var basert på bruk av fjernskrivere, var en viktig tjeneste som utnyttet kapasiteten godt. Hver telefonkanal kunne deles opp i 20 telekskanaler.

### INMARSAT satellittelefon

Senere kunne antennediameter reduseres noe, og elektronikken gjøres litt lettere. Det ledet til de første "bærbare" eller transportable terminalene, som veide vel 30 kilo. Disse viste seg likevel å ha viktige funksjoner. Denne type ble betegnet "satellitelefon", og den ble godt kjent under den første Golfkrigen. Disse telefonene gjorde det mulig å rapportere fra selve slagmarken på en helt ny måte.

Ny teknologi gjorde det mulig å bygge terminalen inn i en "stresskoffert", INMARSAT M. Antenna for terminalen ble da bygget inn i lokket på kofferten som kunne tas av og rettes mot satellitten. Telefon sambandet kunne settes opp automatisk; det var bare å løfte av røret og slå hvilket som helst telefonnummer i verden.

### Mini-M

En enda mer kompakt versjon, mini M, er den mest solgte brukerterminal i INMARSAT-systemet. Den har størrelse som en liten bærbar datamaskin og veier vel 2 kg. Et stort antall slike terminaler er i drift, og er for eksempel attraktive blant alle dem som reiser i utviklingsland og krigssoner hvor adgangen til et offentlig nett er dårlig.

### INMARSAT C

Når datahastigheten reduseres, kan antennestørrelse og/eller sendeffekt også reduseres. Et eksempel på dette er realisert i terminaltypen INMARSAT C. Den opererer med en datahastighet på 600 bit/s og er derfor velegnede til overføring av små datamengder.

Én versjon har rundstrålende antennen. Det betyr at sendeffekten til gjengjeld må økes til 25 watt. Denne versjonen har for eksempel blitt brukt på seilbåter i Whitbread-regattaen for å oppgi posisjon og for å motta posisjonsinformasjon om konkurrentene. For denne versjonen er det ikke nødvendig å rette antenna inn mot satellitten.

En annen versjon brukes til å rapportere vannstanden i reservoarer i fjellet. Disse kan være utstyrt med en fast antennen som rettes mot satellitten. Til gjengjeld er det tilstrekkelig med 2 watt sendeffekt, som kan genereres av solcellepaneler.

### INMARSAT M4

Én tjeneste som har fått stadig større interesse og utbredelse, er dataoverføring og internetttilgang. INMARSAT D er beregnet på denne typen bruk. For å få størst mulig overføringshastighet gjøres antennen større ved å folde den ut, og overføringshastigheten kan da bli 64 kbit/s, det samme som for en ISDN-forbindelse.

### BGAN



INMARSAT C  
Opphavsmann: [NERA](#)



INMARSAT M4  
Opphavsmann: [NERA](#)



INMARSAT BGAN  
Opphavsmann: [NERA](#)

Den siste INMARSAT-varianten betegnes BGAN (Broadband Global Area Network). Den er både kompakt i utførelse og gir datahastigheter opp til 384 kbit/s. For å kunne realisere dette benyttes en mer avansert satellitt hvor jordkloden dekkes av et stort antall smale stråler. Det betyr at satellitteffekten utnyttes mye mer effektivt ved at den bare sender til de områdene hvor mottakerne befinner seg.

# Satellittelefon

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellittelefon \(49085\)](#)



De første systemene for satellittkommunikasjon ble benyttet til forbindelse over lange avstander mellom store jordstasjoner. Disse satellittforbindelsene inngikk i det globale telenettet. Dette kalles nettorienterte systemer. En telefonsamtale ble rutet gjennom telenettet på basis av trafikkforhold og tilgjengelighet. Den som ringer, kan noen ganger få tildelt en satellittforbindelse, og andre ganger en forbindelse via en kabel. Ettersom teknologiutviklingen gjorde det mulig å etablere forbindelser til stadig mindre og mindre kostbare jordstasjoner, ble det mulig for brukerne å benytte satellittforbindelse for tilgang til det globale telenettet. Dette er brukerorienterte systemer.

## Funksjonene for et satellittelefonsystem

En telefonsamtale fra en vanlig mobiltelefon går via en radioforbindelse til nærmeste basestasjon. Med de frekvensene som benyttes, er dette stort sett avgrenset til fri sikt, og for GSM-systemet er det i tillegg en begrensning på 35 km på grunn av synkronisering av signalene i de to retningene. For å dekke et stort område med mobiltelefoni må det benyttes et stort antall basestasjoner. Hver basestasjon er knyttet til det globale telenettet, og samtalene kan sendes videre på samme måte som samtaler fra en bruker med fast linje.

Funksjonen for et satellittsystem for telefon er det samme. Hovedforskjellen er at forbindelsen mobiltelefon–basestasjon går via en kommunikasjonssatellitt i verdensrommet. Hvis satellitten er i geostasjonær bane, vil avstanden bli  $(40\ 000 + 40\ 000)$  km for hver signalretning. Hovedutfordringen blir dermed transmisjonsbudsjettet (effektbudsjettet).

En mobiltelefon vil nødvendigvis ha lav antennevinning, både for sending og mottaking. Mottatt signal-støy-forhold, S/N, må være over en viss verdi, og i det matematiske uttrykket for S/N inngår både sendeffekt, antennevinning og signalsvekking på grunn av avstand.

## Utvikling av mobilsystemer

Det første og viktigste systemet for brukerorienterte telefontjenester ble etablert av INMARSAT, men i begynnelsen var dette bare mulig via store og kostbare jordstasjoner beregnet på bruk på store skip. Den første standarden, INMARSAT A, hadde antennediameter på godt over 1 meter, retningsstabilisert plattform og en terminal under dekk på opp til 100 kg.

Den generasjonen som kom i 1996, INMARSAT Mini M, ble en stor kommersiell suksess. Ønsket var likevel å utvikle systemer for håndholdte terminaler, men dette var krevende. Kildekoding, eller signalkompresjon, gjorde det mulig å overføre telefoni ved stadig lave datahastigheter, og feilkorrigende koding gjorde stadig mer effektiv bruk av den overførte effekten.



Den mottatte effekten  $P_{mottaker}$  er proporsjonal produktet av sendeffekt,  $P_{sender}$ , antennevinning for sender,  $G_{sender}$ , signalsvekking på grunn av avstand,  $d$ , og vinning for mottakerantenna,  $G_{mottaker}$ .

$$P_{mottatt} \sim P_{sender} \times G_{sender} \times \frac{1}{d^2} \times G_{mottaker}$$

Antennevinningen i en håndholdt telefon er naturlig begrenset til 1 (0 dB). Det var da bare to andre faktorer som til en viss grad kunne forbedres, avstand fra satellitt til mottaker og antennevinning i satellitten. På nedlink, forbindelsen fra satellitt til mottaker, var det mulig å øke utsendt satellitteffekt, men dette er ikke uten videre mulig på opplink, forbindelsen fra mobil til satellitt. Det skyldes at sendeffekten i en telefon må begrenses av hensyn til helse og sikkerhet.

## Lavbanesystemer

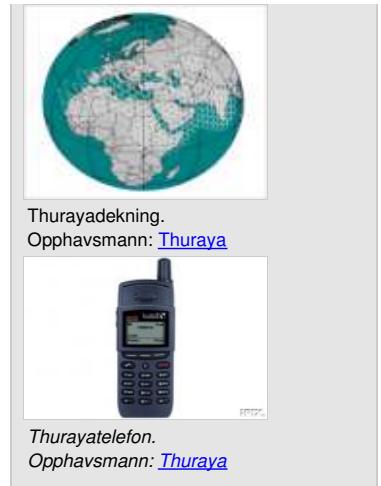
Avstanden til en geostasjonær satellitt er omkring 40 000 km. En gruppe ingeniører ved Motorola i USA kom opp med forslag til et system hvor satellittene skulle ha en banehøyde under 1000 km. Men da var ikke satellittene geostasjonære, og for å gi tidskontinuerlig dekning av alle punkt på jordoverflata var det nødvendig å benytte en satellittkonstellasjon. Den bestod opprinnelig av 77 satellitter, nå 66, og systemet fikk dermed navnet Iridium. Til gjengjeld ble typisk avstand til satellittene redusert fra 40 000 km til 1 000 km, og det gir en gevinst på  $(40/1)^2 = 1600$ . Dermed ble det mulig å realisere et system med håndholdte terminaler. I mange tilfeller må forbindelsen bli satt opp fra bruker til terminal via flere satellitter, og denne rutingen er veldig avansert. I tillegg til at det var 66 satellitter for dekning av jorda, hadde hver satellitt 48 antennestråler slik at omruting måtte skje med ca. 1 minutters intervall.

## Tilbake til GEO

Den andre veien å gå var å benytte geostasjonære satellitter, utstyrt med store antenner, både for sending og mottaking. Dette ledet til slike systemer som Thuraya og ACeS. Diameter for satellittantennene var over 12 meter, og disse antennene kunne sette opp et stort antall stråler, typisk 200. Dermed kunne transmisjonsbudsjettet bli oppfylt.

Begge disse systemene er konstruert slik at de er tilpasset GSM-systemet. Når brukeren er innenfor GSM-dekning, kan dette systemet brukes, og GSM er billigere å bruke. Utenfor GSM-dekning kan terminalen operere via satellitt. Systemene er konstruert slik at flest mulig av enhetene i GSM og satellittsystemet er felles.

INMARSAT har også utviklet et system, INMARSAT NEXT, som ved siden av dataoverføring ved høye hastigheter tilbyr mobiltelefoni med håndholdte terminaler. Det benytter satellittene INMARSAT4 som er utstyrt med store antenner og som kan dekke jordkloden med et stort antall smale stråler.



Thurayadekning.  
Opphavsmann: [Thuraya](#)

Thurayatelefon.  
Opphavsmann: [Thuraya](#)

# Satellittkringkasting

Forfatter: Gunnar Stette, Narom  
[Satellittkringkasting \(24040\)](#)



Et område hvor satellittsystemene har en dominerende stilling, er TV-kringkasting. En satellitt har kapasitet til distribusjon av mange TV-program til lokale sendere, fellesantenneanlegg og kabelnett. Fjernsynsprogrammene kan også mottas direkte fra satellitten ved bruk av små antenner med 40 til 100 cm antennediameter, og antallet mottakere innen dekningsområdet kan være mange titalls millioner. Systemene er nå basert på digital teknikk med avansert signalbehandling, og dette har gjort det mulig med omfattende fjernsynsdistribusjon over hele jordkloden. De digitale systemene har også gjort det mulig å tilby flere tjenester, som datakringkasting og toveis interaktiv kommunikasjon, og har gjort det mulig å gi tilgang til Internett for små terminaler uavhengig av lokal infrastruktur.

## Satellittutvikling

Satellitter ble først brukt til overføring av TV-programmer mellom kringkassingsselskaper. Det var da nødvendig å ha mottakere med store antenner (typisk diameter 10–30 m) for å kunne motta signalet. Ettersom sendeffekten for hver transponder økte, ble det mulig å bruke stadig mindre mottakerantenner, og da vokste det også fram tjenester som var beregnet på direkte mottaking av forbrukeren.

Distribusjon av TV-signaler via jordnettet var ressurskrevende, og det er vel tvilsomt at vi hadde hatt særlig mer enn en TV-kanal i Norge hvis det ikke var mulig å bruke satellitt. Da TV 2 ble bygget ut i tidsrommet 1990 til 1992 var distribusjonen basert på bruk av satellitt. Signalene fra satellitten ble tatt imot av tradisjonelle TV-sendere for videre utsendelse, og av kabelnettelskaper for distribusjon til abonentene. Samtidig var signalene fra satellittene så sterke at de kunne tas imot av en hjemmemottaker, en såkalt parabolmottaker, med antennediameter på under én meter. For mottaking fra geostasjonær satellitt er antennestyring ikke nødvendig. For å kunne motta signaler fra flere satellitter kan antennen utstyres med flere *mikrobølgehoder*, de komponentene som sitter nær brennpunktet i antennen, forsterker signalet og flytter det til en lavere mellomfrekvens før det overføres via antennekablene til tuneren knyttet til TV-apparatet.

I dag har kringkasting av TV-signaler via satellitt blitt enda mer attraktivt på grunn av overgang til digitale signaler, en overgang som ble mulig ikke minst på grunn av teknologiutvikling når det gjelder signalkompresjon. Dermed er det åpnet for massedistribusjon av et stort antall TV-programmer.

## Digitale TV-signaler

	ECS-satellitten
	Opphavsmann: <a href="#">Eutelsat</a>
	Oppskyting
	ECS11989
	Sendeeffekt 20 W
	Antall transpondere
	11
	Thor 6
	Opphavsmann: <a href="#">Telenor</a>
	Oppskyting 2009
	Sendeeffekt 80 W
	Antall transpondere
	36

Det tradisjonelle, analoge TV-signalen ble utformet for over 70 år siden, basert på den teknologi som da var tilgjengelig. Båndbredden for et analogt TV-signal er typisk 6 MHz, og overført med frekvensmodulasjon vil en satellittransponder med 30 MHz båndbredde ha en kapasitet på én TV-kanal.

En viktig forutsetning for overgang til digital TV var at videosignalene kunne omformes til digitale signaler med tilstrekkelig lav datahastighet uten merkbar reduksjon av kvaliteten. Et omfattende internasjonalt standardiseringsarbeid gjorde det mulig å redusere datahastigheten fra ca 250 Mbit/s til under 10 Mbit/s, og kompresjonsteknikken er stadig under utvikling. En satellittransponder kan typisk overføre over 50 Mbit/s, og da ville overgang til digital TV åpne for en betydelig reduksjon av kostnadene ved distribusjon av TV-signalene. Dessuten ville en overgang til digitale signaler gjøre det mulig å tilby nye tjenester.

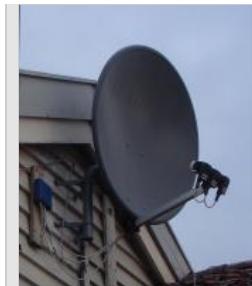
Digital teknikk gjør det mulig å sette sammen et komplett TV-signal på en mer fleksibel måte, som figuren viser. Videosignalen kan overføres til en datastrøm med en hastighet som er avhengig av programtype og kvalitetskrav.

Så er det mulig å legge til et antall lydkanaler, og datahastigheten er igjen avhengig av programtypen, om det er høykvalitets musikk eller en kommentatorkanal. Dessuten legges til data og kontrollsignaler av forskjellig slag. All informasjon sendes som datapakker. Pakkene er adresserbare og krypterbare, og de kan inneholde informasjon av alle slag, video, audio, data. Dermed kan også systemet brukes til datakringkasting og til dataoverføring til en enkelt mottaker eller til en gruppe mottakere. Et komplett TV-program kan være en datastrøm i området 2–10 Mbit/s, og da vil det være plass til flere TV-programmer i samme transponder.

Signalet fra satellitten basert på ETSI-standarden DVB-S kan tas imot av en enkelt mottaker i en "satellittuner" i et hjem og omformes til det ønskede TV-signalet. Det kan også mottas i et *kabelhode*, deles opp i vanlige analoge TV-kanaler og sendes opp på kabelen i analogt format, men det digitale signalet kan også omkodes og sendes ut på kabelen på digital form i henhold til standard DVB-C. Det kan også sendes ut fra TV-senderne på bakken, og siden desember 2009 er all TV-kringkasting i Norge på digital form i henhold til standard DVB-T. Dette øker antallet tilgjengelige kanaler i bakkenettet fra 4 til 24. Telenor, som kringkaster TV via sine Thor-satellitter, gikk over fra analoge til digitale signaler allerede den 15. oktober 2003.

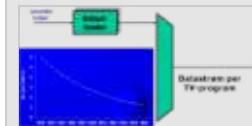
## Interaktiv TV-aksess til Internett

Systemet er også bygget ut til også å omfatte returkanaler via ISDN, GSM og mange andre overføringssystemer. Det er også mulig med returkanal direkte via satellitt, DVB-RCS, Return Channel via Satellite. Datahastigheten i retturetning er avhengig av sendeffekten, og den kan typisk være opptil 4 Mbit/s. En terminal med returkanal består av en vanlig "parabolmottaker" som også utstyres med en sendeenhet, som figuren viser. Den store fordelen med dette systemet er at det kan operere uavhengig av annen infrastruktur på bakken, og dette gjør det egnet til utbygging til utbygging i områder under utvikling, som for eksempel i



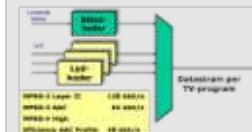
Parabolmottaker

Foto: [Gunnar Stette](#)



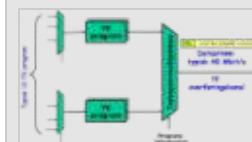
DVB videokoding

Foto: [Gunnar Stette](#)



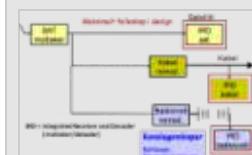
DVB audiokoding

Foto: [Gunnar Stette](#)



DVB multiplexer

Foto: [Gunnar Stette](#)



DVB distribusjon

Foto: [Gunnar Stette](#)



DVB RCS

Foto: [Gunnar Stette](#)

Amazonasprovinser i Brasil. Adgang til Internett er en viktig anvendelse av slike systemer.

# Satellittnavigasjon

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Satellittnavigasjon \(45892\)](#)



Det er ikke noe nytt at menneskene benytter legemer i verdensrommet til å orientere seg på jorda. Stjernene ble tidlig brukt til å bestemme retning. Polstjerna er nær den geografiske nordpolen, og var derfor velegnet for bestemmelse av himmelretning. Sola, eller solhøyden ved middag, ble tidlig brukt til å bestemme nord-sør-posisjon, breddegrad. Et klassisk problem innen navigasjon er bestemmelse av øst-vest posisjon, da dette er avhengig av nøyaktig klokke. Et stort problem var å konstruere nøyaktige klokker som kunne brukes om bord i skip, som kunne tåle sjøgang og temperaturforskjeller. Nå er satellittbaserte navigasjonssystemer nærmest blitt enerådende. Det er nå to globale systemer i drift, GPS og GLONASS, mens Europa bygger ut Galileo-systemet og Kina bygger ut sitt system BeiDou.

I dag bestemmer vi posisjonen på bakken ved hjelp romteknologi, flere enn 20 satellitter i over 20 000 kilometers høyde, og disse satellittene beveger seg med en hastighet på over 3 km/s. Det amerikanske GPS-systemet kan brukes for nøyaktig geodetisk posisjonsbestemmelse (cm-nøyaktighet), og det kan brukes av små og billige portable mottakere med imponerende presisjon og brukervennlighet og med en nøyaktighet i området meter. Sovjetunionen har utviklet et lignende system. Det er nå flere andre lignende systemer under utvikling. Den europeiske aktiviteten er organisert i det såkalte Galileo-prosjektet og med ESA og Europakommisjonen som pådrivere og med deltagelse av europeisk industri, også norsk.

## Prinsipper for posisjonsbestemmelse

### Retningsmåling

Utvikling av systemer for radionavigasjon begynte under den andre verdenskrig, og det var basert på retningsmåling. Da utviklet tyskerne et system, Knickebein, som ble brukt til å lede bombefly inn over de britiske øyene. Senere har vi fått andre jordbaserte systemer, som Decca, Loran og Omega, som var basert på måling av avstand til kjente referansestasjoner. Alle disse systemene er nå erstattet av rombaserte systemer, i første rekke Navstar, eller GPS(General Positioning System).

### Måling av Dopplerforskyvning

Et tidlig satellittsystem, TRANSIT, var basert på utnyttelse av Dopplerforskyvning. Når avstanden til en radiosendere forandrer seg vil frekvensen på det mottatte signalet variere avhengig av hvor raskt avstanden forandrer seg. Hvis avstanden reduseres med en bølgelengde per sekund vil mottatt frekvens øke med 1 Hz. Når avstanden til senderen øker blir frekvensen tilsvarende redusert.



En fordel med dette prinsippet er at en enkel satellitt er tilstrekkelig for å bestemme en posisjon på bakken (når vi kjenner høyden over havet, altså todimensjonalt), men det vil være en tvetydighet. Det er to punkt på jordoverflata som vil ha samme Dopplerforskyvning, og da vet vi i prinsippet ikke på hvilken side av banesporet vi befinner oss. I praksis behøver dette ikke å være noe problem. Hvis vi er i en båt og ett av punktene er på land er problemet trivielt.

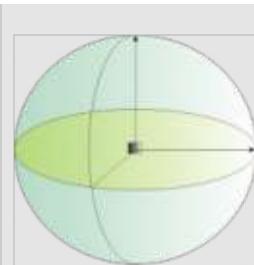
### Avstandsmåling

Et annet prinsipp er å benytte avstandsmålinger. Hvis vi kjenner nøyaktig når et signal er sendt fra en satellitt, og hvis vi kan registrere nøyaktig tidspunktet for mottaking, vil tidsforsinkelsen være gitt. Med kjent hastighet for radiobølgene vil dermed også avstanden fra satellitten være kjent. Da vil vi vite at vi er på ei kuleflate med satellitten i sentrum og med avstanden som radius.

Ei tilsvarende måling på signal fra en annen satellitt bestemmer posisjonen på en annen kule med kjent radius og med sentrum på den andre satellitten. Siden vi må befinner oss på begge kuleflatene vet vi at posisjonen vår må være på den ringen hvor de to kuleflatene skjærer hverandre. Hvis vi videre vet at vi befinner oss på jordoverflata vil posisjonen være et av skjæringspunktene mellom denne sirkelen og jordoverflata. Det vil være to slike skjæringspunkt.

For posisjonsbestemmelse i tre dimensjoner må vi foreta avstandsmåling fra tre satellitter. Stengt tatt vil måling mot tre satellitter også gi en tvetydighet, men den andre posisjonen vil mest sannsynlig befinner seg i en fullstendig usannsynlig posisjon ute i verdensrommet.

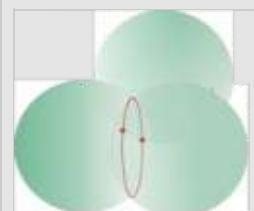
De tre målingene definerer ett punkt i rommet, forutsatt at målenøyaktigheten er perfekt. Det krever at vi har helt nøyaktig klokke. Måling mot en fjerde satellitt gir mulighet for å estimere klokkefeil, og det er denne metoden som brukes av små portable og rimelige mottakere med begrenset klokkenøyaktighet. Jo flere satellitter det måles mot desto bedre er nøyaktighet. Avstandsmåling fra flere kilder er det prinsippet som er valgt for navigasjonssystemene GPS-systemet, GLONASS og Galileo.



En satellitt  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)



To satellitter  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)



Tre satellitter  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

# Instrumenter for jordobservasjon

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Instrumenter for jordobservasjon \(49904\)](#)



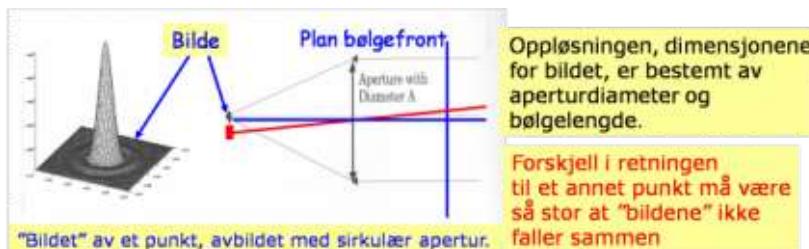
En satellitt i en bane rundt jorda er en perfekt plattform for observasjon av jordkloden. Avstanden er riktig nok stor, mer enn 250 km for at friksjonen fra atmosfæren ikke skal ha noen vesentlig innflytelse på satellitten. Til gjengjeld er oversikten god, spesielt mulighetene for å se store områder i sammenheng, uavhengig av nasjonale grenser. Dette gjør det også mulig å betrakte jordkloden som ett system, blant annet for å observere varmefordelingen over kloden som en helhet.

I denne sammenheng skal vi se på de forskjellige instrumentene som kan brukes på satellitter, med hovedvekt på muligheter og tekniske begrensninger.

## Avbildning, fundamentale begrensninger

For avbildning med elektromagnetiske bølger, lys eller radiobølger, gjelder det noen fundamentale begrensninger. Oppløsningen, evnen til å se små detaljer, er bestemt av

- bølgelengden for de elektromagnetiske bølgene,
- avstanden mellom satellitten og målet og
- størrelsen eller åpningen av den aperturen som benyttes, som kan være linsediameter for optisk avbildning og antennediameter ved klassisk radaravbildning.



Aperture

Ophavsmann: [Gunnar Stette](#)

Vinkeloppløsning med sirkulær apertur *Gunnar Stette*

For at vi skal være i stand til å skjelne mellom to punktkilder med en aperturdiameter  $A$  og bølgelengde  $\lambda$ , må vinkelavstanden mellom dem minst være

$$\text{Vinkeloppløsning} = \frac{1,22A}{\lambda \text{Rad}}$$

Vi kan da sammenligne den oppløsning vi kan få med optisk avbildning, typisk bølgelengde 0,5 um, med oppløsningen for en radar med bølgelengde 3 cm. Linsediameter for et kamera kan være 10 cm og diameter for en radarantenne 3 m. Når avstanden mellom satellitten og målet er 1000 km får vi følgende minsteavstander:

### Optisk

$$A = H \cdot \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} = 1000000 \cdot \frac{1,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{D} \cdot 10^3 = 6 \text{ meter}$$

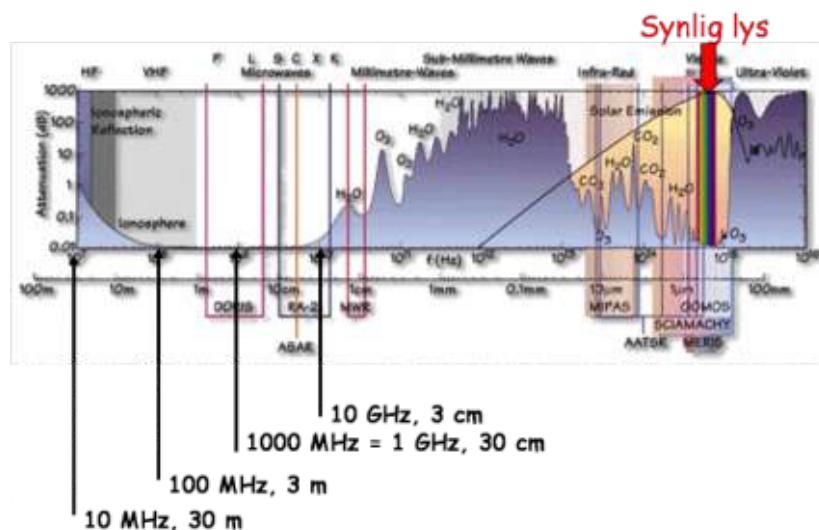
### Radar

$$A = H \cdot \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} = 1000000 \cdot \frac{1,22 \cdot 0,03}{3} \cdot 10^3 = 12200 \text{ meter}$$

Ut fra dette ser det ut til at optisk avbildning er overlegen, men optisk avbildning er begrenset til klar sikt, og lyset kan ikke trenge gjennom skyer og nedbør. Radar, derimot, kan operere under forskjellige værforhold, dag og natt, forutsatt at den kan operere ved gunstige bølgelengemråder, ved frekvenser lavere enn ca. 10 GHz.

## Vinduer i atmosfæren

Vi kan lett få det inntrykk at atmosfæren er gjennomsiktig ved alle bølgelengder, men det er ikke riktig. Vi har et "vindu" for frekvenser under ca 10 GHz, tilsvarende 3 cm bølgelengde, og så har vi et vindu rundt bølgelengden for synlig lys, ca 0,5 µm. For store frekvensområder er atmosfæren ujennomtrengelig for elektromagnetiske bølger, med signalsvekking på opptil 100 dB.



Vinduer  
Opphavsmann: [ESA](#)

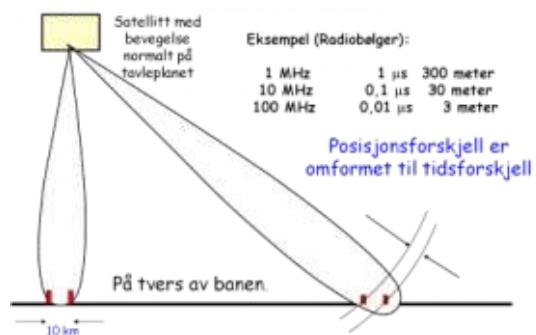
## Spektrale vinduer i atmosfæren ESA

Vi har dermed to viktige vinduer i frekvensspektret, for radiobølger som benyttes av radar, og for lys som brukes for optisk registrering.

## Syntetisk aperturradar

En radar opererer uavhengig av lysforhold og værforhold. Ulempen er den store bølgelengden i forhold til antennestørrelsen, da dette gir dårlig vinkeloppløsning, som er viktig i mange sammenhenger.

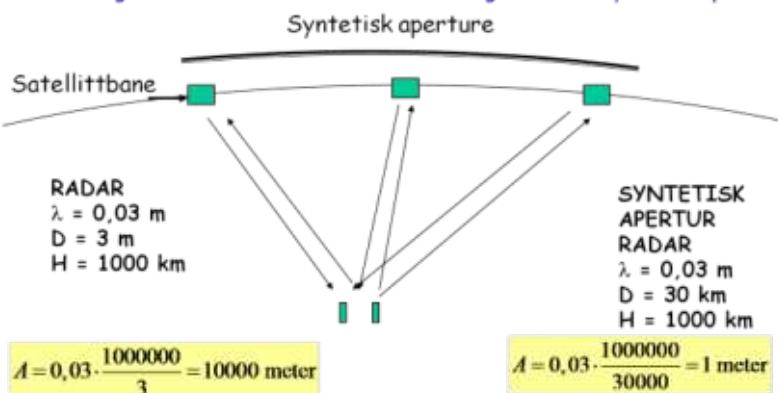
Det er mulig å forbedre oppløsningen for radar. Ved å la radaren se i sideretning kan vinkeloppløsning erstattes av oppløsning i tidsforsinkelse. Refleksene fra de to målene A og B vil være tidsforskjøvet, og hvis båndbredden er stor nok, kan disse målene skilles, som tabellen viser.



Sidesøkende radar  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

For å oppnå god oppløsning langs banen benyttes en annen metode. Refleksene fra målene registreres og settes sammen "som om satellitten var på alle stedene til samme tid". Dermed blir tilsynelatende aperturen veldig stor, men det krever meget komplisert signalbehandling.

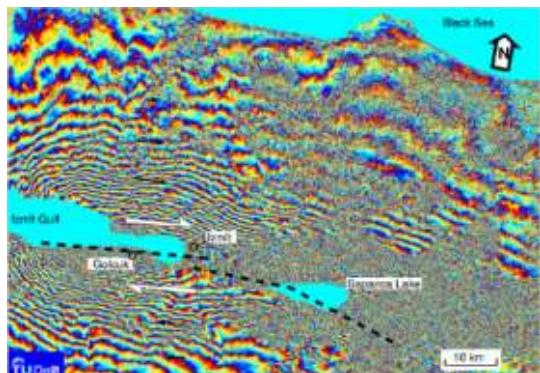
Utsendte pulser og mottatte reflekser registreres nøyaktig med amplitude, fase og posisjoner. Dermed blir radarbildet "som om satellitten er tilstede samtidig over den aktuelle banedelen". Dette gir en stor "syntetisk aperture".



Syntetisk aperture  
Opphavsmann: [Gunnar Stette](#)

Syntetisk apertur [Gunnar Stette](#)

Dagens jordobservasjonssatellitter er utstyrt med forskjellige former for syntetisk aperturradar, SAR, og de gir forbløffende gode bilder. Det er også mulig å lage stereobilder, slik at jordoverflata kan avbildes i 3-dimensjonal form.



Interferometrisk bilde av forandring etter jordskjelv  
Opphavsmann: [ESA](#)

Det er også benyttet SAR til å registrere forandringer av jordoverflata ved hjelp av interferometri. Bildet viser et slikt bilde av deler av Tyrkia, før og etter jordskjelvet i 1999, og avstanden mellom hvert "regnbuespektrum" tilsvarer en forskyvning på 2,5 cm, bestemt av en bølgelengde på 5 cm.

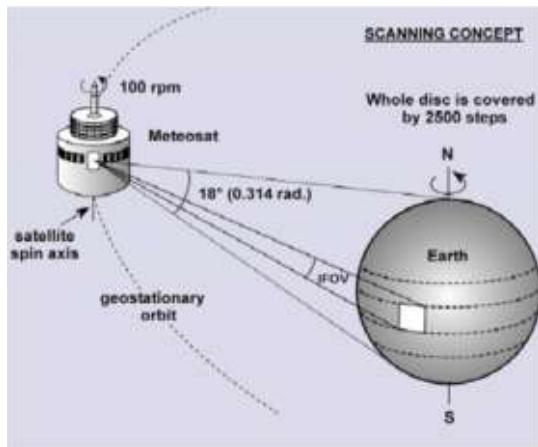
### Multispektrale scannere

Ved siden av avbildning er det aktuelt å foreta avbildning for å bestemme egenskapene for det målet som undersøkes. En registrering av spektret for signaler fra for eksempel en skog, kan gi verdiful informasjon om tilstanden for vegetasjonen. I dette tilfelle foretas en avsøkning ved forskjellige bølgelengder, og balansen mellom de forskjellige fargene gir indikasjon på helsetilstanden.

### Værsatellitter

Et av de første områdene hvor folk flest kom i kontakt med romteknologi var værmeldingene med bilder fra værsatellitter på TV. Disse satellittene tar bilder av skyformasjoner, og ved å foreta målinger ved forskjellige bølgelengder er det mulig å avlede mer detaljert informasjon om værforholdene.

De første værsatellittene var rotasjonsstabiliserte med 100 omdreininger per minutt, og for hver omdreining registrerte de intensiteten langs en billedlinje over jordkloden. Ved hver omdreining ble instrumentet flyttet litt i høyde slik at en ny linje ble registrert. Resultatet ble et bilde med 512 linjer, tatt over en periode på 1/2 time. Senere er det kommet værsatellitter som har mer avansert registreringsutstyr.



Meteosat

Opphavsmann: [ESA](#)



Meteosat satellitt

Opphavsmann: [ESA](#)

## Andre instrumenter

Ved siden av de instrumentene som er nevnt her kan jordobservasjonssatellitter være utstyrt med flere andre typer instrumenter til

- måling av temperatur, spesielt i havet
- måling av vind og bølger
- måling av havnivå for bestemmelse av havstrømmer
- måling av sammensetning av atmosfæren
- måling av utstråling av radiobølger, radiometri, blant annet for bestemmelse av iskant og snøtykkelse
- etc. etc.

# Utforskning av verdensrommet

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Utforskning av verdensrommet \(23925\)](#)



Astronomi er en av de eldste vitenskapene, og menneskene har studert stjernehimmelen til alle tider. På 1600-tallet ble teleskopet oppfunnet, og astronomi ble en moderne vitenskap. Med utvikling av romteknologi ble det i løpet av de siste tiårene skapt helt nye muligheter for å studere verdensrommet, både vårt eget solsystem og de fjerneste delene, som kan gi informasjon om hvordan det hele begynte.

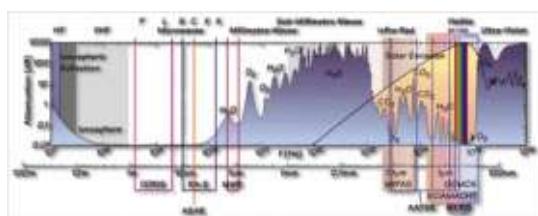
Romteknologi har gitt oss bedre muligheter til studie av verdensrommet på to måter:

- observasjon fra plattformer utenfor atmosfæren
- utsendelse av sonder for å undersøke bestemte himmellegemer som sola, planeter, måner og kometer

## Observasjon av verdensrommet

Vi kan motta radiobølger fra satellitter, og når skyene borte, kan vi nyte skarpt sollys om dagen og se stjernehimmelen om natta. Dette kan få oss til å tro at atmosfæren er transparent for hele spektret av elektromagnetiske bølger, inkludert lys. Men det er ikke tilfelle.

Det er bare to relativt smale "vinduer" som er transparente, ett ved mikrobølgefrekvenser opptil noen titall GHz, og ett i området infrarødt og synlig lys. Men selv for synlig lys kan turbulens i atmosfæren forvrenge bilder.



Vinduer i atmosfæren  
Opphavsmann: [ESA](#)

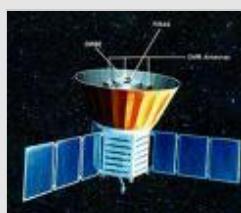
## Radioastronomi

ESA har definert følgende grunnleggende problemstillinger innen romvitenskap:

- \* Hvordan har jorda og solsystemet vårt utviklet seg?
- \* Hvor er vi i universet?
- \* Hvor beveger vi oss?
- \* Hvor oppsto liv, og er vi alene?



Pico de Veleta  
Opphavsmann: [ESA](#)



COBE  
Opphavsmann: [NASA](#)

Ved å rette store antenner mot verdensrommet er det mulig å kartlegge strålingskilder. Disse kan noe ganger identifiseres med synlige objekter, radiostjerner, men noen ganger kommer strålingen fra områder uten synlige stjerner. Innen radioastronomi er signalnivåene lave, og da er det viktig å holde støyen nivået i stasjonen lavt. Atmosfæren vil alltid ha en viss absorpsjon av radiobølger, og det resulterer uunngåelig i en støyøkning. Atmosfæren påvirker de høye frekvensene, korte bølgelengder, mest. Derfor er det viktig å komme høyt opp, hvor luftlaget er tynt. På fjellet Pico de Veleta i Sierra Nevada, Spania, i en høyde på 2900 meter er det et radioobservatorium med 30 meter antennediameter, og det har mottakere for frekvenser opptil 230 GHz, 1,3 mm bølgelengde.

I 1989 til 1991 ble det utført måling av bakgrunnsstråling i mikro-bølggeområdet fra en satellitt, Cosmic Background Explorer (COBE), eller Explorer 661. Resultatet av målingene førte til at to personer, John Mather og George Smoot, fikk Nobelprisen i fysikk i 2006.

### Infrarødt

Atmosfæren sperrer for infrarødt for bølgelengder større en ca.  $2\mu\text{m}$ , og for å studere verdensrommet for slike bølgelengder må det benyttes raketter, ballonger eller satellitter. Både amerikanske og europeiske satellitter ble brukt til å studere infrarød stråling i verdensrommet. ESAs satellitt var Infrared Space Observatory (ISO) som i perioden 1995 til 1998 foretok målinger med god vinkeloppløsning og med muligheter for spektralanalyse av signalene. Senere sendte NASA opp en enda mer avansert satellitt, Spitzer Telescope.

NASA sendte i 2009 opp WISE-teleskopet som skal avbilde hele himmelen i det infrarøde området, skarpere og med større detalj enn tidligere forsøk, og observasjonene begynte 14. januar 2002.

### Ultrafiolett

Atmosfæren er helt u gjennomtrengelig for bølgelengder kortere enn 310 nm. Astronomene hadde lenge ventet at observasjoner ved slike bølgelengder ville være interessante, men de måtte vente på satellitter for å kunne gjennomføre dem. De første detektorene for ultrafiolett lys ble sendt opp allerede i 1960-årene, men det var Hubble-teleskopet i 1990 som ga det store gjennombruddet. Dette teleskopet observerte både ultrafiolett og synlig lys. Det er senere skutt opp satellitter som bare observerte i det ultrafiolette området, Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE), som var i drift fra 1992 til 2001.

### Røntgenastronomi



ISO-satellitten  
Opphavsmann: [ESA](#)



Hubble-teleskopet  
Opphavsmann: [NASA](#)



EUV-E-satellitt  
Opphavsmann: [NASA](#)



XMM-Newton  
Opphavsmann: [NASA](#)



Rosetta  
Opphavsmann: [ESA](#)



Rosetta og P67/Churyumov-Gerasimenko  
Opphavsmann: [ESA](#)

Den første satellitten med røntgendetektorer var Small Astronomy Satellite (SAS 1), Uhuru, som ble skutt opp i 1970. Senere er et stort antall satellitter med utstyr for måling av røntgenstråling blitt skutt opp. Den europeiske X-ray Multimirror Observatory, XMM-Newton, fra år 2000 var utstyrt med tre avanserte teleskop. Det blir blant annet brukt til å observere de fjerneste delene av universet.

### Gammastråleastronomi

Gammastråler har mer energi enn Røntgen-stråler, men også de blir blokkert av atmosfæren. Kilder for slik stråling ble oppdaget så tidlig som 1972 av satellitten Small Astronomy Satellite, AS1.

### Sonder i verdensrommet

Romteknologien har åpnet for å sende avanserte romfartøyer til fjerne himmellegemer i solsystemet vårt. Disse kan ta prøver som kan gjøres tilgjengelig for grundige analyser, inkludert studier for å oppdage materialer som kan gi indikasjon på liv. Måneferden er et eksempel på dette. Fra Apollo-ferdene er det totalt hentet ned 2415 prøver på til sammen 382 kg materiale fra månen.

### Rosetta-prosjektet

Det er et stort antall sonder som er skutt ut for å studere forskjellige himmellegemer. Vi skal nøyne oss med å se på ett av disse programmene, Rosetta fra ESA, som er det første prosjektet med landing på en komet.

Formålet var å møte kometen P67, Churyumov/Gerasimenko. Her skal den gå i bane rundt kometen og så sette ned på kometoverflaten en lander som skal kunne ta prøver, analysere prøvene, sende resultatet tilbake til "moderskipet" som så skal sende informasjonen tilbake til jorda.

Selve satellitten er 2,8 x 2,1 x 2,0 meter og har et solcellepanel med et areal på 64 m<sup>2</sup>, og den skal kunne operere 800 millioner km fra sola, hvor intensiteten bare er 4 % av den ved jorda. Massen ved oppskyting er på 3000 kg. Av dette var 1670 kg drivstoff og 165 kg vitenskapelige instrumenter. Den hadde også med seg en lander på 100kg. Rosetta ble skutt opp den 2. mars 2004 og det beregnes at den skal sette landeren på kometen i november 2014, etter en flukt på over 10 år. Satellitten er utstyrt med stjernekart og et eget navigasjonssystem.

Underveis skal satellitten innom banene til noen av planetene for å få større fart i en slags svingstangmanøver. Den siste passeringen av jordkloden var 13. november 2009 da den kl 0845 CET passerte over Java i en høyde på 2481 km, og med en hastighet på 13,34 km/s. Denne manøveren ga en hastighetsøkning på 3,6 km/s. Den skal passere asteroiden Lutetia i juli 2010 og møte Churyumov/Gerasimenko i 2014. I 2011 kommer den til det fjerneste, og kaldeste, området på turen, og da går den i dvale til den vekkes våren 2014. Etter møtet med P67 skal den følge kometen i en solbane til den når perihelion i desember 2015.

# Vektløshet (micro gravity)

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Vektløshet \(micro gravity\) \(23923\)](#)



Tyngdekrafter virker inn på alle prosessene på jorda. Den benytter vi for å holde oss oppreist, den styrer hvilken vei planter skal vokse, og den sørger for mange andre biologiske, kjemiske og fysiske prosesser. Faktisk er den så sterkt involvert i så mange prosesser at vi ikke kan forestille oss hvordan prosessene hadde vært uten den. Tyngdekraften sørger blant annet for at vi kan brenne et stearinlys. Den sørger for at de varme forbrenningsgassene trekker bort fra prosessen slik at nytt oksygen kan komme til.

## Vektløshet på jorda

Tyngdekraften er ikke lett å kontrollere på jorda. Vi kan øke den ved hjelp av sentrifuger, men vi kan ikke redusere den annet enn i kortere tidsrom.

Når en gjenstand slippes fra et tårn, vil den være "vektløs" under fallet. Vi ser da bort fra virkningen av luftfriksjon. Varigheten er bestemt av tårnhøyden. NASA har et tårn med en fallhøyde på 132 meter som gir en vektløshetsstilstand i 5,2 s. Fallet foregår i en sylinder med tilnærmet vakuum,  $10^{-2}$  torr, og tårnet kan brukes for gjenstander med opptil 450 kg masse.

Lengst vektløs tid kan vi oppnå ved det vi kaller parabelflyging, det vil si at et jetfly flyr i en tilnærmet prosjektilbane. Et typisk forløp er at flyet i løpet av 20 s stiger fra 6000 til 7500 meters høyde. Akselerasjonen er da 1,8 g. Deretter flys det i en parabelbane hvor tyngdekraften er tilnærmet null i 22 s.

## Vektløshet i rommet

ESA, the European Space Agency, har uttalt følgende om vektløshetsforskning:

*"Resultater oppnådd ved eksperimenter i rommet innen biovitenskapene det siste tiåret, har hatt en bemerkelsesverdig innflytelse på oppfatningene av hvilken rolle tyngdekraften spiller i alle forhold ved liv, fra organiseringen i en enkel celle, til tyngdekraftpåvirket respons i høyere organismer, inkludert mennesket. Eksperimenter i rommet har avkreftet et betydelig antall aksepterte teorier omkring mekanismene for dynamiske forhold i visse dyre- og plantesystemer. De har også gitt ny forståelse og stilt nye spørsmål."*

Viktige eksperiment i rommet kunne omfatte:

- virkning på muskelstruktur og -funksjon
- forhold i hjerte-kar-systemet, regulering av blodtrykk og volum
- væskebalanse og nyrefunksjoner
- pustefunksjoner
- hormoner og metabolisme

Hvorfor er rommet viktig for disse eksperimentene? Den som vil eksperimentere med lys og optikk, trenger et mørkt rom. Den som arbeider med lyd, trenger et lydisolert, stille rom. Den som eksperimenterer med virkningen av tyngdekraften, trenger vektløshet, og hvis den skal vare i mer enn noen minutter, må eksperimentene skje i rommet.



Parabelflukt  
Opphavsmann: [NASA](#)



Vektløshet under  
parabelflyvning  
Opphavsmann: [NASA](#)

## Spin-offeffekter

Forfatter: Gunnar Stette, Narom

[Spin-off-effekter av romteknologisk forskning og utvikling \(23816\)](#)



Romvirksomhet krever utvikling av avanserte systemer og teknologier, og slik virksomhet gir nytteverdier på flere måter. Vi kan skjelne mellom den direkte nytteverdien vi har av de rombaserte systemene, for eksempel for telekommunikasjon og navigasjon, og nytteverdien av teknologi og metoder utviklet til bruk i romsystemene, men som har stor nytteverdi for helt andre formål.

### Internasjonalt samarbeid

Romvirksomhet krever store ressurser, og bare supermarktene, som Sovjetunionen og USA, var i stand til, på egen hånd, å utvikle komplette systemer, noe som ga industriene i disse landene enorme fordeler når det gjaldt utvikling av teknologi. Mindre land måtte slå seg sammen for å kunne skape tilstrekkelig store prosjekter. Europeiske land dannet den europeiske romorganisasjonen, ESA (the European Space Agency), og Norge ble fullt medlem i 1987 etter en omfattende utredning av nytteverdien av slikt medlemskap.

ESAs programmer gir norsk industri oppdrag der bedriftene kan utvikle spissTeknologi. Norge bidrar med bevilgninger til ESA, men på grunn av regelen om garantert industriretur får norsk industri utviklingsoppdrag i ESA krone for krone (fratrukket administrasjonskostnader) for Norges deltagelse i ESA-programmene.

Det er Norsk Romsenter som foretar en kontinuerlig evaluering av det norske ESA-bidraget og de bedriftene som mottar ESA-kontrakter. Disse undersøkelsene viser blant annet at hver krone Norge bidrar med i ESA, utløser ytterligere industrikontrakter på flere kroner på det kommersielle markedet. I 2004 var industrireturnen kr 4,32. Flere av de mest tradisjonsrike industrimiljøene, som i Kongsberg og Horten, får mulighet til å videreutvikle seg gjennom ESA-kontraktene.

ESAs teknologioverføringsprogram har overført over 200 teknologier til anvendelse utenfor romsektoren. Ett eksempel er dresser med kjøling til bruk for racerkjørere, et annet er radar for deteksjon av miner i bakken. Det er også flere oppfinnelser innenfor helsesektoren. Programmet kan også støtte nytablering av firmaer som skal utnytte de teknologiene som er utviklet for romsektoren.

### Teknologisk utvikling

Teknologi som opprinnelig har blitt utviklet for romfartsformål, har i mange tilfeller fått anvendelse for helt andre samfunnsnyttige formål:

- Utviklingen av romteleskopet Hubble har gitt leger nye og mer effektive metoder for diagnostisering av brystkreft.
- Avanserte bildebehandlingsteknikker utviklet for satellittfoto har blitt brukt til å analysere ultralydbilder innen medisin.
- Romteknologi har gitt oss materialer med nye og bedre egenskaper, fra isolering som tåler høye temperaturer, til riperbestandige brilleglass.

Norske bedrifter bruker sine erfaringer fra rommet innen flere områder, fra medisinsk avbildning til logistikksystemer i offshorevirksomheten. Slik skaper spissteknologi som utvikles i romvirksomheten, positive ringvirkninger på andre samfunnsområder. NASA har registrert over 6300 patenter, og de publiserer hvert år en oversikt over viktige teknologiutvikling innen romvirksomhet som har fått anvendelse på andre områder. Det dreier seg om alt fra et system for registrering av biomateriale på Mars, og som kan brukes til å overvåke vannkvalitet, til flåter som ikke velter, for landing av Apollo-mannskap, som er senere produsert i tusener, og som har reddet 450 menneskeliv.

#### Distriktsinteresser

Norge har en geografisk fordel når det gjelder nedlesing av satellitdata fra satellitter i polbaner, og det er etablert satellittstasjoner i Longyearbyen og i Tromsø.

Beliggenheten er også gunstig for oppskyting av rakter og ballonger som studerer nordlyset, og det er etablert raketttskytefelt både på Andøya og i Ny-Ålesund. Romvirksomheten bidrar dermed til attraktive, høyteknologiske arbeidsplasser i distriktene. Deltakelse i navigasjonsprogrammene Galileo og EGNOS førte til at det ble bygget to referansestasjoner, en på Jan Mayen og en på Svalbard.

# Telemetri

## Telemetrifaget

Forfatter: Narom

[Telemetrifaget \(67555\)](#)



Begrepet telemetri stammer fra gresk. Første del - tele - betyr fjern. Andre del - meter - betyr måling. Altså fjernmåling. Telemetri har å gjøre med målinger på et fjernt eller utilgjengelig sted. I videste forstand omfatter begrepet telemetri overføring av måleverdier.

Telemetri benyttes i mange sammenhenger der det trenges å gjøre målinger på avstand. Vi finner telemetrisystemer både i motorsport, militær testing av nye fly og missiler, industri og meteorologi. I denne læringsressursen vil det fokuseres på telemetrisystemer som brukes i romsegmentet, det vil si raketter, ballonger og satellitter, med et særlig fokus på telemetri mot forskningsraketter (sonderaketter).

# Andøya Rakettskytefelt og NAROM

Forfatter: Narom

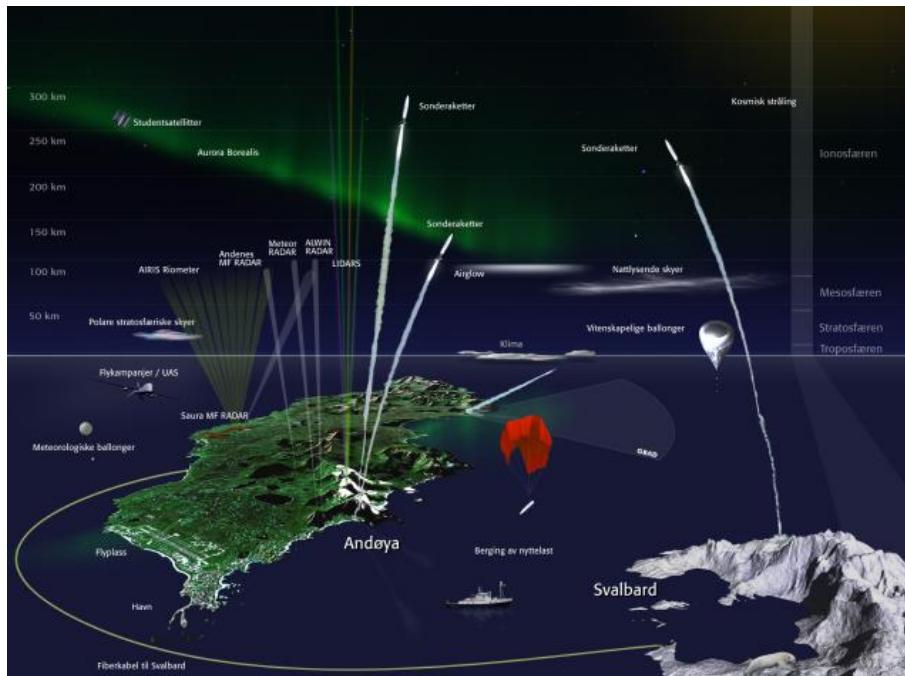
[Andøya Space Center og NAROM \(67542\)](#)

I og med at undervisningen i telemetrifaget gjennomføres ved Andøya Space Center (ASC) er det naturlig at eksempler, oppgaver og laboratorieøvelser er tilknyttet infrastrukturen og virksomheten ved ASC.

Allerede i 1962 ble den første raketten, Ferdinand 1 skutt opp fra Andøya. Operasjonen ble gjennomført i samarbeid med NASA og telemetristasjonen bestod av en trailer innleid fra NASA. Raketten var 378 cm lang og nådde en høyde på 101,5 km. Siden starten i 1962 har ACS skutt opp over tusen rakter. Før 2014 het Andøya Space Center for Andøya Rakettskytefelt. Navneskiftet kom fordi virksomheten går langt utover det å skyte opp rakter. I dag fungerer ASC som et senter for norsk romforskning. ASC tilbyr gjennomføring av rakett- og ballongoperasjoner fra både Andøya og Svalbard, drifter en rekke bakkebaserte instrumenter, eier og driver ALOMAR LIDAR-observatoriet og er med i utviklingen av førerløse fly (RPA).

ASC konsern har to datterselskaper

- NAROM Nasjonalt senter for romrelatert undervisning
- ATC Andøya Test Center (Militær missiltesting)



Illustasjonen viser en oversikt over forskningsverktøy

Kunstner: [Trond Abrahamsen](#)

Opphavsmann: [Andøya Space Center](#)

NAROM ble etablert i år 2000 og har som målsetting å øke rekrutteringen til realfag og teknologirettede studier, og dermed også bidra til å skape kvalifisert arbeidskraft til norsk romnæring. Norsk romvirksomhet hadde i 2009 en samlet omsetning av norskproduserte varer og tjenester på ca 5,6 milliarder kroner. NAROM når hvert år ca 2000 elever, studenter og lærere gjennom sine feltkurs og andre undervisningsaktiviteter. NAROM deler lokaler med ASC og bruker rakettskytefeltets infrastruktur aktivt i undervisningssammenheng.



## Raketter ved ARS

Forfatter: Narom

[Raketter ved ASC \(67565\)](#)

Oppskyting av forskningsraketter har vært kjernevirkosheten til Andøya Space Center fra starten i 1962.

ASC har enorme nedslagsområder for raketter i form av havområder utenfor Andøya og Svalbard. Dette innebærer at rakettene kan skytes uten styring og kan derfor ta med mer nyttelast for en lavere kostnad. Disse rakettene har ett til flere motortrinn, som frigjøres fra raketten ved brennslutt.

Den største rakettypen som skytes fra Andøya kalles Black Brant XII, og er en firetrinns raket med kapasitet til å nå en høyde på ca 1500 km (ca fire ganger så høyt som den internasjonale romstasjonen). Disse rakettene veier over 5 tonn og er over 20 meter lange. I desember 2007 ble 2 slike raketter skutt opp fra Andøya med bare 90 sekunders mellomrom. Rakettene nådde sine maksimale høyder på henholdsvis 600 km og 1200 km over Svalbard samtidig.



## Raketter ved ASC / fagstoff

<http://ndla.no/nb/node/67565>

NAROM gjennomfører hvert år 6-7 studentrakettoperasjoner der elever eller studenter bygger instrumenter til en ca 2-3 meter lang sonderakett som når over 9 km opp i atmosfæren. Byggingen av instrumentene til en slik raket utgjør en stor del av telemetriundervisningen.



Bygging av studentraket

## Ballonger ved ARS

Forfatter: Narom

[Ballonger ved ASC \(67584\)](#)



Ballonger er den andre viktige bæreplattformen for vitenskapelige instrumenter som sendes opp av Andøya Space Center. Den første vitenskapelige ballongen sluppet fra Andøya gikk til værs i september 1962, en uke før den første raketten ble skutt opp fra samme sted.

ASC slipper også en rekke meteorologiske ballonger fra Andøya hvert år. Disse ballongene måler temperatur og fuktighet i tillegg til posisjonsmåling ved hjelp av GPS. Ballongdata brukes først og fremst for å få en nøyaktig vindprofil opp til ca. 25 kilometers høyde i forbindelse med raketttoppskytninger. Operasjonsledelsen trenger disse vindmålingene for å avgjøre om det er trygt å skyte raketten og som inndata til systemet som regner ut rakettbanen på forhånd. En slik meteorologisk ballong er fylt med helium og er omrent en meter i diameter ved slipp. NAROM bruker også slike ballonger i forbindelse med kurs for å undervise om den nedre atmosfæren.



Fra Longyearbyen på Svalbard slipper ASC større vitenskapelige ballonger. Disse kan flyte i en høyde på 30 til 40 kilometer i over en måned sammenhengende. Vindene i stratosfæren vil gjøre at ballongen kan kretse rundt nordpolen. De største av disse ballongene er gigantiske og får et volum på opp mot en million kubikkmeter, noe som tilsvarer en diameter på nærmere 200 meter. Slike ballonger kan løfte nyttelaster på over 2,5 tonn.

Ballong i sirkumpolar bane

Kunstner: [Trond Abrahamsen](#)

Opphavsmann: [Andøya Space Center](#).

## Måling av atmosfæriske parametre med ballong

Forfatter: Narom, Stian Vik Mathisen

[Måling av atmosfæriske parametre med ballong \(73658\)](#)

Dette er en praktisk oppgave hvor elevene har sluppet en ballong med en meterologisk nyttelast. Deretter kan elevene analysere og bearbeide de meterologiske dataene vi får fra ballongen.

Vedlagt ligger det datasett fra ett tidligere ballongslipp, hvordan det datasettet er bygget opp, hvordan du skal få grafer i gnuplot (gratis å bruke) og til slutt en laboppgave.

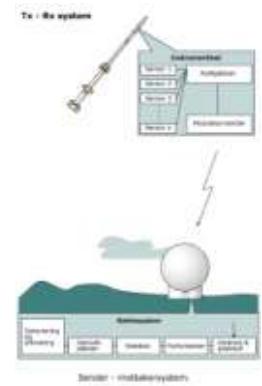
## Sender- og mottakersystemer

Forfatter: Narom

[Sender- og mottakersystemer \(67597\)](#)

Hovedelementet i et telemetrisystem er sender/mottakerlinken. Linken kan være en direkte forbindelse som koaksialkabel, optisk fiber, telefonlinje, eller en radioforbindelse.

For forskningsraketter kaller vi den delen av raketten som ikke har med raketts fremdrift å gjøre for nyttelasten. Nyttelasten er som regel plassert lengst frem raketten, og er ofte det eneste som er igjen av raketten etter at motorene er utbrent og frigjort. For vitenskapelige ballonger vil nyttelasten være instrumentpakken ballongen har med seg. Elektronikken og antennesystemene i nyttelasten blir omtalt som sendersiden i telemetrisystemet.



Sender- og mottakersystem  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Senderside

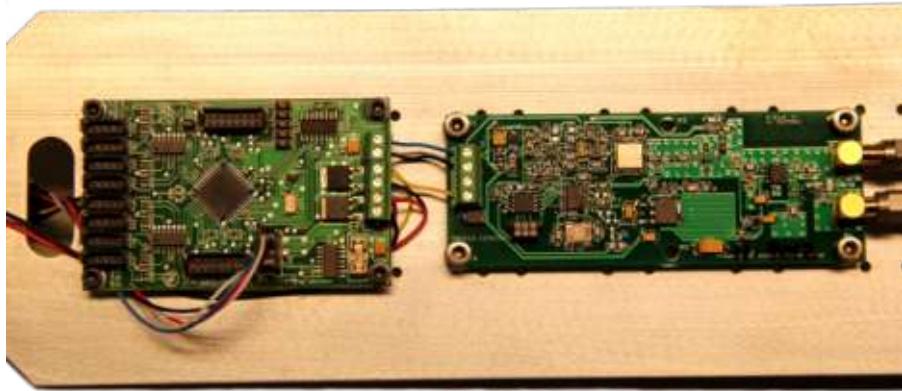
Forfatter: Narom

[Senderside \(67601\)](#)

Sendersystemet kan deles inn i en eksperimentside og en house keeping/telemetriside. Eksperimentsiden inneholder alle sensorene og måleinstrumentene. Alle støttesystemer til eksperimentene som strømforsyning, databehandlingsenhet og nettverkssystem går under betegnelsen house keeping. Telemetridelen sørger for koding og modulering av målingene.

I dag blir målingene filtrert og digitalisert etter punktprøving (sampling). Ved å omdanne data til digital form kan store mengder informasjon overføres raskt og med stor nøyaktighet. Digital overføring gir også stor fleksibilitet med tanke på å tilfredsstille forskjellige instrumenters ulike krav til samplingsfrekvens og oppløsning.

I de fleste tilfeller må overføringen til mottaker gjøres over en radiolink. Data vil bli overført ved å modulere en høyfrekvent bærebølge. Den sinusformede bærebølgen blir påvirket i amplitude (AM), frekvens (FM) eller fase (PM); den blir modulert. Signalet blir så forsterket opp til tilstrekkelig effekt for å nå mottaker med et akseptabelt signal/støy forhold. For satellitter og rakter er det viktig å gjøre beregninger av dette på forhånd, slik at en lager en sender som er kraftig nok uten at den bruker for mye strøm. En slik beregning kalles linkanalyse og er en



sentral del av faget.

Sender og enkoder

Fotograf: [Stian Vik Mathisen](#)

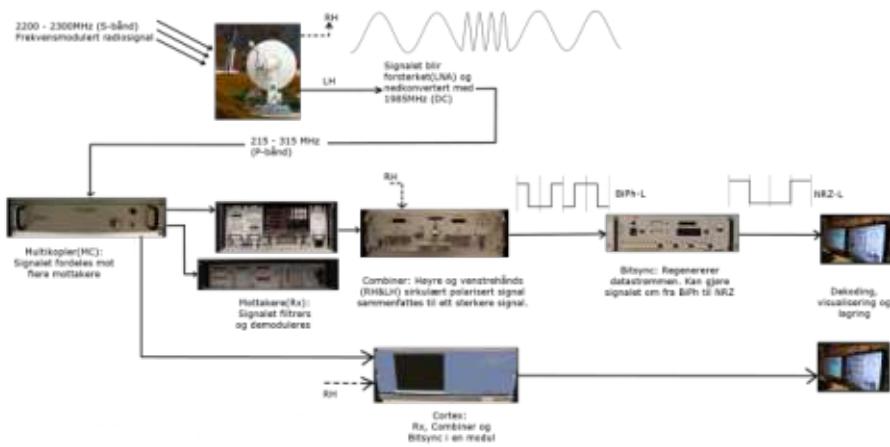
## Mottakerside

Forfatter: Narom

[Mottakerside \(67602\)](#)

På mottakersiden blir dataen behandlet og dekodet slik at forskeren eller eksperimenteieren kan få presentert de målingene som ble gjort i nyttelasten. Sendereffekten i satellitter, forskningsraketter og ballonger er vanligvis lav, og det er ofte umulig å bruke retningsvirkende senderantener. Derfor er mottakersystemet på bakken avhengig av antenner med høy forsterkning. Høy forsterkning vil innebære smal åpningsvinkel og behov for system for automatisk følging. Støy produsert i systemet er en uønsket og begrensende faktor. Derfor brukes alltid lavstøyforsterkere (LNA) plassert nært mottakerantennen. For raketter og satellitter brukes som regel sirkulært polariserte radiobølger. Med sirkulært polarisert sender og mottakerside vil en motta samme signalstyrke uavhengig av raketten eller satellittens orientering i forhold til mottakerantenna. Ved ASC har alle antennesystemer polarisasjonsdiversitet, noe som innebærer at mottakersystemet tar i mot både venstredreid og høyredreid sirkulær polarisering.

Selv radiomottakeren tar inn det forsterkede signalet fra mottakerantennen og demodulerer signalet. Det vil si at en ut i fra mottakeren får en noe forvrengt versjon av hvordan signalet var i nyttelasten før modelleringen. En bitsynkronisator brukes derfor for å reproduksjon av signalet slik at det blir lesbart av en sanntidsdatamaskin. Til slutt blir signalet dekodet av datamaskinen slik at de ulike sensormålingene kan gjengis som tall eller grafer.



Mottak av data

Ophavsmann: [Narom](#)

Datalagring er en viktig del av telemetrisystemet. Data blir ofte lagret på ulike steder i signalbehandlingsprosessen og på ulike lagringsmedia. Lagring på magnetbånd er fortsatt utbredt, men trenden er at man går over til digitale lagringsmedia som magnetplate (harddisk) og halvlederminne. Dette er først og fremst på grunn av økende krav til båndbredde, altså stigende bitfrekvens på telemetrilinken fra forskerraketter.

## Sikkerhet ved rakettoperasjoner

Forfatter: Narom

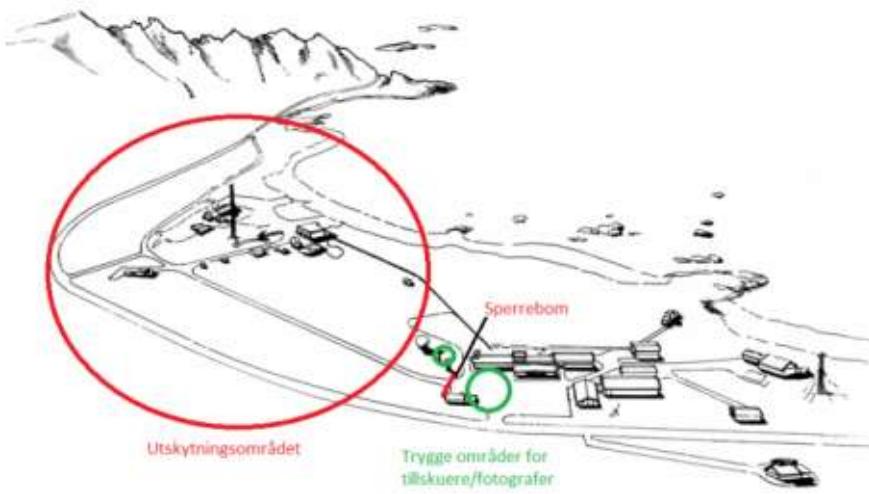
[Sikkerhet ved rakettoperasjoner \(67604\)](#)

I telemetriundervisningen vil alle elevene få oppleve å ta del i en rakettoperasjon der det skal skytes opp en sonderakett. For at dette skal kunne gjøres på en sikker måte må alle elevene gjøre seg kjent med og følge prosedyrene og forskriftene hos ASC.

Arbeid med rakter innehører arbeider med eksplosiver. Likedan medfører enhver oppskyting av rakter risikoer som man må ha kontroll med og et bevisst forhold til. Arbeid med rakter og eksplosiver er underlagt Lov om eksplasive varer samt andre lover og forskrifter som regulerer hvordan slikt arbeid skal foregå. Blant annet kreves det at man har utarbeidet spesielle sikkerhetsforskrifter og prosedyrer. Strenge sikkerhetsbestemmelser og prosedyrer er derfor en absolutt nødvendighet for å eliminere/minimalisere risikoer som kan utøve skader på personell og materiell. Andøya Space Center er et aktivt romsenter med mange rakettoperasjoner hvert år. Det er derfor av avgjørende betydning at studenter og elever som oppholder seg på romsenteret kjenner til de viktigste sikkerhetsbestemmelsene.

I ASCs sikkerhetsbestemmelser tas det hensyn til det faktum at det er umulig å utelukke menneskelig feil. Derfor er alle systemer, prosedyrer o.l. utarbeidet med krav til at en enkelt hendelse ikke skal være nok til å skape en farlig situasjon. For at en ulykke skal kunne skje må minst to uavhengige og usannsynlige hendelser inntrefte samtidig. For eksempel forutsettes det at raketten kan komme til tenne når nyttelastens sender slås av eller på. Romsenteret har derfor prosedyrer og rutiner som krever at alt personell i utskytingsområdet skal oppholde seg i blokkhus når man foretar elektriske endringer i rakettens nyttelast.

I utskytningsområdet er det kun adgang for kvalifisert personell fra ASC. Andre som skal inn i området må be om tillatelse til dette fra operasjonsledelsen. I enkelte perioder under nedtelling vil et oransje blinklys stå på ved bommen ned mot utskytningsområdet. Når dette blinkende lyset er tent indikerer dette at det foregår farlige arbeider i området eller at man holder på med testing av rakett eller nyttelast på utskytningsrampe. Når dette blinkende lyset er tent er det derfor forbudt å bevege seg inn i området.



Sikkerhetssone ved ASC

Opphavsmann: [Narom](#)

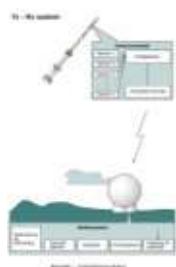
12 minutter før oppskyting vil veien forbi romsenteret stenges for all trafikk. Samtidig vil et rødt roterende lys ved utkjøringen fra skytefeltets parkeringsplass indikere at det ikke er tillatt å starte motorkjøretøy eller forlate området.

For hver raketttype som skal skytes må skytefeltet utarbeide en sikkerhetsvurdering som viser at oppskytingen kan forgå innefor spesifiserte sikkerhetskrav. En slik sikkerhetsvurdering innbærer blant annet baneberegringer, banesimuleringer og beregninger av fareområder knyttet til oppskytingen. Alle slike sikkerhetsvurderinger skal godkjennes av norske myndigheter før oppskyting finner sted.

## Senderside

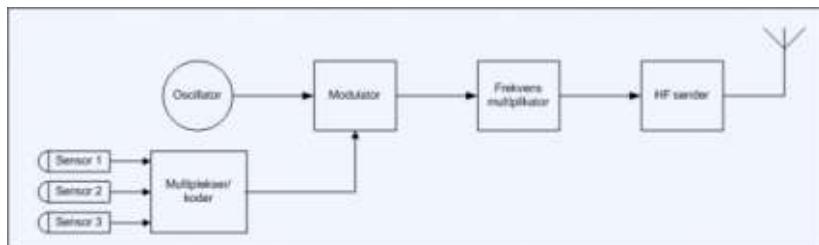
Forfatter: Narom

[Senderside \(55929\)](#)



Sendesystemets oppgave i et telemetrisystem er å gjøre målinger av fysiske parametere, behandle disse og til slutt overføre dem over til et mottakersystem gjennom et overføringsmedium. Overføringsmediet kan være en fast forbindelse gjennom koaksialkabel, optisk fiber eller telefonlinje, men i denne ressursen blir det fokusert på bruk av radioforbindelse.

Sonderaketter inneholder sensorer som omformer fysisk målbare størrelser som for eksempel temperatur, trykk og akselerasjon til elektriske signaler. I tillegg inneholder sonderaketter ofte instrumenter som partikkeltellere, termokors og fotontellere for å samle inn vitenskapelige data om forhold i rommet. For å kunne overføre data fra mange sensorer gjennom et enkelt overføringsmedium, og samtidig ha orden på data, må sendersystemet foreta multipleksing og koding av signalene. Til slutt moduleres signalene og forsterkes i en telemetrisender.



Sendersystem

Opphavsmann: [Narom](#)

Læreplanen sier at du skal kunne

- beskrive oppbygningen av sendere og mottakere for generell telemetri
- gjøre rede for informasjonsbegrepet og Shannons teori
- bruke sensorer i telemetrisammenheng
- kople opp og sette i drift sendere og mottakere for et telemetrisystem

Disse målene skal nås gjennom det teoretiske innholdet i artiklene tilknyttet sendersystem, gjennom labøvelsene samt det praktiske arbeidet med studentrakettsprosjektet.

# Sensorer

Forfatter: Narom  
[Sensorer \(55989\)](#)

En sensor er en innretning som omformer en fysisk verdi til et signal som kan tolkes av en observatør eller et måleinstrument. En sonderaket har ofte et vidt spekter av sensorer og instrumenter med ulike utsignaler. De enkleste sensorene hører til det som kalles house keeping, det vil si sensorer som måler på rakettens helsetilstand. Dette kan for eksempel være temperaturer på utvalgte deler av raketten. De mest avanserte sensorene er instrumenter for å gjøre vitenskapelige målinger på partikler og elektromagnetiske felter i rommet.

## Analoge sensorer

Et enkelt eksempel på en sensor er en barometrisk trykkmåler. Endringer i lufttrykk skaper mekanisk bevegelse i en belg med et referansetrykk. Den mekaniske bevegelsen fører til endring av verdien til en motstand. Endringen i motstand kan så omdannes til spenning ved hjelp av en enkel krets. Se figuren under. Høyreklikk på figuren for å repetere animasjonen.



### Trykksensor / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/55969>

Dette er eksempel på en analog sensor som gir ut en sammenhengende spenning. De analoge spenninger, som representerer en fysisk variabel, kan enten styre en spenning-til-frekvens-omformer, VCO som ved [FDM](#), (Frekvens-Delt-Multipleks) eller sendes til en A/D-omformer (Analog-til-Digital omformer), for så å tidsdeles. I dag er tidsdeling den vanligste formen og det er den vi kommer til å fokusere på videre i boken.

I de fleste tilfeller er spenningen direkte fra sensorelementet for lav i forhold til hva en ønsker å ha inn til analog til digitalomformer. I andre tilfeller gir selve sensoren ut en strøm, som først må omformes til en spenning for å kunne digitaliseres. Til dette brukes operasjonsforsterkere i ulike oppkoblinger. Eksempler på slike oppkoblinger er inverterende, ikkeinverterende, differansforsterker og instrumentforsterker.

Eksempler på noen slike koblinger er vist i figuren under.



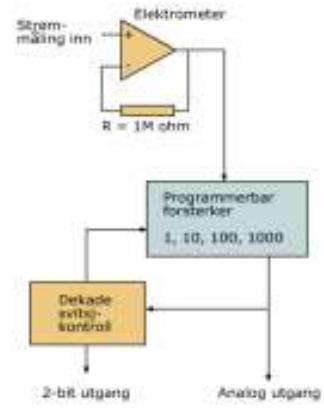
### Signalbehandling etter sensor / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/48251>

Sensorer og instrumenter kan ha to forskjellige utganger, analog utgang, digital utgang, eller begge deler. Målestørrelsen, som for eksempel temperatur, kan spenne over en eller to dekader. Målinger med elektrometer av elektron- eller ionestøm kan ofte kreve måleområder som strekker seg over 4 til 8 dekader. I slike tilfeller inneholder sensorelektronikken signalbehandling, slik som lineær-til-logaritmisk omforming eller automatisk dekadeomkobling. Utgangen må da inneholde to utganger: En digital dekadestatus og en analog mantisseverdi. Et eksempel på dette er vist i figuren.

Analoge sensor som mäter fysiske parametere genererer normalt meget små strømmer. Strømmen eller ladningene blir samlet opp til en spenning som vil være proporsjonal med målestørrelsen.

Figuren (klikk for å forstørre) viser et system som kan utføre en strømmåling over 4 dekader. For eksempel fra  $1 \times 10^{-9}$  Ampere til  $1 \times 10^{-6}$  Ampere. Strømområdet settes ved valg av den negative tilbakekobling-motstanden  $R$ . I dette tilfelle  $R = 1 \times 10^6$  Ohm. Dekadesvisj-kontrollen som består av et antall komparatorer, gir kommando tilbake til den programmerbare forsterkeren om spenningsnivået. Den bestemmer det avleste strømområde i den analoge utgangen. Med en tilbakekoblingsmotstand på  $R = 1\text{M}\Omega$  (som vist på figuren), vil en strøm på  $1 \times 10^{-6}$  A sette den programmerbare forsterkeren til  $\times 1$ .  $1\mu\text{A}$  vil derfor tilsvare 1V sendt ut på analog-utgangen til systemet sin A/D-omformer. På samme tid vil dekadesvisj-kontrollen gi ut binært 00 tilsvarende forsterkning = 1. Strømopløsningen innen 1 dekade vil være bestemt av antall bit i A/D-omformeren. Ved for eksempel en 8 bits A/D-omforming vil usikkerheten innen hver strømdekade være  $1/256$ , eller  $\sim 4\%$ . For dekadeområdet  $\times 1$  betyr dette en minimum strømavlesning på  $0,4\%$  av  $1\mu\text{A}$ , eller  $1 \times 10^{-6}$  A  $\times 4/100 = 0,04\mu\text{A}$ . For 1000 ganger er oppløsningen  $0,04/1000 = 4 \times 10^{-9}$  A.  $I = 4 \times 10^{-13}$ A. På denne måten oppnår en nøyaktige målinger i flere måleområder.



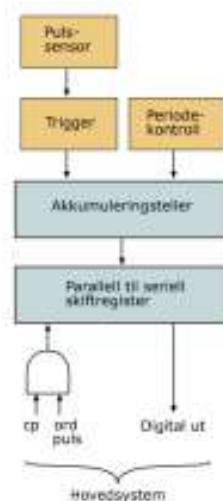
Elektrometer; med automatisk forsterkningskontroll.

Opphavsmann: [Narom](#)

## Digitale sensorer

Typiske eksempler på sensorer med kun digital utgang er pulstellings-sensorer. I disse sensorene er det elektronikk som sender informasjon om en pulsrate. Dette kan være antall tellinger per sekund fra en partikkelteller, for eksempel en elektron- eller protonteller (Geiger/Mueller-rør) eller en fotontellerutgang fra et fotometer

Her blir antall pulser samlet opp i løpet av et forutbestemt tidsintervall. Ofte brukes et parallel-til-serie skiftregister. Som vist på figuren klokkes utgangen ut i serieform til en digital multipleksør.



Hovedsystem

Akkumulerende pulsteller  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Informasjonsteori

Forfatter: Narom

[Informasjonsteori \(67611\)](#)

Telemetri handler om å overføre informasjon fra sender til mottaker gjennom et gitt medium. Informasjonsteorien ble grunnlagt i 1948 av matematikeren Claude Shannon, som brukte matematikk og statistikk for å beregne kanalkapasiteten for en datalink. Shannon er også kjent for Nyquist – Shannon samplingsteorem.



## Informasjonsteori / fagstoff

<http://ndla.no/nb/node/67611>

Shannon viste at den maksimale datarate som kan overføres, uten feil, gjennom en kommunikasjonskanal med en gitt båndbredde, sammen med "hvit" Gausisk støy, er gitt av følgende ligning.

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Der

- $C$  = kanalkapasiteten i bps (bit per sekund)
- $B$  = kanalens båndbredde i Hz. For modulerte signaler brukes passbåndet
- $S$  = mottatt signaleffekt gitt i watt
- $N$  = total støyeffekt over båndbredden målt i watt
- $S/N$  er derfor signal støyforholdet gitt som et forholdstall

Formelen bruker logaritme med grunntall 2. For utregning med kalkulator kan det være hensiktsmessig å bruke følgene omregningsformel for å få kunne bruke logaritmer med grunntall 10.

$$\log_a(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(a)}$$

Der  $a$  i dette tilfellet er grunntallet 2.

Vi får dermed

$$C = B \frac{\log_{10} \left( 1 + \frac{S}{N} \right)}{\log_{10}(2)}$$

Evnen til å overføre informasjon er derfor avhengig av signal/støyforholdet og tilgjengelig båndbredde.

Legg merke til at kanalkapasiteten  $C$  øker lineært med båndbredden  $B$ , men logaritmisk med signal/støyforholdet  $S/N$ . Formelen tar ikke hensyn til den tid det tar for overføringen. Signal/støyforholdet, i sin tur, avhenger av utsendt effekt, avstand fra sender til mottaker, antenneforsterkning og antennetemperatur.

For å gjøre overføringen optimal må det utsendte signal, statistisk, ha karakteren av "hvit støy". Det vil si at effekttettheten i spekteret må være konstant over båndbredden  $B$ .

Til vanlig vil en kunne akseptere enkelte feil i overføringen, slik at det blir et avvik i forhold til den absolutt feilfrie kanalkapasiteten, som er vist i den øverste ligninga. For å kunne øke overføringshastigheten må vi enten øke S/N forholdet, eller øke kanalbåndbredden.

### Eksempel

En satellitt-TV kanal har signal/støyforhold på 20 dB, og passbåndbredde på 10 MHz. Hva blir maksimal datarate for denne kanalen?

Vi har signal-støyforholdet i desibel, så det første vi må gjøre er å regne om til forholdstall.

Fra dB til forholdstall

$$y = 10^{\log_{10}(x)}$$

der

$$\begin{aligned} x &= \text{tall i dB} \\ y &= \text{forholdstall} \end{aligned}$$

$$\frac{S}{N} = 10^{\log_{10}(20)} = 100$$

Vi bruker formelen med  $\log_{10}$

$$\begin{aligned} C &= B \cdot \log_{10}(1 + \frac{S}{N}) \\ \log_{10}(2) &= 10 \cdot \log_{10}(1 + 100) \\ \log_{10}(2) &= 66 \cdot 10^{-6} \text{ bit/s} \end{aligned}$$

Satellittlinken har altså en teoretisk kanalkapasitet på 66,6 Mbit/s.

# A/D-omformer

Forfatter: Narom

[A/D-omformer \(50829\)](#)

A/D-omforming er prosessen å omforme et analogt signal til et digitalt. Et analogt signal er et variabelt signal som er kontinuerlig og trinnløst i tid og utstrekning, i motsetning til et digitalt eller diskret signal som kun kan ta enkelte, diskrete verdier i tid og utstrekning. En enkelt verdi av et diskret signal er kalt en punktprøve (eng: Sample), og hele det diskrete signalet er bygget opp av et sett slike punktprøver.

Kvantifisering, kvantifiseringsstøy og samplingsrate er viktige begrep i denne prosessen.

## Uniform kvantisering

Kvantifisering av et analog signal er en gjentatt prosess hvor amplituden til signalet blir avrundet til en nærliggende, diskret verdi, kalt punktprøve. Når dette gjøres gjennom hele signalet, hvor punktprøver blir tatt ut til bestemte tidspunkt, kan signalet kalles kvantifisert eller diskret. Hvor ofte disse punktprøvene blir tatt, er kalt samplingsrate eller samplingsfrekvens. Du kan lese mer om valg av samplingsrate i artikkelen det er lenket til i lenkesamlingen.

Uniform kvantifisering vil si at det analoge signalet blir delt opp i L nivåer, fordelt likt fra topp til bunn av det analoge signalet,  $V_p$  (eng: peak-to-peak voltage). Avstanden mellom kvantifiseringsnivåene,  $Q$ , er gitt ved:

$$Q = \frac{V_{pp}}{2^{n-1}}$$

Antall kvantifiseringsnivåer,  $L$ , er gitt ved

$$L = 2^n$$

der  $n$  er antall bit som brukes for å representere det analoge signalet.

Den gjennomsnittlige feilmarginen vil være halvparten av avstanden mellom kvantifiseringsnivåene,  $Q/2$ . Bruk av flere bit i A/D-omformeren vil øke presisionen av det digitale resultatet, som illustrert i animasjonen under.

Dersom det analoge inngangssignalet holder seg innenfor maksimum/minimum-grensen for A/D-omformeren vil signalet bli gjengitt uten "klipping", og vil da bli korrekt gjengitt med en presisjon avhengig av antall kvantifiseringsnivåer  $L$ .



## Kvantifiseringsnivåer / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/49967>

Figuren/animasjonen viser betydningen av antall bit brukt for å representere det analoge signalet. Flere bit gir flere kvantifiseringsnivå, som igjen gir en bedre representasjon av det analoge signalet. I en reell A/D-omformer vil det mest sannsynlig brukes minst 8 bit ( $2^8 = 256$  nivåer).

## Kvantifiseringsstøy

Kvantifiseringsstøy er feilen introdusert i det digitale signalet som konsekvens av avrunding eller beskjæringen (eng: Truncation), som uunngåelig skjer i en A/D-omformer. Med beskjæring, menes å ta bort de minst signifikante tallene i en verdi uten å avrunde. (Eks beskjæring: 0,0197 → 0,01).

Kvantiseringstøyen er signalavhengig og ikke-lineær, og kan bli modellert med flere forskjellige likninger. I en ideell A/D-omformer hvor kvantifiseringsstøyen eller feilen er uniformt fordelt mellom kvantifiseringsnivåene, og signalet har en uniform fordeling som dekker alle kvantifiseringsnivåene, kan det vises ved integralregning at kvantifiseringsstøyens rms-verdi (root-mean-square) er gitt ved

$$N_{rms} = \frac{Q}{\sqrt{12}}$$

Da rms-verdien til signalet er gitt ved

$$S_{rms} = \frac{V_{pp}}{\sqrt{2}} = \frac{Q}{\sqrt{2}}$$

, hvor likning (1) er brukt i siste ledd, kan signal-til-kvantifiseringsstøyforholdet (SQNR) (eng: Signal-to-quantization-noise ratio) uttrykkes ved

$$SQNR = \frac{S_{rms}}{N_{rms}} = \frac{Q}{\sqrt{12}} = \frac{Q}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2^n}{\sqrt{12}}$$

og  $S$  er da hhv. kvantiseringstøy og signal. Uttrykt i dB, blir signal-til-kvantifiseringsstøy-forholdet (SQNR)

$$\text{SQNR[dB]} = 10 \log_{10} \left( \frac{S}{N_q} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{3}{2} \cdot 2^{2n} \right) \approx 6.02n + 1.76$$

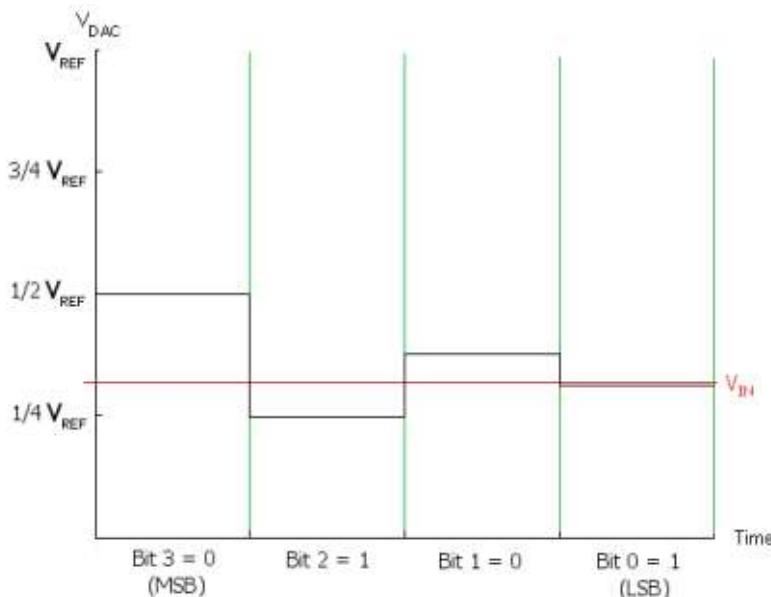
En ideell 15-bit A/D-omformer vil med likning (6) gi omtrent 92 dB i SQNR, mens 16-bit vil ha 98 dB. Med andre ord, vil signal-til-kvantifiseringsstøy-forholdet forbedres med omtrent 6 dB for hvert bit som legges til. På den andre siden er det viktig å huske at større ord i det aktuelle formatet i telemetrisystemet, som er direkte konsekvens av å digitalt representere analoge verdier med flere bit, øker kravet til større båndbredde på overføringslinken. Dette medfører at signal-støyforholdet i linken faller eksponentielt, gitt av [Shannons teorem](#).

Det finnes flere forskjellige metoder å gjøre en A/D-omforming på. Tre ulike metoder vil bli beskrevet.

### Metode 1: Gradvis tilnærming

En A/D-omformer som bruker gradvis tilnærming har fordelene av høy oppløsning og bruker lite strøm. Ulempen ved gradvis tilnærming er lav samplingsrate og at komponenter i systemet må ha like høy presisjon som det totale systemet.

Metoden for gradvis tilnærming, også kalt bit-veiende omforming, går ut på å ha en komparator som sammenligner spenningsamplitudene til det analoge inngangssignalet og utgangssignalet til en n bits digital-til-analog omformer (DAC). Figuren og animasjonen under forklarer hvordan en 4-bits ADC med gradvis tilnærming fungerer.



Gradvis tilnærming - diagram  
Opphavsmann: [Narom](#)

4-bits omformer med hvor svart og rød linje representerer henholdsvis spenning fra DAC og spenning fra det analog inngangssignalet (merket  $V_{IN}$ ).  $V_{REF}$  er maks spenning til AD-omformeren. Initiativt er alle fire bitene i DAC satt lav ('0'). MSB (mest signifikante bit) eller bit 3 blir så satt høy ('1') og  $V_{DAC}$  blir sammenlignet med  $V_{IN}$ . Som figuren viser, er  $V_{DAC} > V_{IN}$ , slik at bit 3 blir satt tilbake til lav verdi. Deretter går AD-omformeren over til bit 2 som settes høy, og resulterer i en høy verdi etter sammenligning da  $V_{DAC} < V_{IN}$ . Det samme blir gjort for de to siste bitene,  $V_{DAC} > V_{IN}$  gir '0' og  $V_{DAC} < V_{IN}$  gir '1', slik at den totale digitale bit-strenge som kommer ut fra AD-omformeren blir '0110'.



Gradvis tilnærming / flashnode  
<http://ndla.no/nb/node/53189>

DAC er som regel et motstandsnettverk med en port for hvert bit, som justeres en port for hver klokkepuls. Illustrasjon av virkemåten til et motstandsnettverk er gitt i animasjonen under.



## Motstandsnettverk / flashnode

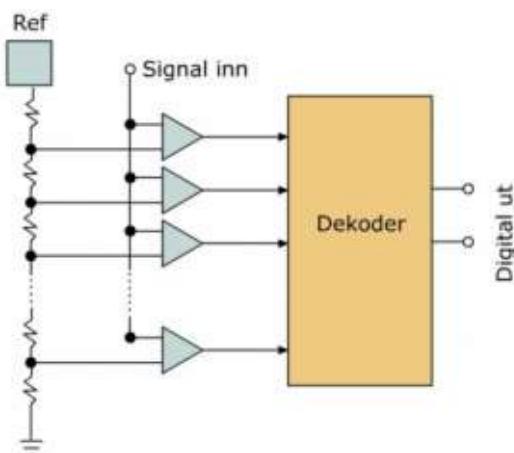
<http://ndla.no/nb/node/53207>

Dette gjør gradvis tilnærming til en metode som bruker lite strøm og plass, men som også bruker lang tid, da en n-bits omformer trenger n klokkepulser før neste punktprøve kan digitaliseres.

### Metode 2: Parallel analog-til-digital omformer

Parallel analog-til-digital omforming, også kalt flash A/D-omformer, utmerker seg fra de andre typer omformere ved meget høy hastighet, men generelt lav oppløsning. Omformeren består av en rekke operasjonsforsterker/komparatorer som arbeider i parallel, som betyr høyere produksjonskostnader sammenlignet med andre A/D-omformere.

En flash-omformer trenger  $2^n - 1$  komparatorer, og begrenser dermed denne typen A/D-omformer til rundt 8 bit (255 komparatorer). En kvantisering er gjort i løpet av en klokkeperiode, derfor utmerker denne typen omformere seg på hastighet.

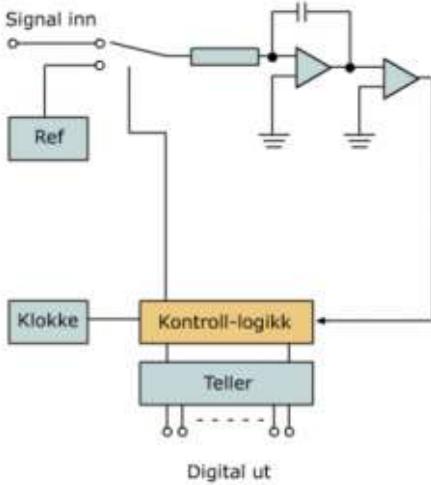


Flash A/D-omformer  
Opphavsmann: Narom

*Det analoge signalet kommer inn på den ene av de to inngangene til komparatorene, og blir sammenlignet med referansesignalet merket "Ref". En komparator gir ut verdien '1' eller '0', avhengig om det analoge inngangssignalet er hhv. høyere eller lavere enn referansesignalet.*

### Metode 3: Integrerende A/D-omforming

En integrerende A/D-omformer er, i motsetning til en parallel A/D-omformer, meget bra på høy oppløsning (ant. bit n), men er til gjengjeld treg. Det er integreringstiden som avgjør hvor nøyaktig kvantiseringen blir, så hastighet kan økes på bekostning av oppløsning og omvendt.

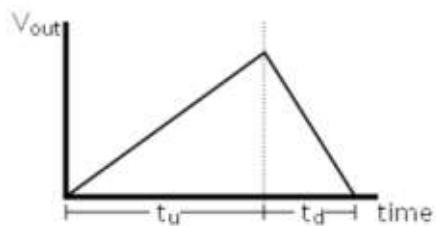


Integratorende A/D-omforming.

Integratorende A/D-omformer  
Opphavsmann: [Narom](#)

Figuren viser grunnleggende oppbygning av en integrerende A/D-omformer. Den består av en integrerende operasjonsforsterker, og en svitsj til å velge mellom det analoge inngangssignalet,  $V_{in}$ , og et kjent referansesignal,  $V_{ref}$ . Tiden for utladning blir målt i kontroll-logikken, og sendt videre til en teller som produserer den digitale verdien.

Den analoge til digitale konverteringen består av to deler; "run-up" og "run-down". Ved run-up står svitsjen på  $V_{in}$  og lar integratorens kondensator lades opp en bestemt tid  $t_u$ . Deretter går A/D-omformeren over i run-down, hvor svitsjen blir flippet over til  $V_{ref}$  og tiden for utladning,  $t_d$ , blir målt. For at  $V_{ref}$  skal klare å lade ut kondensatoren, må den ha motsatt polaritet av  $V_{in}$ . Derfor må en integrerende A/D-omformer ha både positiv og negativ referanse spenning for å klare å omforme et analogt signal som både er positivt og negativt.



Spenning ut av integrator  
Opphavsmann: [Narom](#)

Figuren viser utgangsspenning fra integratoren,  $V_{out}$ , og tilhørende oppladning- og utladningstid  $t_u$  og  $t_d$ . Oppladningstiden  $t_u$  er en kjent verdi, mens utladningstiden  $t_d$  blir målt, for å finne frem til den ukjente spenningsverdien til det analoge signalet  $V_{in}$ .

Utgangsspenningen fra integratoren kan uttrykkes ved

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{RC} t_u + V_{initial}$$

dersom vi antar at  $V_{in}$  er konstant under hele "run-up"-prosessen. Dersom vi videre antar at  $V_{initial}$  er null, kan utgangsspenningen fra integratoren i "run-up"- og "run-down"-uttrykkes hhv. som

$$V_{out-up} = \frac{V_{in}}{RC} t_u$$

og

$$V_{out-down} = -\frac{V_{ref}}{RC} t_d + V_{out-up} = 0$$

Ved å kombinere ligning (8) og (9), og løse med hensyn til den analoge inngangsverdien  $V_{in}$ , resulterer i

$$V_{in} = -V_{ref} \frac{t_d}{t_u}$$

som kontrollogikken og telleren kan prosessere om til en digital verdi.

Det er  $\$run-down\$$ -tiden  $t_d$  som bestemmer oppløsningen (antall bit n) målingen får, og kan uttrykkes ved

$$t_d = \frac{2^n f_{clk}}{f_{ref}}$$

hvor  $f_{clk}$  er frekvensen til klokka. For en fortløpende kvantisering vil  $t_d \approx t_u$ , og vi får uttrykket

$$t_m = t_d + t_u = 2 \frac{2^n f_{clk}}{f_{ref}}$$

hvor  $t_m$  er den totale måletiden. Hvis det kreves en oppløsning på 16 bit med en klokke på 10 MHz, må det måles i 13.1 ms, som betyr en hastighet på kun 76 samplings per sekund.

## Andre metoder

Det finnes en rekke andre A/D-omformere som hver har sine styrker og svakheter, der oppløsning, hastighet, energiforbruk, pris og størrelse er viktige faktorer.

Sigma-delta eller delta-sigma A/D-omformer er en av de beste på høy oppløsning etter den integrerende A/D-omformeren. Den er også lett integrerbar i CMOS-teknologien (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Andre typer er ramp-compare, pipeline, delta-encoded, Wilkinson og time-interleaced A/D-omformer.

# Samplingsrate

Forfatter: Narom

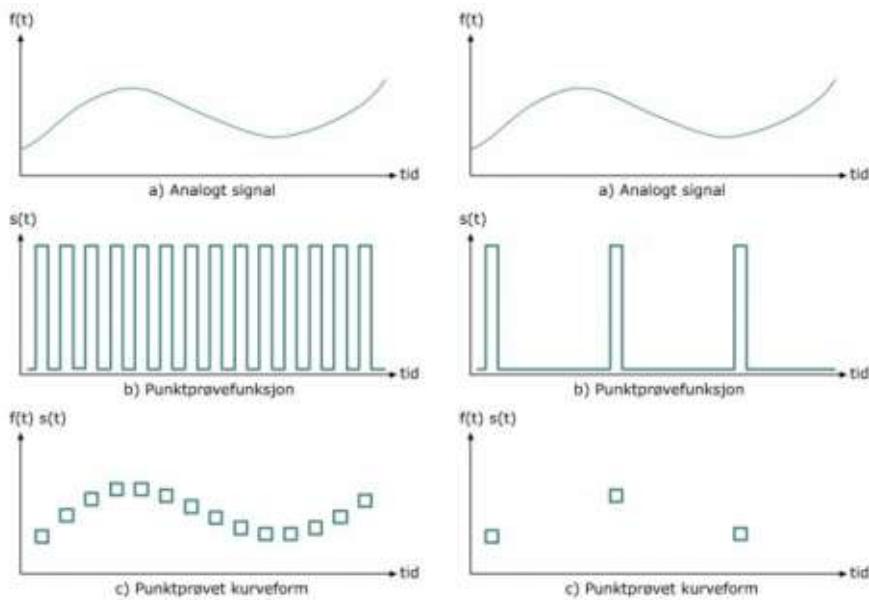
[Samplingsrate \(53212\)](#)

I prosessen med å gjøre et analogt signal digitalt er hyppigheten av punktprøvinger (også kalt samplingsfrekvens) et svært viktig begrep. For ikke å miste noe av det analoge signalet i prosessen, sier Nyquist samplingsteorem at punktprøvingsfrekvensen må være mer enn det dobbelte av den høyeste frekvensen til det analoge signalet. Hvis punktprøvingsfrekvensen er lavere vil det ikke være mulig å gjenskape signalet. Dette kan uttrykkes

$$f_s > 2B_s$$

hvor  $B_s$  er den høyeste frekvensen til det analoge signalet, og må ikke forveksles med båndbredden til signalet.

Eksempel: Hvis et analogt signal, som varierer mellom 200 Hz og 20 kHz, skal digitaliseres, må punktprøvingsfrekvensen  $f_s$  være større enn  $2 \cdot 20 \text{ kHz} = 40 \text{ kHz}$ .



Punktprøvingsfrekvens

Opphavsmann: [Narom](#)

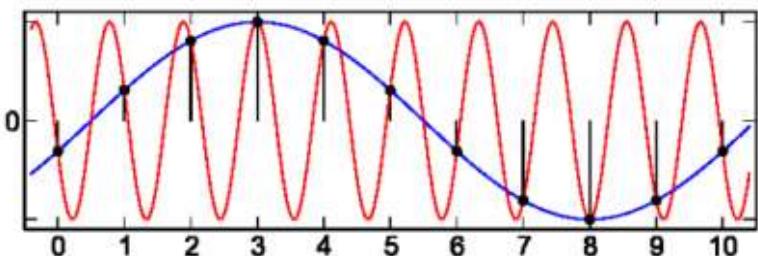
Figuren til venstre viser øverst et analogt signal som blir punktprøvd med en funksjon  $s(t)$ . Frekvensen til punktprøvingen er her høy nok til at det analoge signalet kan vinnes tilbake fra det resulterende digitale signalet (nederst til venstre). Figuren til høyre derimot, har en punktprøvingsfunksjon med for lav punktprøvingsrate, slik at det ikke lenger er mulig å få tilbake det analoge fra det resulterende digitale signalet.

# Aliasing

Forfatter: Narom

[Aliasing \(54918\)](#)

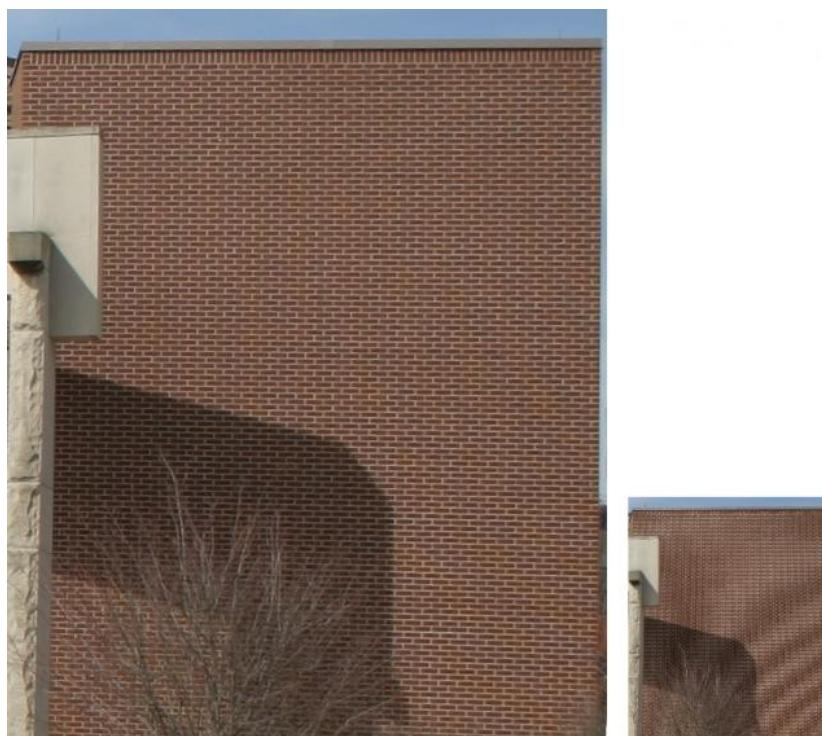
Aliasing er et begrep i signalprosessering og andre fagfelt om en effekt som får forskjellige signaler til å etterlikne hverandre. Dette kan skje om oppløsningen til et digitalisert signal blir for lav. Hvis signalet som digitaliseres endrer seg sakte i forhold til samplingsraten til ADCen kan vi anta at verdien av signalet mellom to samplingser ligger mellom de tilsvarende samplingsverdiene. Hvis signalet derimot forandrer seg raskt i forhold til samplingsraten, kan ikke denne antagelsen lenger gjøres.



I figuren over er aliasing illustrert. Det resulterende signalet (blå kurve) etter konvertering fra analogt, via digitalt og tilbake til analogt er totalt forskjellig fra det opprinnelige signalet (rød kurve). Signalet har en frekvens som tilsvarer forskjellen mellom frekvensen til det opprinnelige signalet og samplingsfrekvensen (sorte prikker). Aliasing  
Opphavsmann: [Moxfyre \(Wikimedia Commons\)](#).

Før å unngå aliasing kan noen grep gjøres. Et grep er å øke samplingsfrekvensen slik at Shannons teorem oppfylles. Et annet er å filtrere signalet gjennom et lavpassfilter før det blir sendt til ADCen. Dette kalles anti-aliasing, og resulterer i at de høyeste frekvenskomponentene til signalet fjernes før digitaliseringen slik at [Shannon - Nyquist samplingsteorem](#) oppfylles.

I digital bildebehandling er aliasing også et svært viktig tema. Figuren under viser to bilder, hvor det ene (venstre) har høy nok samplingsfrekvens, mens det andre (høyre) har for lav samplingsfrekvens.



Bilde av mursteinsbygg hvor det er blitt brukt for lav samplingsfrekvens på bildet til høyre. Vi får en etterlikning (eng: aliasing) av lavfrekvent variasjon i bildet som ikke finnes i originalen til venstre. Det karakteristiske mønstret vi får i bildet til høyre kalles moaré.Mursteinsvegg  
Opphavsmann: [Colin M.L. Burnett](#)

# Signalmultipleksing

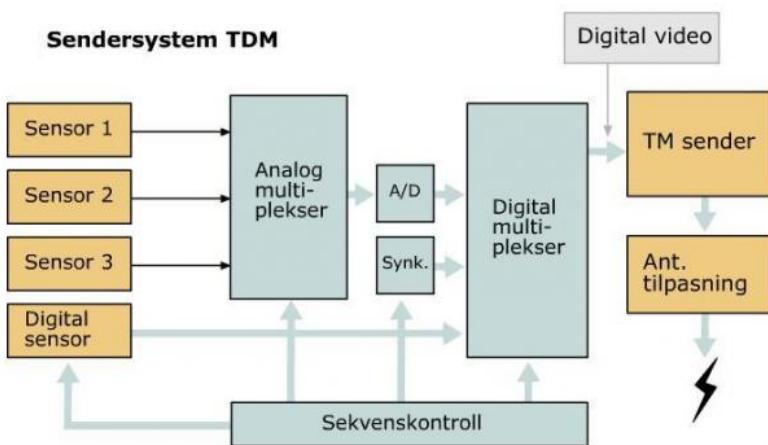
Forfatter: Narom

[Signalmultipleksing \(55383\)](#)

En vitenskapelig rakett inneholder mange sensorer og instrumenter. Det kan være sensorer som skal overvåke nyttelasten til raketten (kalt house keeping), som batterispennin og intern temperatur, eller avanserte forskningsrettede instrumenter. For å kunne overføre data fra flere forskjellige instrumenter over en og samme telemetrikkanal trenger vi signalmultipleksing.

Multipleksing kan deles i to hovedgrupper. Den mest vanlige måten er å tildele hver sensor ei tidsluke over kommunikasjonskanalen. Dette er kalt tidsdelt multipleksing, TDM. Hver sensor får hele båndbredden på overføringslinken i bestemte tidsluker. En kan derfor ikke motta kontinuerlige målinger fra hvert instrument, men kun punktprøvinger.

Tidslukene i starten av et format blir tildelt et unikt synkroniseringssignal slik at det er mulig for en demultipleser å identifisere de ulike tidslukene på mottakersiden. Metoden åpner for en stor fleksibilitet i dataoverføringen. Forutsetningen er at hver sensor oppdateres hurtig nok til å tilfredsstille Nyquist-kriteriet. (Se [Nyquist samplingsteorem](#))



Figuren viser grunnprinsippet for et sendersystem med tidsdelt multipleksing. Tidsdelt multipleksing  
Opphavsmann: [Narom](#)

En annen, mer utdatert måte å gjøre signalmultipleksing på er å dele opp båndbredden på overføringslinken, og sende sensordata kontinuerlig på hver sin frekvens.. Dette er kalt frekvensdelt multipleksing – [FDM](#), og er en avleggs form for signalmultipleksing.

Data som er multipleket inn med TDM inn på en og samme kanal kan være modulert ved hjelp av ulike modulasjonsmetoder.

- [PAM \(Pulse Amplitude Modulation\)](#)
- [PDM \(Pulse Duration Modulation\)](#)
- [PPM \(Pulse Position Modulation\)](#)
- [PCM \(Pulse Code Modulation\)](#)

De tre første er analoge modulasjonsmetoder, mens PCM er en digital moduleringsform.

# Enkoder – databehandling og kontroll

Forfatter: Narom

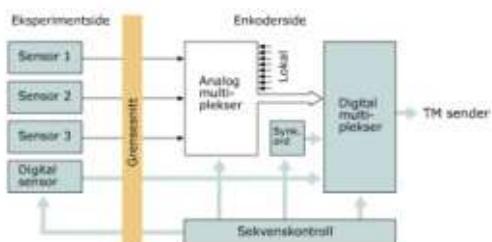
[Enkoder – databehandling og kontroll \(56005\)](#)

Databehandlingsenheten om bord i en raketnyttelast blir ofte kalt enkoder, fordi den ordner den innkommende data etter et bestemt mønster som for eksempel en PCM datablokk. Enkoderen er bindeleddet mellom eksperiment og sender, og kan inneholde analoge og digitale multipleksere, analog til digitalomformere, logiske kretser for sekvenskontroll og minne.

## Sentraliserte eller distribuert databehandling

Figurene illustrerer to viktige prinsipp i utforming av databehandlingsdelen i en instrumentlast. Programmerbare kretser og storskålaintegrasjon gjør at et distribuert system er mer anvendbart i praksis. Det innebærer at den enkelte eksperimentator har til rådighet større dynamiske muligheter til nøyaktighet og kommuteringsrater. Derfor er overgangen til pulskodet multipleks (PCM) nesten universal.

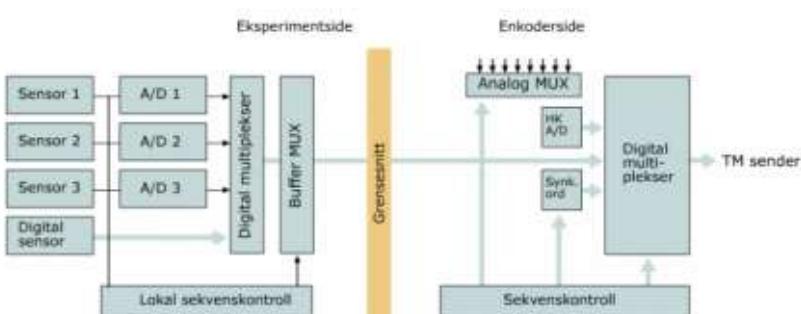
Sentralisert eksperiment / enkodersystem.



Sentralisert databehandlingssystem.

Sentralisert databehandling  
Opphavsmann: [Narom](#)

Distribuert eksperiment og enkoder system.



Distribuert databehandlingssystem.

Distribuert databehandling  
Opphavsmann: [Narom](#)

På mange måter kan en si at det er prisen og kvaliteten på elektronikken og kompleksiteten til nyttelasten som er avgjørende for hvordan det er hensiktsmessig å bygge opp et databehandlingssystem. For eksempel vil det ikke være behov for en analog multipleks dersom hvert instrument kan ha sin egen analog til digitalomformer.

## Sekvenskontroll

De to eksempelsystemene som er vist bruker også to ulike prinsipp for sekvenskontroll, synkron og asynkron sekvensstyring.

I figuren for sentralisert system brukes en synkron sekvenskontroll. Eksperimentseksjon kontrollert av hovedkodersystemet som styrer alle tidssekvenser. Det brukes en felles A/D-omformer for de analoge inngangene.

I figuren for distribuert system er alle analoge og den digitale sensoren styrt lokalt i eksperimentseksjonen. Data lagres lokalt og kan overføres som et eget PCM-format til det sentrale datahåndteringssystemet (asynkron dataoverføring). En slik forprosessering gir eksperimentatoren store muligheter

- Variabel skalering
- Midling
- Komprimering
- Hurtigsampling i spesielle tidsintervall og lokal lagring av data

## Oppsummering

Vi har to hovedtyper databehandlingssystem

1 Sentralisert databehandligssystem

2 Distribuert databehandligssystem

I en enkel instrumentlast vil alternativ 1 være naturlig, slik at en sentral kontrollenhet styrer alle databehandlingsfunksjoner. Studentraketten bruker en variant av dette systemet, men hver analoge sensor har sin egen analog til digitalomformer.

I større system vil det være fordeler med alternativ 2. Større eksperimenter kan ha lokal sekvenskontroll og dedikert dynamisk oppløsning. Dette har også betydning ved utprøving ved elektrisk integrering. Eksperimentet kan testes helt uavhengig av styrepulser og dekoding fra den sentrale delen av instrumentlasten.

## PCM-datablokk

Forfatter: Narom

[Planlegging av en PCM datablokk \(57291\)](#)

Pulse Kode Modulering, eller PCM koding av data vil si at målingene gjøres om til digitale dataord som organiseres i en datablokk før det sendes mot bakken. Ulike instrumenter krever forskjellig nøyaktighet (bitoppløsning) og oppdateringsfrekvens. Disse momentene i tillegg til hvor mange parametre som skal overføres bestemmer oppbygningen av en slik datablokk, eller PCM-format.

Når en skal planlegge et PCM-format til en rakett må en altså kartlegge

- Hvilke instrumenter som er om bord; Hvor mange parametre skal overføres
- Hvilken nøyaktighet kreves for hver parameter; Hvor mange bits trengs for å representere hver av parametrene
- Hvor ofte må hver av parametrene måles; Hvor stor samplingsrate har instrumentet

Når en kjenner alle disse momentene kan en regne seg frem til hvor stor båndbredde/overføringshastighet som kreves for å tilfredsstille disse kravene.

## Kommuttering

For å kunne dele opp overføringskapasiteten til raketten slik at viktige data, som krever høy oppløsning og samplingsrate, kan gis flere tidsluker enn mindre viktige data må en dele opp datablokkens som en tabell. Radene i tabellen kalles rammer og kolonnene kalles ord. I figuren under er det 16 ord i hver ramme og 8 rammer i hvert format. De to første ordene i hver ramme er synkroniseringsord. Disse markerer starten på hver ramme slik at mottakersystemet skal kunne finne frem til målingene som ligger inni formatet. I tillegg må ett av ordene inneholde en teller som nummererer hver ramme inni formatet.

Sentrale størrelser i oppbygningen av en PCM dataramme

- Antall ord pr. ramme
- Antall rammer pr. format.
- Antall bits pr. ord (normalt 4 -32)
- Antall synkroniseringsord (normalt 1 -2).
- Plassering av synkroniseringsord(som regel ord 0 og 1)
- Plassering av rammeteller
- Bitrate (bits/sek)



## Oppbygging av PCM-datablokk / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/57324>

## Definisjon

Kommuttering: Forholdstall X:1 eller 1:X som viser antall ganger en datakanal opptrer per ramme. Har en kanal kommuntering X:1 betyr det at kanalen opptrer X ganger per ramme. Dersom en kanal har kommuntering 1:X betyr det at den opptrer i hver X'te ramme.

I vårt eksempel innebærer det at

- dataord 4 har kommuntering 2:1
- dataord 3 har kommuntering 1:8
- dataord 7 har kommuntering 1:1

*Hovedkommuttering:* Kanalen har kommuntering 1:1, d.v.s. at den opptrer en gang pr. ramme. Dataord 7 er eksempel på en hovedkommuterert kanal.

*Superkommuttering:* Kanalen er X:1 kommunert hvor X er større enn 1, det vil si at kanalen opptrer mer enn en gang per ramme. Dataord 4 er eksempel på en superkommuterert kanal.

**Subkommuttering:** Kanalen har kommutering 1:X hvor X er større enn 1, det vil si at kanalen opptrer sjeldnere enn 1 gang per ramme. Dataord 3 er eksempel på en subkommuttert kanal.

**Spesielle tilfeller:** I visse tilfeller kan kanaler oppstre med uperiodisk mellomrom i formatet. Det vil si at kanalen kan oppstre på for eksempel ord 1, 10, 28 , altså uten fast periode mellom punktprøvingene. Kanalene er likevel avlest med fast periodetid, men blir lagret uperiodisk i filen. Dette vil det være gode muligheter for å gjøre i et distribuert enkodersystem med asynkront grensesnitt mellom eksperiment og enkoderside.

Noen signaler avleses med mer enn 8 bits opplosning. I et 8 bits ord-format-system vil en slik kanal oppste to datakanaler. Det er vanlig å plassere de mest signifikante bittene først og de minst signifikante bittene i neste ord. Kanalen er da ikke superkommuttert selv om den oppster flere ord per ramme.

## Planlegging av et PCM-format for en reell sonderakett

For bedre kunne forstå planlegging av et PCM-format skal vi ta for oss et reelt eksempel på en instrumentlast. Utgangspunktet er ønsket fra eksperimentatorene for kommuteringsrate og nøyaktighet. Hovedeksperimentene er vist i tabellform under.

### [TM-spesifikasjoner for eksperimenter i en instrumentlast, eksempel 1](#)

Av dette estimatet framgår at vi vil trenge ~256 kbit/sek for å kunne møte eksperimentatorenes ønsker om samplingrater og nøyaktighet. I tillegg til dette kommer nødvendige tekniske parametere. En standard bitrate på eksisterende enkoder er 312,5 kbit/sek. De eksakte kommuteringsratene blir da som vist under.

### [Samplingrater for eksperimenter og tekniske data, eksempel 1](#)

Av praktiske grunner er det vanlig å dele opp en dataramme i bytes. Vårt forslag er derfor en ramme som består av 32 slike tidsluker på 8 bit. Et forslag til ramme er vist i tabellen under. Legg merke til at vi bruker både super-, hoved- og subkommuttering.

### [Data i en ramme som funksjon av tid, eksempel 1](#)

Eksperimentet "Nøytral tetthet" forekommer 4 ganger i en dataramme (tidsluke 3, 4, 16, 17, 19, 20, supercom 4:1). Eksperimentet "lonetetthet 1)" og "lonetetthet 2)" forekommer 2 ganger per ramme (tidsluke 5, 6, 21, 22 og 7, 8, 23, 24, superkommuttert 2:1). Også her er det behov for en nøyaktighet som krever 2 bytes. Andre data, slik som magnetometere (magnetiske orienteringssensorer) er her vurdert til å greie seg med en nøyaktighet som gitt av 8 bits. X og Z-aksen kommuteres 1:1, mens y-aksen kommuteres 2:1. Alle tekniske data, slik som strømmer, spenninger, temperaturer og liknende er subkommuttert (1:32, dvs 38,1 Hz). Et helt format (datablokk) inneholder altså 32 subrammer. Blokkfrekvensen er 38,1 datablokker/sek.

Estimatet for eksperimenter og tekniske data er derfor

- Eksperiment ønsker: ~ 240 kbit/sek
- Tekniske støttedata: ~ 78 kbit/sek
- Totale krav: ~ 318 kbit/sek

Den reelle bitraten i eksempelet ovenfor ble 312,5 kbit/sek med en eksisterende enkoder hvor bitraten er gitt av et fast neddelingsforhold fra systemets klokkeoscillator på 10 MHz. Bitraten fremkommer slik:

Oscillatorens frekvens / 32 ned deler =  $10e+6 / 32 = 312,5$  kHz.

Kravet til kanalkapasitet i overføringslenken er dermed gitt.

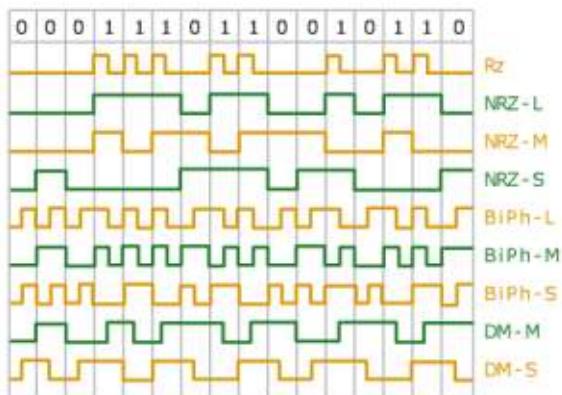
# Koding

Forfatter: Narom

[Koding \(55416\)](#)

Det digitale signalet, strømmen av logiske null og en, er ikke alltid egnet for overføring over avstand i sin originale form. Signalet må da omkodes før overføring. De viktigste hensyn ved valg av kode er båndbreddebehov, problemer med likestrømskomponent i signalet og mottakers evne til å gjenvinne klokke. En fellesbetegnelse for slike koder er linjekode.

Det finnes mange forskjellige måter å kode de to binære symbolene '0' og '1' i en bitstrøm. Tabellen viser en liste over noen koder.



Rz	Return to zero
NRZ - L	Non-return to zero-level
NRZ - M	Non-return to zero-mark
NRZ - S	Non-return to zero-space
BiPh - L	Bi-phase level
BiPh - M	Bi-phase mark
BiPh - S	Bi-phase space
DM - M	Delay modulation mark
DM - S	Delay modulation space

PCM-koder.

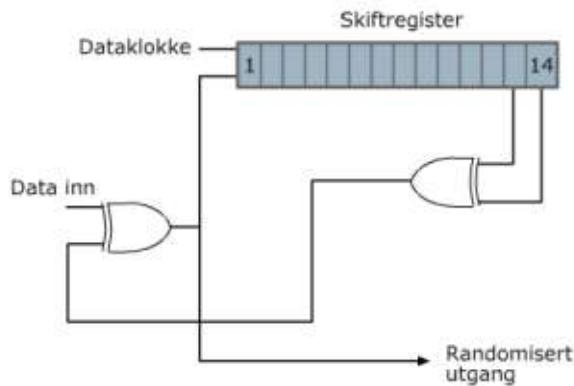
Tabell over noen forskjellige måter å kode den binære datasekvensen  
0001110110010110.PCM-koder

Opphavsmann: [Narom](#)

Non-Return-to-Zero- (NRZ) og bifase-kodene (biφ eller biPh) er forskjellige ved at bifase-kodene har overgang midt i bitcellen. Grunnen er for å gjøre det enklere på mottakersiden å trekke ut klokkepulsen fra bitstrømmen slik at hvert bit enkelt kan skilles fra hverandre. Ulempen ved å bruke bifase-kode er at båndbredden må økes eller bitraten minskes sett i forhold til NRZ. Biφ-L (eng: Biphase-Level), også kalt Manchester koding, har en stigende flanke for den logiske verdien '0' og en synkende flanke for '1'. I alle tilfeller har den da en overgang midt i bitcellen slik at klokken enkelt kan trekkes ut.

Se for deg en lang bitrekke med kun høy verdi '1' komme etterverandre i tilfellet med NRZ-L. Mottakersystemet vil da få problemer med å trekke ut klokken og skille bitcellene i datastrømmen fra hverandre. Det er av denne grunn foretatt mange forsøk på å framskaffe flere nullgjennomganger ved NRZ-kodene. Dette er delvis gjort i DM-kodene (eng: Delay Modulation Coding; ie Miller code), og spesielt med teknikken tilfeldigjordt NRZ eller RNRZ (eng: Randomized NRZ).

Hensikten med tilfeldiggjøring i RNRZ er å fremskaffe en tilnærmet lik fordeling av binære 1 og 0 i en gitt datastrøm. Siden prosessen virker som en logisk tilstandsmaskin, kan datastrømmen reetableres i en invers prosess på mottakersiden. Figuren under viser et prinsipp for tilfeldiggjøring av et NRZ-signal. Bit 13 og 14 er i dette tilfelle sendt inn i en ekslusiv-eller-krets (XOR) med sin utgang tilbakeført i datastrømmen gjennom en ny eksklusiv-eller-krets.



Prinsipp for tilfeldiggjøring:  
Skiftregisterprinsippet.

Randomisering med skiftregister  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Telemetrisenderen

Forfatter: Narom

[Telemetrisenderen \(56368\)](#)

Telemetrisenderen har siden andre verdenskrig utviklet seg fra primitive selvsvingende amplitudemodulerte oscillatorer i VHF-området til krystallstyrte mikrobølgesendere basert på halvlederteknologi. Frekvensstabilitet er viktig. Vi skal derfor beskrive to metoder for stabil frekvenskontroll av mikrobølgesendere.

### Frekvenskontroll med multiplikatortrinn

Studer figuren nedenfor. Senderen drives av en krystalloscillator i MHz-området etterfulgt av et antall multiplikatortrinn.

Ved for eksempel tredobling i hvert enkelt trinn vil utgangsfrekvensen være

$$f_{ut} = f_{osc} \cdot 3^n$$

hvor  $n$  = antall triplertrinn.



Sender med frekvensmultiplikatorer / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/56325>

Ved en krystalloscillatorfrekvens på 9 MHz og 5 triplertrinn er

$$f_{ut} = f_{osc} \cdot 3^n = 9\text{MHz} \cdot 3^5 = 2187\text{MHz} (\text{S-båndet})$$

Problemet ved system med mange frekvensmultiplikatortrinn er at den totale virkningsgraden til senderen blir lav. Mange multiplikatortrinn trekker uforholdsvis mye strøm. En typisk sender av denne typen vil ha en total virkningsgrad på 5 til 8%. Effektiv UHF utgangseffekt i forhold til total inngangseffekt, typisk 28V ved 1A inn og 2 Watt ut gir total virkningsgrad på  $2/28 \times 100 = 7,1\%$ .

### Frekvenskontroll ved hjelp av faselåst sløyfe

I de senere år har frekvenssyntetisatorteknikk blitt tilgjengelig i UHF-området. Billige PLL-mikrobrikker (eng.: PLL= Phase Locked Loop) med lavt strømforbruk finnes på markedet. Total virkningsgrad på 20 - 30 % kan realiseres med denne typen sendere. Den interaktive figuren under viser prinsippet for frekvenssyntetisert kontroll.



Utgangsfrekvensen bestemmes av hovedheddelsesforholdet  $N$  og referanseneddelingsforholdet  $R$ . PLL-brikkene kan, som regel, omprogrammeres eksternt, slik at utgangsfrekvensen lett kan endres.

For å frekvensmodellere en slik sender vil datakoden legges til korreksjonsspenningen ut fra fasedektoren. På denne måten blir reguleringssløyfen "forstyrret" slik at spenningen inn på den spenningsstyrte oscillatoren vil variere i takt med datasignalet. Dette vil resultere i at utgangen fra VCO blir frekvensmodulert.

# Modulasjon av sender

Forfatter: Narom

[Modulasjon av sender \(55385\)](#)

Før det informasjonsbærende signalet i nyttelasten kan overføres til bakken må det moduleres inn på en høyfrekvent sinusbølge kalt bærebølge. Modulasjonen skjer ved at det informasjonsbærende signalet påvirker en eller flere av bærebølgens egenskaper, for eksempel frekvens, fase eller amplitude. På denne måten blir det informasjonsbærende signalet innbakt i et signal som lar seg sende over store avstander.

Det informasjonsbærende signalet kan ha mange former. I kapitlet om signalmultipleksing var vi innom flere forskjellige former for tidsdeling, både analoge (PAM, PDM og PPM) og den digitale varianten PCM. De analoge metodene vil påvirke bærebølgen analogt, eller trinnløst, mens de digitale metodene vil påvirke bærebølgen i diskrete trinn.

## Modulasjon av et analogt spenningsignal

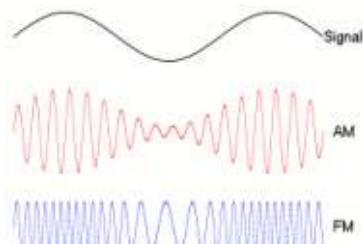
### Amplitudemodulasjon AM

Det analoge signalet påvirker amplituden på bærebølgen. Lav amplitude for lav verdi og høy amplitude for høy verdi. Amplitudemodulasjon er, av mange grunner, lite brukt. Hovedgrunnen er støyfølsomhet. Forklaringen til dette er at informasjon ligger som en kontinuerlig endring i bærebølgens amplitude. Når ytre støy som oftest påvirker amplituden i bærebølgen (og dermed påvirker modulasjon) kan man forstå hvorfor denne modulasjonsformen er relativt lite brukt til dataoverføring.

### Frekvensmodulasjon FM

Det analoge signalet påvirker frekvensen av bærebølgen. Lav frekvens for lave spenningsverdier og høyere frekvens for høye spenningsverdier.

Figuren under illustrerer forskjellen på AM og FM.



AM og FM

Opphavsmann: [Esumir](#), [Berserkurus](#)

### Fasemodulasjon PM

Fasemodulasjon vil si å la bærebølgens fase variere med spenningen på signalet. Fasemodulasjon er ikke mye brukt i denne formen på grunn av krav til komplisert mottakerutstyr samt tvetydighetsproblemer mellom for eksempel +180 grader og -180 grader.

### Modulasjon av digitale signaler

I digital modulering blir bærebølgen modulert av en digital bitstrøm. I raketsammenheng er denne ofte et tidsdelt PCM kodet signal. Endringen av bærebølgen er gjort i diskrete trinn kalt symboler.

### Frekvensskiftnøkling FSK

I FSK (eng.: Frequency Shift Keying) blir den digitale informasjonen overført ved diskrete frekvensendringer i bærebølgen. Den vanligste formen er binær FSK (BFSK) i BFSK defineres de 2 binærsymbolene med to diskrete frekvenser.

### PSK Faseskiftnøkling

PSK (eng: Phase-shift keying) er en digital moduleringsform som bærer data ved at fasen på bærebølgen endres.

I binær faseskiftnøkling (BPSK) er de binære symbolene representert med -90 og +90 graders faseforskyvning av bærebølgen.

I kvadratur faseskiftnøkling (QPSK) kan bærebølgen moduleres med fire ulike faser. En naturlig inndeling er  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  og  $270^\circ$ . Med denne metoden kan en doble bitrate ved at hvert symbol representerer 2 bit.

$90^\circ \rightarrow 01$

$180^\circ \rightarrow 10$

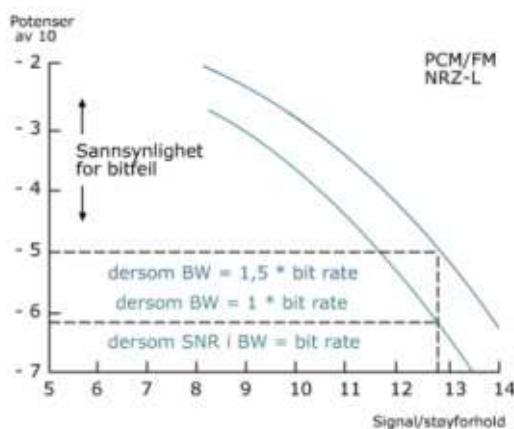
$270^\circ \rightarrow 11$

## Valg av modulasjonsmetode

Vurdering av modulasjonsmetoden avhenger av

- signal/støyforholdet på det mottatte signal over en gitt avstand
- antall målinger og ønsket overføringsnøyaktighet

Beregning av feilrater ved forskjellige modulasjonsmetoder og overføringskoder vil bli behandlet i kapittel om Linkanalyse. En foreløpig demonstrasjon av sammenhengen mellom S/N i dB og feilrate er vist i figuren under.



Sannsynlig bitfeilrate som funksjon av signal/støyforholdet.

Bitefeilrate som funksjon av signal/støyforhold

Opphavsmann: [Narom](#)

Figuren viser to kurver

- effektiv databåndbredde = 1,5 multiplisert med bitraten
- effektiv databåndbredde = 1,0 multiplisert med bitraten

Vi ser for eksempel at et S/N på ~ 13 dB føre til feilrate

- 1 feil per ~105 bit. For effektiv databåndbredde = 1,5 multiplisert med bitraten
- 1 feil per ~106 bit for effektiv databåndbredde = 1,0 multiplisert med bitraten

# Antenner på nyttelast

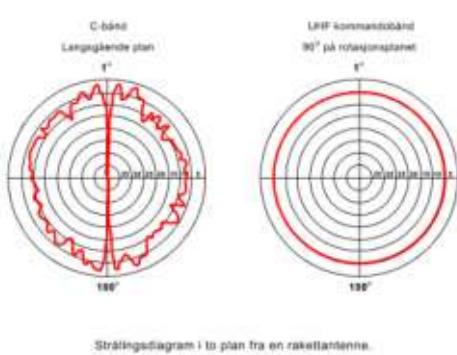
Forfatter: Narom

[Antenner på nyttelast \(58841\)](#)

På grunn av rakettens høye fart og stadige endring i orientering stilles det store krav til antenner som skal plasseres på en raketnyttelast. Antennen må ha en robust og kompakt fysisk utførelse for å tåle påkjenningene de vil utsettes for i løpet av flukten. Antennene må også ha en tilnærmet retningsuavhengig utstråling slik at rakettens rotasjon ikke skal fremkalte store svingninger i mottatt signalstyrke. Ved å lage antenner som sender sirkulært polariserte signaler vil en også unngå store polarisasjonstap.

## Strålingsdiagram og polarisasjon

Antenneforsterkningen uttrykkes i dB<sub>i</sub>. Begrepet dB<sub>i</sub> betyr desibel i forhold til en tenkt, isotropisk antenn. En isotropisk antenn er en teoretisk punktformet utstråler som avgir samme effekt i alle retninger. En gitt antenn vil derfor bli karakterisert ved strålingsdiagrammer som angir avvik fra en isotropisk antenn.



Strålingsdiagram i to plan fra en raketantenne

Strålingsdiagram for senderantenne  
Opphavsmann: [Narom](#)

Polarisasjonsegenskapene er det også nødvendig å spesifisere. Polarisasjonen til en antenn bestemmer retningen til den elektriske feltvektor i den utsendte bølgen. Polarisasjonsegenskapene til mottakerantennen må stemme mest mulig overens med polarisasjonen til mottatte signal. Siden raketten hele tiden endrer orientering, er det ikke gunstig å bruke lineær polarisasjon. Da vil en få [polarisasjonssvekking](#) når polarisasjonsretning på rakett og antenn ikke stemmer overens. For å motvirke polarisasjonssvekking er raketantener oftest designet til å gi en sirkulær polarisasjon. E-feltvektoren i bølgen roterer da enten mot høyre eller mot venstre. Sirkulær polarisasjon betegnes derfor som høyre-, eller venstrehånds sirkulær polarisasjon.

Når en rakett for eksempel sender i høyrehånds sirkulær polarisasjon, vil denne bli mottatt som venstrehånds sirkulær polarisasjon dersom signalet har blitt reflektert. Derfor vil en antenn som er laget for sirkulær polarisasjon, ofte ta i mot både venstrehånds og høyrehånds polarisering. Dette kalles polarisasjonsdiversitet (eng.:Polarization Diversity). Detaljer på mottakersiden vil bli gjennomgått i artikler under mottakersiden.

## Antennetyper

De vanligste antennetyper i raketnyttelaster er

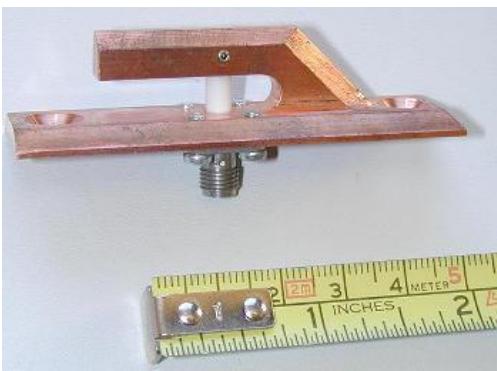
- kvartbølgeantenne ( $1/4 \lambda$ )
- båndantenne
- spalteantenne

## Kvartbølgeantenne

Den enkleste form for antennen er et kvartbølgelærelement. For S båndet vil en kvart bølgelengde tilsvare en lengde på ca 3 cm, noe som gjør at antennen blir liten og kompakt.

Eksempel:

Sendefrekvens 2279,5 MHz tilsvarer en bølgelengde på  $\lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / 2279,5 \cdot 10^6 = 0,1316\text{m} \rightarrow 1/4 \lambda = 3,3\text{ cm}$



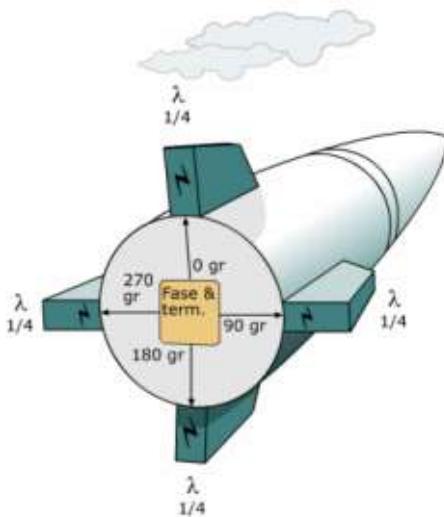
Kwartbølgeelementet kan utformes som vist til venstre. Utstikkeren vil ha en lengde på ca  $\frac{1}{4} \lambda$  fra knekken og kan tilpasses ved å file ned enden.

For å oppnå en rundstrålereffekt og sirkulær polarisasjon, er 4 quartbølge antenneelementer plassert symmetrisk rundt instrumentlastsyylinderen med  $90^\circ$  fysisk separasjon som vist i bildet til høyre.



Kwartbølgeantenne for S-bånd  
Opphavsmann: [Narom](#)

Sirkulær polarisasjon oppnår vi ved å sette inn et 180 grader faseledd mellom de to diamentrale motstående antenneledd, og koble disse to systemene sammen med et 90 grader faseledd slik som vist i figuren under. Studer også flash-animasjonen til lengst høyre på siden.



Båndantener



Nytelast med  
kwartbølgeantennene  
Opphavsmann:  
[Narom](#)

Antennesystem i nytelast  
Opphavsmann: [Narom](#)

antenneelementene består av et printmønster som blir støpt inn i et bånd, som monteres utenpå den sylinderiske delen av en instrumentlast. Aerodynamisk er denne typen ideell siden den kan monteres nesten flatt inntil sylinderoverflaten og representerer minimal luftfriksjon.

Figuren under viser den indre strukturen. 8 elementer er koblet sammen og danner en sirkulær, polarisert antenn. Kabelen fra senderen er koblet direkte til enden av elementrekken.

All impedanstilpasning er gjort i striplinerekken slik at det ikke er behov yttere faseledd slik som i det foregående eksempelet. Antennen er derfor meget enkel å tilpasse.

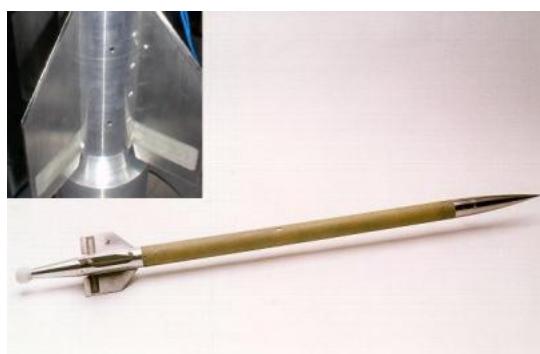
Grunnet bølgelengden er denne type antenner begrenset i frekvensområdet fra S-bånd og høyere frekvenser. Virkningsgraden er til dels avhengig av sylinderdiameteren. For S-båndet vil det være problem med virkningsgrad og strålingsdiagram med denne type antenner hvis diameteren er under ca. 10 cm. For en diameter på 30 cm eller mer kan denne typen også brukes på L-båndet. For lavere frekvenser, slik som det gamle P-båndet, kan denne typen også brukes nesten alltid quartbølge antenneelementer.



Strip-line-elementer i en båndantenne  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Spalteantenn (eng.:Slotantennas)

I små raketter som beveger seg med store hastigheter i de lavere luftlag er det av avgjørende betydning at ytre antenner har et minimum av aerodynamisk friksjon. I raketten Viper 3 - Dart er antennene integrert i finneseksjonen på "Dart" instrumentlasten. Figuren nedenfor viser Viper Dart (eng.:Dart = kastepil) med spalteantennene på finnene. Viper Dart er en miniatyr ракет som kan nå opp til ca. 100 km med bare en rakettmotor. Etter utbrenning av motoren trekkes denne av "dart"-delen som fortsetter alene. Dart-delen har nemlig et mye mindre tverrsnitt enn motordelen og gir mindre luftmotstand. Dart-delen har da fått stor bevegelsesenergi og den beskjedne luftmotstanden gjør at den kan nå store høyder.



Legg merke til at det er laget en elektrisk åpning (engelsk: slot), tilpasset bølgelengden for S-båndet, i den bakre del av hver finne. Av aerodynamiske grunner, og for å oppnå materiell styrke, er åpningen fylt med et dielektrisk lavtapsmateriale. De fire finnene danner et sirkulært polarisert antennesystem som fødes med faseledd, på samme måte som kvartbølgeantennene.

Viper Dart - finneseksjon  
Opphavsmann: FFI, Narom

## Kort innføring i modulasjon og RF-teknikk

Forfatter: Narom

[Kort innføring i modulasjon og RF-teknikk \(61819\)](#)

Labøvelsen skal gi elevene/studentene en enkel innføring i AM- og FM-modulasjonsteknikk og RF-teknikk, og bruk av diverse praktisk utstyr på lab-en.

Øvelsen er vedlagt som PDF-dokument.

# Mottakersystem

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Mottakersystem \(52300\)](#)

Mottakersystemet består av en sammenstilling av passive og aktive komponenter som gjør det mulig å motta signaler i form av modulerte elektromagnetiske bølger, og ut fra disse gjenskape de elektriske signalene slik de opprinnelig var på sendersiden før sammenpakking, modulering og sending.

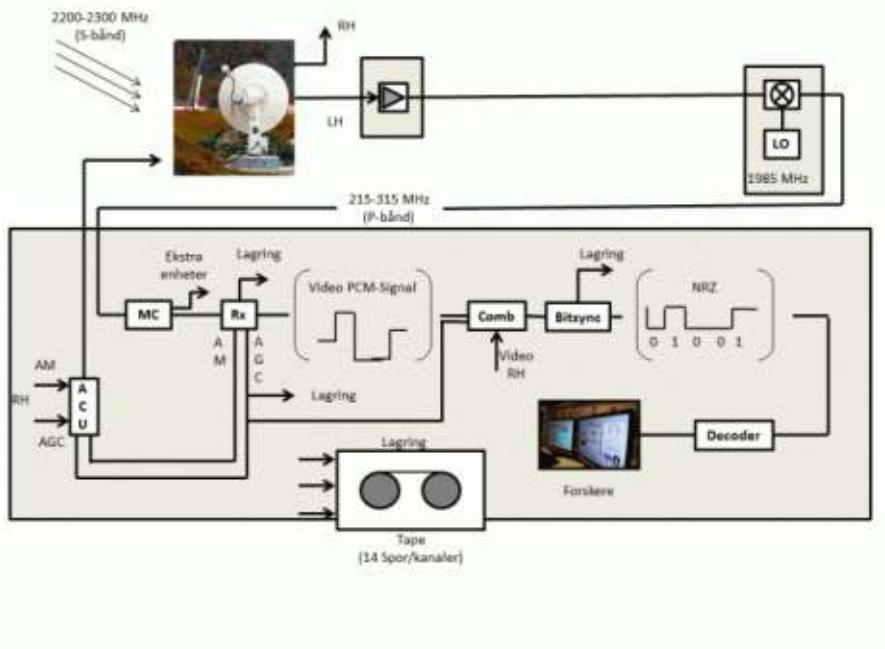
## Elementer i et mottakersystem

Et mottakersystem med målfølging vil typisk bestå av følgende elementer

- frekvensbånd
- antennen
- forsterker
- frekvensomformer
- kabler for HF
- distribusjonsforsterkere
- antennestyring med automatisk målfølging
- mottaker
- diversitetskombinering
- demodulator
- bitsynkronisering
- PCM-dekoder

De enkelte elementene blir nærmere beskrevet på sidene som følger.

Figuren under viser skisse av et typisk mottakersystem. Bare signalveien for det venstre håndsdreide signalet (LH) er vist i sin helhet.



I dette mottakersystemet brukes en frekvensomformer (eng: downconverter) som flytter frekvensen fra S-bånd til P-bånd før overføring på kabel. I andre systemer overføres signalet i S-bånd direkte til mottakere uten frekvensomformer. Du finner også en blokk kalt MC (eng: multicoupler) for aktiv splitting av signalet fra frekvensomformeren til en eller flere ekstra mottakere som ikke er vist i figuren.

Fotograf: [Stian Vik Mathisen](#)

Opphavsmann: [Narom](#)

På siden er det lenket til en beskrivelse av et reelt oppsett av en telemetristasjon ved Andøya Space Center rundt 2005. I denne beskrivelsen er ikke komponenter for antennestyring og baneberegnning tatt med, men figuren gir en grei oversikt over signalgangen og sammenkoplingen av komponenter fra antennen til lagringenheter.

# Frekvensbånd for telemetri

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Frekvensbånd for telemetri \(44496\)](#)

Valg av frekvensbånd for telemetri er en avveiing mellom flere forhold. Noen av forholdene kan trekke i forskjellige retninger og det må også tas hensyn til andre radiokommunikasjonstjenester.

Blant de forholdene vi må ta hensyn til finner vi følgende:

- Bakgrunnsstøy (kosmisk)
- Damping i atmosfæren
- Fysisk størrelse av sender- og mottakerantennene
- Muligheten for interferens med andre radiokommunikasjonstjenester

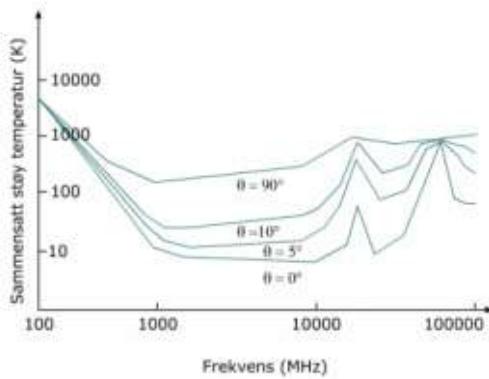
Noen av disse faktorene trekker i hver sin retning. Dampning i atmosfæren øker for eksempel ved økende frekvens, mens størrelsen på sender- og mottakerantennene øker med lavere frekvens.

I tabellen under finner du benevnelser på områder i det elektromagnetiske spektrum. De aktuelle frekvensområder for telemetri ligger i UHF og SHF området. Området i VHF båndet var tidligere i bruk, men har nå falt bort for sonderaketter og satellitter.

Betegnelse	Frekvensområde	Bølgelengdeområde
VLF (Very Low Frequency)	< 30 kHz	> 10 km
LF (Low Frequency)	30 - 300 kHz	10 km - 1 km
MF (Medium Frequency)	300 - 3000 kHz	1000 m - 100 m
HF (High Frequency)	3 - 30 MHz	100 m - 10 m
VHF (Very High Frequency)	30 - 300 MHz	10 m - 1 m
UHF (Ultra High Frequency)	300 - 3000 MHz	100 cm - 10 cm
SHF (Super High Frequency)	3 - 30 GHz	10 cm - 1 cm
EHF (Extremely High Frequency)	30 - 300 GHz	10 mm - 1 mm

Når vi holder mottaker- og senderutstyret utenfor er det to forhold som er avgjørende for signal/støy-forholdet i et samband, bakgrunnsstøy og signaldemping. For samband med satellitter og sonderaketter er kosmisk bakgrunnsstøy spesielt viktig.

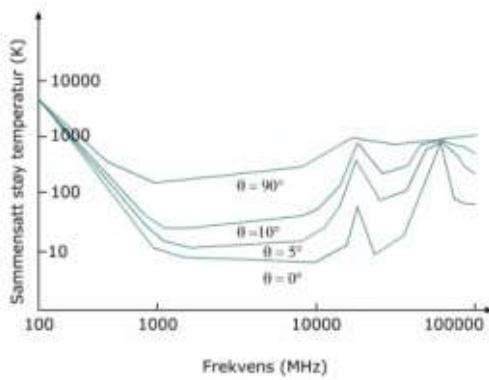
Figuren under viser kosmisk bakgrunnstøy som funksjon av frekvensen.



Kosmisk støy

Ophavsmann: [Narom](#)

Støyen er her uttrykt i form av en ekvivalent temperatur i grader Kelvin. Θ er antennevinkelen regnet fra senit, 0 grader betyr altså at antennen peker rett opp, 90 grader at den peker mot horisonten. Ved å observere vertikalt ser vi at det er et bredt minimum i støy fra ca 1 500 til ca. 10 000 MHz (1 til 10 GHz).



Kosmisk støy

Ophavsmann: [Narom](#)

Signaldempningen i atmosfæren avhenger av frekvensen på signalet og hvilke atmosfæriske forhold vi har. Dempningen i klar luft er ubetydelig for frekvenser under 7-8 GHz, men øker med høyere frekvenser. Vann i dråpeform, som tåke, skyer og regn, kan gi kraftig demping. Denne dempingen øker med økende vanninnhold og økende frekvens og kan i kraftig regn gi merkbar demping også for frekvenser under 7-8 GHz.

Frekvensbånd er en begrenset ressurs. Ukontrollert bruk ville blant annet kunne føre til interferens mellom forskjellige radiokommunikasjonstjenester. Tildeling av frekvenser til forskjellige bruksområder skjer på grunnlag av internasjonale avtaler og reguleres av internasjonale og nasjonale organer. I Norge er det Post- og teletilsynet som regulerer bruken av de forskjellige frekvensbåndene.

I tabellen under ser du en oversikt over frekvensområder for telemetri fra nyttelaster i rommet og hvilke frekvenser som normalt er aktuelle for mottak ved Andøya Space Center.

Frekvesområde GHz	Bølgelengde cm	Gammelt navn	Nytt navn	Anvendelse GHz	Anmerking
0,225 - 0,390	113,4 - 76,9	P	B	For TM 0,215 - 0,260	Utgår for rakett og satellitter
0,390 - 1,550	76,9 - 19,3	L	D	For TM 1,435 - 1,540	For raketter
1,550 - 5,20	19,3 - 5,77	S	E	For TM 2,200 - 2,300	Raketter og satellitter
5,20 - 10,9	5,77 - 2,75	X	G,H,I		For satellitter
10,9 - 36,0	2,75 - 0,834	K	I,J,K		For satellitter
36,0 - 46,0	0,834 - 0,652	Q	K,L		For satellitter
46,0 - 56,0	0,652 - 0,536	V	L		For satellitter
56,0 - 100,0	0,536 - 0,3	W	L,M		For satellitter

Gamle og nye band dekker ikke like frekvensområder. Her er tatt utgangspunkt i gamle båndbetegnelser som fortsatt er utstrakt brukt i beskrivelser av mottakere og annet utstyr. P-band er tatt med her fordi mottakere for P-band fortsatt brukes etter frekvensomformere. Til høyre på siden er det lenket til en mer komplett oversikt hos Post- og teletilsynet.

## Mottakerantennene

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Mottakerantennene \(52021\)](#)



Det er i utgangspunktet ingen forskjell på de passive delene av sender- og mottakerantennene av samme type. Alle antennene som er beskrevet som senderantennene kan også brukes som mottakerantennene og omvendt. I denne læreboken er hovedfokuset på kommunikasjon mellom rom og bakke, og siden de fysiske forutsetningene for valg av antennetype er så forskjellige faller det naturlig å beskrive noen antennetyper sammen med senderutstyr og andre sammen med mottakerutstyr.

I de følgende artiklene omtales begreper som er felles for alle antenner og oppbygging og virkemåte for forskjellige antennetyper som

- dipolantennene
  - enkel dipol
  - Yagi-antennene
- heliksantennene (spiralantennene)
- hornantennene
- parabolantennene
  - fokalantennene
  - offsetantennene
  - Cassegrain- og Gregorianske antenner

De mest aktuelle metodene for målfølging er også omtalt her siden valg av metode har direkte innvirkning på oppbygningen av antennen.

Til slutt ser vi på noen aktive komponenter som vi vanligvis ser som en integrert del av antennene.

# Mottakerantenners karakteristiske egenskaper

Forfatter: Narom

[Mottakerantenners karakteristiske egenskaper \(28085\)](#)

Forskjellige typer antenner har forskjellige egenskaper. Disse går dels på antennens mekaniske egenskaper som fysisk størrelse og styrke, vindlast og styrbarhet, og dels på deres evne til å ta i mot ønskede signaler og undertrykke uønskede signaler – karakteristiske egenskaper.

Utrykk som brukes for å beskrive antenners karakteristiske egenskaper

- antennevinning
- direktivitet
- polarisasjon
- effektivt areal
- impedans

## Antennevinning

Antennevinning (gain) er et mål for antennens forsterking av signalet i mottakerretningen, sammenliknet med en referanseantenne. Ofte er referanseantennen en tenkt punktformet antenn, kalt en isotropisk antenn, som tar i mot signaler like godt fra alle retninger. Bruker vi en isotropisk antenn som referanse oppgir vi antennevinningen i dB<sub>i</sub>.

Vi kan beregne antennevinning med følgende formel:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

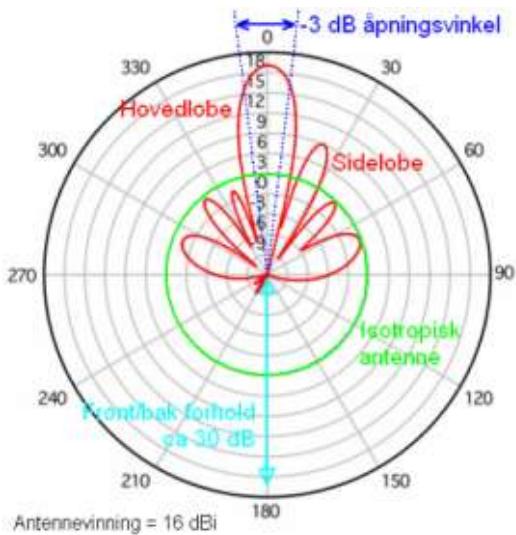
Hvor \$A\_e\$ er antennens effektive areal, og \$\lambda\$ er bølgelengden i meter.

Om vi setter  $\frac{c}{f}$  inn for  $\lambda$ , hvor \$c\$ er lyshastigheten i m/s og \$f\$ er frekvensen i Hz, kan vi omskrive formelen for antennevinning:

$$G = \frac{4\pi A_e c^2}{f^2}$$

## Direktivitet

Direktivitet (retningsvirkning) angir hvor godt en antenn skiller ut signaler fra en bestemt retning. Vi beskriver gjerne antennens direktivitet med strålediagrammer. Et viktig mål for å beskrive antennens direktivitet er antennens åpningsvinkler (også kalt strålebredde). Et fullstendig bilde av antennens direktivitet får vi bare med å se på et tredimensjonalt strålediagram, men som oftest ser vi bare på ett snitt i horisontalplanet og ett i vertikalplanet og oppgir åpningsvinkler i disse planene.



I dette todimensjonale diagrammet vises strålingsmønstret i horisontalplanet for en antenn. Skalaen er i dBi. Vi har både positive og negative verdier og kan lese ut antennevinning direkte fra diagrammet.

I andre diagrammer brukes maksimal antennevinning som nullreferanse og vi har bare negative verdier i diagrammet. Da kan vi ikke finne antennevinning direkte fra diagrammet, men må kjenne denne.

Åpningsvinkelen som er markert med blått kalles også halveffekt-åpningsvinkel.

Den grønne ringen som er lagt på ved 0 dB i diagrammet representerer strålingsmønstret for referanseantennen.

Front/bak-forholdet sier noe om hvor mye antennen demper signaler rett bakfra og er en verdi vi ofte finner i tekniske data for antenner.

## Polarisasjon

Elektromagnetiske bølger kan ha forskjellig polarisasjon, det vil si i hvilket plan bølgene svinger. Antennener må konstrueres for den polarisasjonen vi ønsker å motta.

## Effektivt areal

En antennens effektivt areal er et mål for antennens evne til å absorbere energien i de elektromagnetiske bølgene som treffer antennen og overføre den til antennekabelen som elektrisk strøm. Vi finner det effektive arealet ved å multiplisere arealet av antennens maksimale fysiske stråleåpning (apertur) mot bølgefronten med en virkningsgrad  $\eta_{ap}$  som angir hvor effektivt dette arealet utnyttes. Vanlige verdier for  $\eta_{ap}$  er mellom 0,45 og 0,65.

Om vi ser på en parabolantenne kan det effektive arealet reduseres av blant annet skyggen fra fødeelementet, ujevnhet i speilets overflate, høy strålevinkel inn mot fødeelementet og ohmsk oppvarming av antenneelementet.

## Impedans

Antenner har en karakteristisk impedans. For effektiv overføring av energi fra antennen til mottakeren må tilkoplingene til antennen være impedanstilpasset.

## Beregninger på sirkulær parabolantenne

Skal vi beregne antennevinningen til en antenn må vi kjenne det effektive arealet. En sirkulær parabols fysiske areal mot bølgefronten er gitt ved:

$$\$\$A_{\{p\}}=\pi r^{\{2\}}=\frac{\pi D^{\{2\}}}{4}\$\$$$

Hvor  $r$  er parabolens radius og  $D$  er parabolens diameter.

Effektivt areal  $A_e=\eta_{ap}A_p$  For parabolens kan vi altså regne:

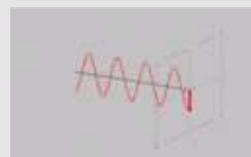
$$\$\$A_e=\eta_{ap}\frac{\pi D^{\{2\}}}{4}\$\$$$

## Polarisasjon



Horisontal polarisasjon  
Opphavsmann: [Narom](#)

Horisontal polarisasjon



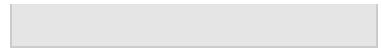
Vertikal polarisasjon  
Opphavsmann: [Narom](#)  
Vertikal polarisasjon



LH Sirkulær polarisasjon  
Opphavsmann: [Narom](#)  
Figurene viser eksempler på forskjellige typer polarisasjon.

Innsatt i formelen for antennevinning får vi:

$$G = \frac{4\pi \eta_{ap} \rho D^2}{\lambda^4} = \eta_{ap} \left( \frac{\rho D}{\lambda} \right)^2$$



# Antennetyper

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Antennetyper \(51088\)](#)



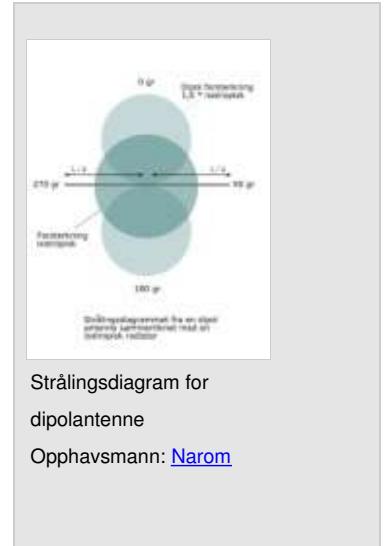
Forskjellige typer antenner har forskjellige egenskaper, både elektriske og mekaniske. I denne artikkelen ser vi på forskjellige typer antenners oppbygging, virkemåte og viktigste egenskaper.

## Enkel dipolantenne

Den enkleste form for antennen består av en dipol. Den består av en leder som er en halv bølgelengde. Ved å dele den opp i to kvartbølgelengder danner den en halvbølgeradiator som kan føres symmetrisk i møtepunktet mellom de to kvartbølgeseksjonene. Polarisasjonen er lineær og parallel med antenneelementene, det vil si at den elektriske feltvektoren er parallel med antenneelementet.

En halvbølgeradiator har et 8-tallformet polardiagram med en forsterkning i forhold til en isotropisk antennen som vist i figuren.

Vi ser at halvbølgedipolen har et strålingsdiagram som har to maksima ved 0 og 180 grader, og to minima på 90 og 270 grader. Front/bak-forholdet til antennen er lik 1, eller 0 dB om vi oppgir forholdet i dB. Vi ser også at åpningsvinkelen er stor. Vinningen i forhold til en isotropisk antennen er moderat, mindre enn 2 dBi.



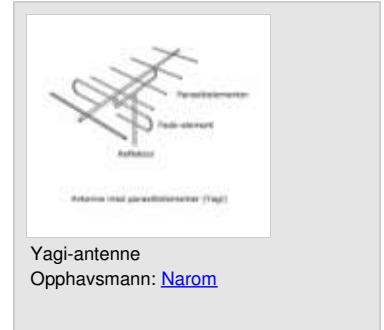
## Dipolantenne med parasitelementer

For å bedre retningsvirkningen til en dipolantenne monteres det ofte ekstra passive elementer, også kalt parasitelementer, på antennen. Den vanligste typen antennen med parasitelementer er Yagi-antennen.

En Yagi-antenne med 6 elementer sees i figuren. De kortere elementene foran fødeelementet kalles også direkторer. Retningsvirkning og antennevinning øker med økende antall elementer, men det samme gjør også vindlast.

Teoretisk maksimal vinning kan som en tommelfingerregel regnes ut ved å multiplisere antall elementer med vinningen til fødeelementet. En antennen som den i figuren har altså en vinning på omtrent  $1,6 \times 6 = 9,6 \text{ ggr.} = 9,8 \text{ dB}$ .

Ytterligere bedring av retningsvirkning i henholdsvis vertikal- og horisontalplanet kan oppnås ved å montere to Yagi-antennene over eller ved siden av hverandre.



## Sirkulær polarisasjon med kyssede dipoler

Det er ofte ønskelig med sirkulær polarisasjon. Det kan vi oppnå med å sammenkople to dipoler vinkelrett på hverandre og med en kvart bølgelengdes forskyvning, sett i stråleretningen, mellom signalene fra hver av dipolene. Forskyvningen kan vi oppnå ved å forskyve dipolene fysisk i forhold til hverandre eller ved å mate den ene dipolen med  $90^\circ$  forsinkelse i forhold til den andre. Den siste metoden kan gjøres mer kompakt og gjør skifte av dreiretning på polarisasjonen enkelt. Metoden er mye brukt i systemer for mating av parabolantennene.

På siden finner du også lenker til animasjoner som viser begge metodene. Når du studerer animasjonen av antennen med forskjøvne dipoler er det viktig å huske på at de spenningsmaksima som er markert skjer samtidig i tid om du ser antenna rett fra siden. Dreiningen observeres i stråleretningen og kommer av at utbredelseshastigheten bare er lik lyshastigheten og ikke er uendelig.

### Heliksantenne

En antennetype som gir sirkulær polarisasjon direkte er heliksantennen, eller spiralantennen som den også kalles. For å oppnå ønsket retningsvirkning er det viktig at spiralen er riktig utformet. Et for eksempel lengden på en vinding lik bølgelengden vil antennen stråle rett ut til siden, men om vi lager spiralen slik at lengden på hver vinding  $l = \lambda + a$ , hvor  $a$  er stigningen for hver vinding, vil antennen stråle rett forover.

En typisk verdi for  $a$  er  $\lambda / 4$  som gir  $l = 5\lambda / 4$  som i figuren. Antennevinningen øker med lengden på spiralen og en antennen med åtte vindinger som på bildet under vil ha en vinning på omtrent 13 dBi.



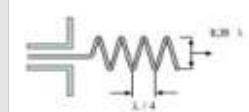
Heliksantenne på Andøya  
Opphavsmann: [Narom](#)



$l = \lambda + a$

Heliks fig. 1  
Opphavsmann: [Narom](#)



1.14

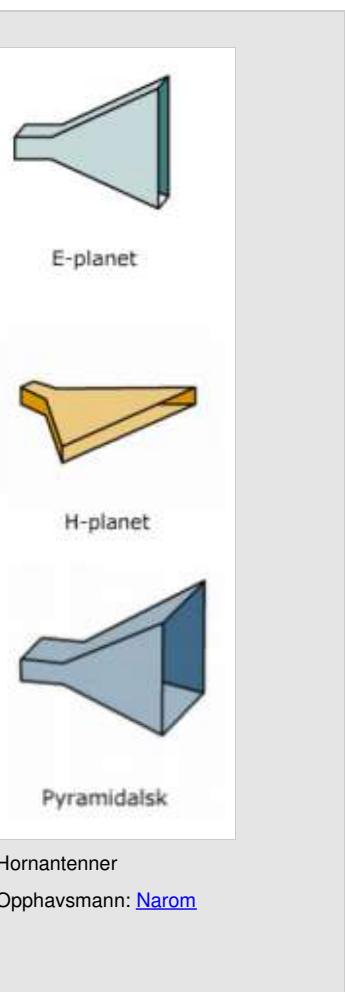
Heliks fig. 2  
Opphavsmann: [Narom](#)

### Hornantenne

Hornantennen er en utvikling fra transmisjonsledere av bølgeledertypen. Antennen brukes som middels forsterknings mikrobølgeantennen eller som fødeelementer i større retningsvirkende antenner. Figuren viser forskjellige typer antennehorn. På bildet under ser du en hornantenne i tilknytning til NAROMs studenttelemetristasjon.



Hornantenne på Andøya  
Opphavsmann: [Narom](#)



## Parabolantenne

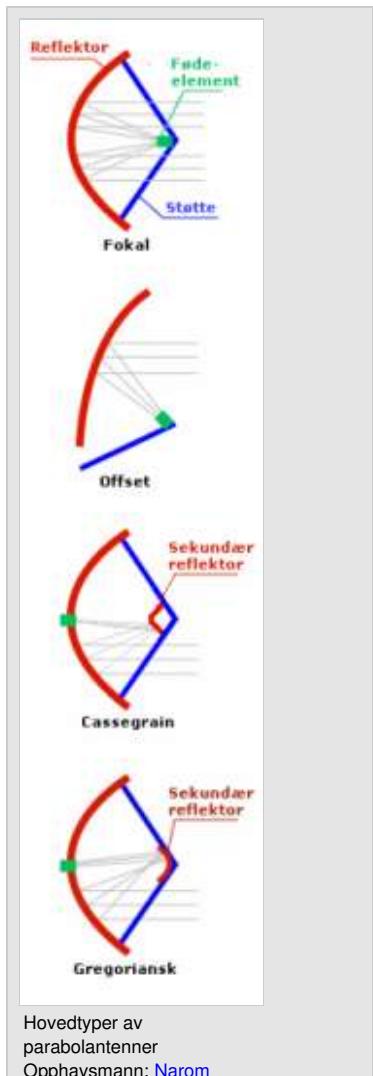
Parabolantener har en reflektor utformet som en rotasjonsparaboloide. Figuren viser forskjellige typer parabolantener. For alle fire typene kan vi ha dipolmating eller hornmating. Fokalantennen og Offsetantennen har fødeelementet plassert i paraboloidens brennpunkt. Cassegrain- og Gregorianske antenner har en sekundær reflektor, henholdsvis bak eller foran brennpunktet. Dette gjør det mulig å plassere fødeelementet mer beskyttet. Også offsetantenner kan ha mating med sekundær reflektor, uten at dette er tatt med i figuren.

Parabolantener har god retningsvirkning og høy vinning, økende med økende reflektoreareal. Store styrbare parabolantener har gjerne så liten åpningsvinkel at det koaksialt med hovedantenna er plassert en mindre antenn med større åpningsvinkel som hjelp for målfinning (engelsk: acquisition).

Antenna avbildet i ingressen øverst på siden er en fokalantenne med dipolmating. Reflektoren er et gitter, ikke en glatt flate som er mest vanlig. Dette reduserer vind- og snølast, men reduserer også virkningsgraden noe. Ser du nøyere på matelementet står det fire antennehorn som er rettet ut av antennen, ikke inn mot reflektoren. Dette er en egen målfinningsantenne med åpningsvinkel på omrent 30°.

Store parabolantener er i vårt barske klima vanligvis plassert inne i en beskyttende radom. Du kan skimte en slik radom helt ute til venstre på bildet av heliksantennen lengre opp på siden.

Antenna under er en mobil fokalantenne, her avbildet på Svalbard. Målfinningsantenna sees som en "utvekst" ved siden av reflektoren.





Mobil telemetriantenne  
Opphavsmann: [Andøya Space Center](#)

# Automatisk målfølging

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Automatisk målfølging \(51226\)](#)



For mottak av telemetrisignaler fra raketnyttelaster og satellitter brukes antenner med stor retningsvirkning. Dette betyr at antennen må rettes mest mulig direkte mot senderen, en sender som kan bevege seg med stor vinkelhastighet i forhold til mottakerantenna. Dette gjør det nødvendig med presis styring av antenna.

## Metoder for målfølging og antennestyring

Det er fire hovedmetoder for automatisk antennestyring

- monopuls
- konisk avsøking
- antenna styrt av et forhåndsberegnet baneprogram
- antenna slavet til en annen antennе

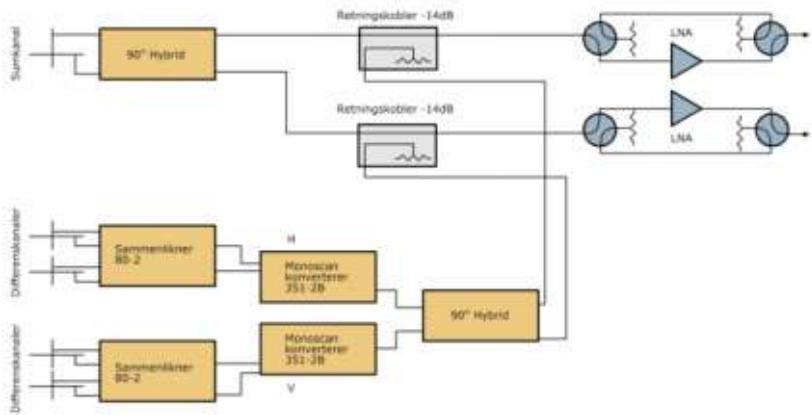
Monopuls og konisk avsøking er metoder som baserer seg på mottatt signal fra senderen og gjør det mulig for antennen med antennekontrollenhet selvstendig å spore en bevegelig sender, også om den ikke følger en forventet bane. Disse to metodene skal vi se på mer i detalj.

Styring med forhåndsberegnet baneprogram har størst anvendelse for mottak av signaler fra satellitter. For rakter bruker forhåndsberegnet bane hovedsaklig som støtte for å finne målet om antennen har mistet signalet fra senderen, og ikke som eneste metode.

Slaving til annen antennе betyr at minst en av antennene sporer raketten med en annen metode, som monopuls eller konisk avsøking. Ofte vil alle antennene som følger en nyttelast være i stand til selvstendig å spore nyttelasten, men om en antennе mister sporing vil slaving rette den mot målet igjen. Som et supplement til de fire hovedmetodene kan antennene også slaves til radar eller optisk sikte. Optisk sikte er selvsagt bare aktuelt for den aller første delen av flukten.

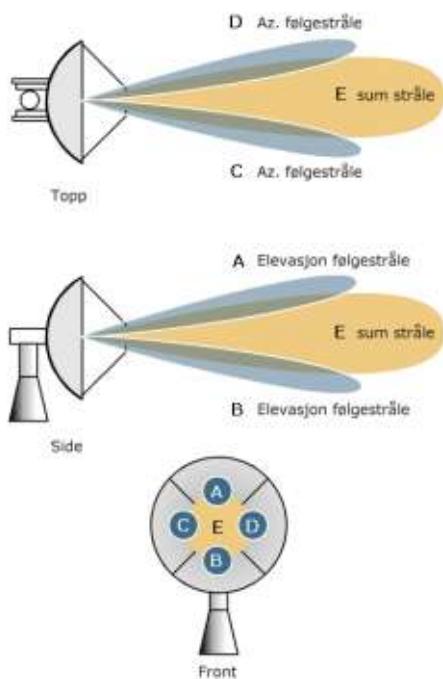
## Monopuls

Antennesystemet genererer fem stråler, eller lober, som vist i figuren under. I kretseksemplet, som er hentet fra 10-fot antennen ved Andøya Space Center, er det et eget fødeelement i senter som gir et viktig bidrag til sumstrålen. Denne har altså fem fødeelementer totalt. (Skjemaet viser også faseforsinkende ledd som gjør det mulig å ta i mot både venstrehandsdreid og høyrehandsdreid polarisasjon) I andre antennene kan det være fire fødeelementer og sumstrålen fremkommer bare som summen av disse. Ved å sammenlikne signalet som mottas i de forskjellige elementene kan det beregnes om senderen ligger til side for pekeretningen til antennen.



Elektrisk sammenkobling av deldipolene.

Sammenkopling av dipoler  
Opphavsmann: [Narom](#)



Monopuls målfølging, detalj.

Monopuls målfølging  
Opphavsmann: [Narom](#)

Svært forenklet kan vi skissere prinsippet for monopuls med noen enkle likninger. For denne forenklede fremstillingen behøver vi ikke bry oss om hva som er kilden til sumstrålen. Vi ser bare på elevasjon siden prinsippet for azimut er identisk. Bokstavene i likningene refererer til figuren over.

$$(A - B) + E = E \text{ når antennen peker rett på senderen } (A = B)$$

$$(A - B) + E > E \text{ når antennen peker lavere enn senderen } (A > B)$$

$$(A - B) + E < E \text{ når antennen peker høyere enn senderen } (A < B)$$

## Konisk avsøking

Konisk avsøking (engelsk: Conical Scan) bruker et enkelt fødeelement som roterer mekanisk rundt fokuspunktet i parabolen. Resultatet blir en hovedstråle med konisk avsøkingsvinkel. Prinsippet er illustrert i animasjonen det er lenket til i lenkesamlingen. På bildet ser du en antennen med konisk avsøking. I venstre kant av hovedreflektoren sitter en målfinningsantenne med monopol puls avsøking. Denne kan ikke direkte sammenliknes med et fødeelement for en stor reflektor, men gir et inntrykk av forskjellen i typisk diameter på de to avsøkingssystemene.



## Fordeler og ulemper

Sammenlikner vi konisk avsøking med monopol puls vil vi se fordeler og ulemper med begge metodene. Signalmessig vil monopol puls på grunn av mer kompleks signalbehandling gi et større støybidrag enn konisk avsøking. Det stilles også store krav til faselinearitet mellom de forskjellige delene.

På den annen side vil senderen alltid ligge litt utenfor senter av hovedstrålen til en antennen med konisk avsøking når senteraksen til antennen følger senderen.

Mekanisk ser vi at monopolssystemet ikke har noen bevegelige deler som kan slites, men er samtidig langt mer komplisert og tar større plass.

Monopol tillater svært mye høyere avsøkingshastighet enn konisk avsøking, men maksimal vinkelhastighet til objektet som skal følges begrenser hvor hurtig avsøking det i praksis er behov for. Synkende priser og stadig bedre kvalitet på elektroniske kretser har lenge favorisert monopolssystemer. De aller siste årene har utviklingen av lettere og sterkere materialer igjen gjort konisk avsøking mer konkurransedyktig.

Mobil telemetriantenne  
Opphavsmann: [Andøya Space Center](#)

## Fra fødeelement til mottaker

Forfatter: Rolf Lien, Narom

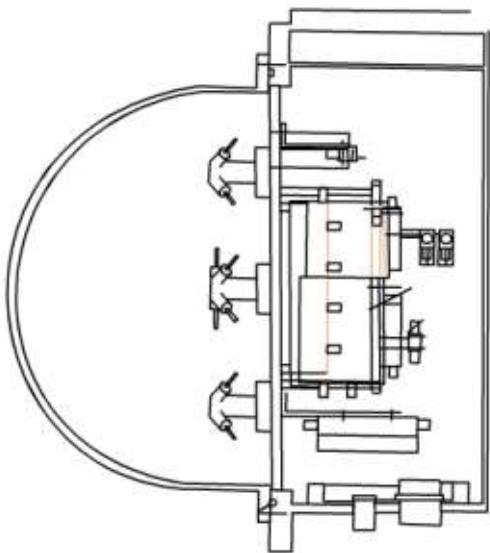
[Fra fødeelement til mottaker \(54056\)](#)

Vi kan tenke på en antennen med høy vinning som en ideell HF-forsterker. Det er den eneste måten å forsterke et HF-signal som forbedrer signal/støyforholdet i stedet for å forverre det. Dessverre gir selve antennen sjeldent ut kraftig nok signal til at vi kan overføre det til mottakere uten ytterligere forsterking. Vi må derfor bruke forsterkere mellom antennen og mottakeren. Ofte, spesielt om det er stor avstand mellom antennen og mottakeren, vil vi også bruke frekvensomformere i antennen som flytter den mottatte frekvensen ned til et område hvor kabeltapet ikke blir for stort.

Forsterkere og frekvensomformer er formelt sett de første aktive trinnene i signalveien etter antennen. Vi omtaler dem likevel her siden forsterkeren nesten alltid er en integrert del av antennen, og om frekvensomformere brukes plasseres også disse så tett etter forsterkeren som praktisk mulig.

### Forsterker

Forsterkeren, ofte bare kalt LNA (fra engelsk: Low Noise Amplifier), plasseres nærmest mulig fødeelementene for ikke å forsterke opp støy introdusert av andre komponenter. Siden forsterkeren står lengst frem i signalveien er det også svært viktig at denne i seg selv tilfører systemet minst mulig støy. Det stilles store krav til komponentene, og i antenner for mottak av svake signaler kan forsterkere også være nedkjølt.



Detalj av fødeantennen og forsterkerenhet  
i 10'-parabolen på ARS.

Figuren viser detalj av fødeantennen og forsterkerenhet i 10-fot parabolantenne i bruk ved Andøya Space Center. Diameteren på kupullen til venstre er ca. 30 cm. Avstanden mellom elementene og forsterkeren er minimal og sammenkoplingen er gjort med spesialkabler hvor skjermen er et helt og stift copperrør (engelsk: hardline).  
NAROM  
Opphavsmann: [Narom](#)

Frekvensomformere (engelsk: downconverter) flytter frekvensen til det mottatte signalet ned til et lavere frekvensbånd. Vanligvis gjøres dette for å redusere kabeltapet når antennen står et stykke fra mottakeren, men er også aktuelt for å kunne bruke mottakere for ett frekvensbånd sammen med to eller flere antenner for forskjellige frekvensbånd. I 10-fot antennen som brukes ved Andøya Space Center brukes en frekvensomformer som flytter frekvensen ned fra mottatt S-band til P-band før overføring inn til telemetristasjon.

For relativt korte kabelstrekker oppnår vi bedre støytall for systemet om vi bruker spesialkabler med lavt tap og unngår frekvensomformere. Ulempen med slike kabler er at de kan være vanskelige å håndtere på grunn av tykkelse og stivhet. For virkelig lange strekk, noen hundre meter og opp til flere km, fra antennen til mottakere brukes optisk fiber og frekvensomformere erstattes med optoelektronikk.

## **Simulering av satellittbaner ved bruk av STK**

Forfatter: Narom

[Simulering av satellittbaner ved bruk av STK \(61829\)](#)

Målet med øvelsen er å få en innføring i programvaren Satellite Tool Kit, og hvordan dette kan brukes for å simulere hvordan satellitter beveger seg generelt, og i forhold til mottakerstasjonen på Andøya Space Center (ASC). Programmet skal også benyttes for å ta ut pekevinkellister for mottakerantennene på ASC, som senere kan brukes for å tracke (følge) satellittene.

Øvelsen er vedlagt som PDF-dokument.

## Følging av satellitter med monopolst målfølgend..

Forfatter: Narom

[Følging av satellitter med monopolst målfølgende antenne \(61827\)](#)

Målet med øvelsen er å lære mer om satellittbaner og erfare hvordan utstyret på Andøya Space Center kan brukes til å motta signaler fra og følge satellitter, med utgangspunkt i forhåndsberegnehede baner.

Øvelsen er vedlagt som et PDF-dokument. (Engelsk!)

## Mottakeren

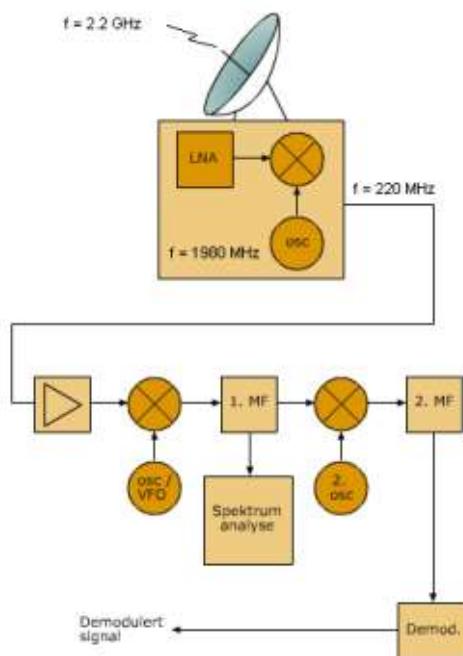
Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Mottakeren \(55486\)](#)



I antennen og videre frem til mottakeren har vi behandlet alle signaler innenfor et bredt frekvensbånd likt. Informasjonen som ble sendt ut fra senderen ligger innenfor et smalt frekvensområde i dette båndet. Frekvenser utenom dette smale frekvensbåndet inneholder ikke informasjon som er nyttig for oss. I mottakeren skiller vi ut og forsterker signaler innenfor det smale frekvensområdet som inneholder nytteinformasjon, og undertrykker signaler som ligger lavere eller høyere i frekvens.

Telemetrimottakere, som alle moderne radiomottakere, bruker superheterodynprinsippet. De har altså en lokaloscillator og et blandetrinn som konverterer det mottatte signalet ned til en fast mellomfrekvens, forkortet MF eller IF (fra engelsk: Intermediate Frequency). Den effektive båndbredden til mottakeren, og dermed dens frekvensselektivitet, bestemmes i MF-trinnet eller i det siste MF-trinnet om vi har flere mellomfrekvenser i mottakeren. To MF-trinn er det vanligste i telemetrimottakere og det er en slik mottaker du ser blokkskjemaet til i figuren under. Mer om superheterodynprinsippet og fordelene med å gjøre den endelige seleksjonen på et signal med fast bærebølgefrekvens lærer du mer om i faget Elektronikk og kommunikasjonsteknologi. Det ligger også en lenke til en Wikipedia-artikkel på denne siden.



Prinsipp for telemetrimottaker.

I figuren er også LNA og frekvensomformer i antennen tatt med. Prinsipp for telemetrimottaker

Opphavsmann: [Narom](#)

Om vi går gjennom mottakeren i figuren over fra inngang til utgang har vi følgende trinn

- forforsterker – som er bredbåndig
- første blandetrinn – hvor signalet fra forforsterkeren blandes med en stillbar frekvens fra første lokaloscillator
- spenningsstyrт lokaloscillator – som gir oss mulighet for å velge senterfrekvensen på signalet vi vil motta
- første MF-trinn – som innsnevrer båndbredden og hvor vi henter ut signal til en eventuell spektrumsanalysator
- spektrumsanalysator – eller bare signaluttak til ekstern spektrumsanalysator
- andre blandetrinn – hvor signalet blandes ned til andre mellomfrekvens
- andre lokaloscillator – gir en fast nedblandingsfrekvens til andre blandetrinn
- andre MF-trinn – hvor endelig båndbreddebegrensning og seleksjon gjøres
- demodulator – hvor nyttesignalet gjenvinnes fra den modulerte bærebølgen

En funksjon som ikke er tatt med på figuren er AM-detektor for AGC og eventuell sporingsinformasjon fra målfølgende antennen.

Mens alle de andre delene av mottakeren er uavhengig av modulasjonsform må demodulatoren være tilpasset den typen modulasjon som er brukt. I eldre mottakere hadde man ofte utbytbare demodulatormoduler. Moderne mottakere har multimodus demodulatorer innebygget. For eksempel har mottakeren på bildet i ingressen demodulator for FM, PM, BPSK og QPSK.

Modulasjon kan du lese mer om i en egen artikkel.

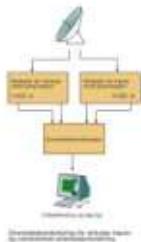
Når du skal stille inn en telemetrimottaker er det flere egenskaper ved signalet fra senderen du bør kjenne

- frekvensen til bærebølgen
- modulasjonstype og deviasjon
- båndbredden til det modulerende signalet

Ut fra kjennskap til disse parametrerne stiller du inn RF-frekvens, RF-filter, MF-båndbredde, videobåndbredde og velger demodulator slik det beskrives i dokumentasjonen til den spesifikke mottakeren du bruker.

# Diversitetskombinering

Forfatter: Rolf Lien, Narom  
[Diversitetskombinering \(55020\)](#)

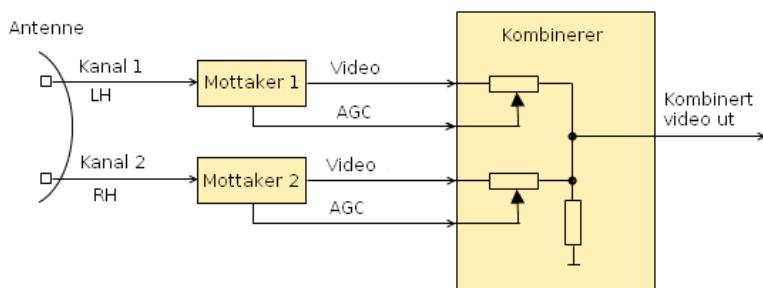


Signaler fra en instrumentlast har alltid en definert polarisasjon. Vanligvis vil den være sirkulært polarisert med høyre eller venstre dreieretning. På mottakersiden er det ikke fullt så enkelt. Siden en rakett ofte har en mer eller mindre uforutsett orientering er det viktig at mottakersystemet kan håndtere flere polarisasjonsretninger samtidig. En løsning på dette problemet er et mottakersystem med polarisasjonsdiversitet. Dette innebærer diversitetskombinering (eng: Diversity Combining).

Diversitet kan brukes aktivt som metode for å sikre uavbrutt kommunikasjon under varierende forhold. Da sendes den samme informasjonen over to eller flere samtidige kommunikasjonskanaler med forskjellige karakteristiske egenskaper. Ved mottak kombineres kanalene i sanntid slik signalet fra den kanalen som til enhver tid har best overføringskvalitet velges for videre behandling.

På mottakersiden kan teknikken også brukes for å sikre best mulig mottak av en enkelt kommunikasjonskanal med varierende karakteristiske egenskaper. Et eksempel på dette er vekslende polarisasjon på grunn av vekslende orientering av nyttelasten.

Systemer som benytter diversitetskombinering krever bruk av flere forsterkere og mottakere, en for hver kanal som skal kombineres. Selv kombineringen kan gjøres på det demodulerte signalet, såkalt post-detektor kombinering, eller på IF, såkalt pre-detektor kombinering. Pre-detektor kombinering er langt mer komplisert og derfor dyrere enn post-detektor kombinering, men kan brukes på flere modulasjonstyper og gir under de fleste forhold bedre signalkvalitet.



Post-detektor kombinering  
Opphavsmann: [Rolf Lien, Narom](#)

Figuren viser en prinsippskisse av et system med post-detektor diversitetskombinering. AGC-nivået fra mottakerne brukes til å vekte hvor stort bidrag hver mottaker skal gi til det kombinerte videosignalet.

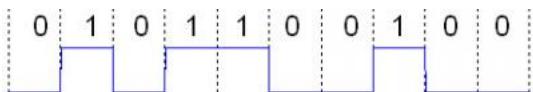
# Bitsynkronisering

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Bitsynkronisering \(55592\)](#)

Det digitale signalet vi får ut fra demodulatoren er ofte utsatt for støy og forvrengning. Bitsynkronisatorens oppgave er å gjenskape den opprinnelige PCM-bitstrømmen, samt rekonstruere klokkepulsene for senere bruk i PCM-dekoding. Det finnes mange typer PCM-koder med forskjellige egenskaper, og hvilken type kode som er brukt er viktig å kjenne til for å kunne rekonstruere bitstrømmen og klokkepulsene med minst mulig feil.

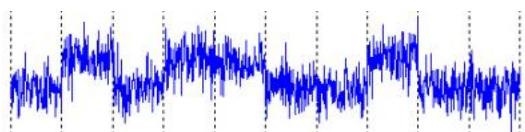
Et bitmønster som så ut som i figuren under før modulering i senderen



Original kode

Opphavsmann: [El pak \(Wikimedia Commons\)](#)

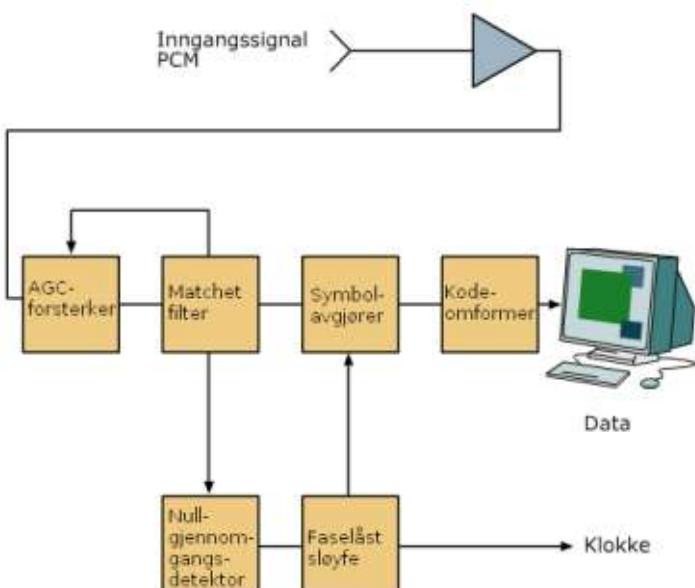
kan se ut som i figuren under når den samme sekvensen er demodulert på mottakersiden



Mottatt kode

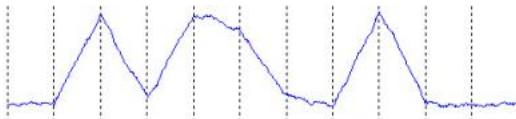
Opphavsmann: [El pak \(Wikimedia Commons\)](#)

Et slikt signal med mye støy kan være det som blir koplet inn på bitsynkronisatoren som du ser prinsippskisse av i figuren under.



Prinsipp, bitsynkronisator.

Det første trinnet er en AGC-forsterker som sikrer at signalet har tilstrekkelig nivå for prosesseringen videre, ikke minst tersklingen i symbolavgjøreren. Deretter filtreres signalet i et [matched filter](#), et avansert båndpassfilter som er optimalisert for best mulig signal/støy-forhold. Ut fra filtret kan signalet typisk se ut som i figuren under.



Matched filter

Opphavsmann: [El pak \(Wikimedia Commons\)](#)

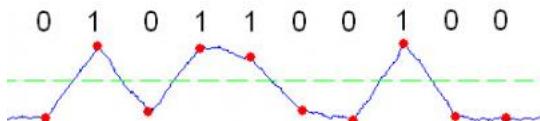
Det filtrerte signalet sendes både til symbolavgjøreren og til en nullgjennomgangsdetektor. Signaler fra nullgjennomgangsdetektoren brukes som referanse for en faselåst sløyfe som gir ut regenerert klokkepuls til symbolavgjøreren og til ekstern bruk.



Regenerert klokkepuls

Opphavsmann: [Rolf Lien, Narom](#)

I symbolavgjøreren brukes klokkepulsene i forbindelse med punktprøving av det filtrerte signalet. Verdiene fra punktprøvingen sammenliknes med en gitt terskelverdi. Alle verdier over terskelverdien gis binær verdi 1 og alle under gis binær verdi 0. I figuren under er terskelverdien tegnet inn som en grønn stiplet linje.

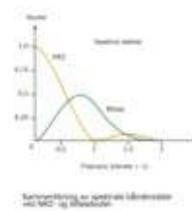


Symbolavgjøring

Opphavsmann: [El pak \(Wikimedia Commons\)](#)

Det siste trinnet i skissen av bitsynkronisatoren er kodeomformeren. Det er ikke alltid vi kan eller ønsker å bruke samme kode til videre dekoding og lagring som den som ble valgt på sendersiden. NRZ-koder, som har klare fordeler sammenliknet med bifasekoder ved sending, er for eksempel ikke egnet for lagring på tape på grunn av mediets manglende likestrømsrespons, og vi må omforme til annen kode før slik lagring.

Figuren viser spektral tetthet for NRZ- og bifasekoder. Frekvensen langs x-aksen er referert til bitraten, og vi ser at bifasekoding krever dobbelt så stor båndbredde som NRZ-koding ved samme bitrate. Mer om forskjellige PCM-koder og deres fordeler og ulemper kan du lese om i en egen artikkel. Du finner lenker til denne og til en oversikt over forskjellige måter å kode den binære sekvensen 0001110110010110 i lenkesamlingen.



Spektral båndbredde for  
PCM-koder  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Dekoding

Forfatter: Rolf Lien, Narom

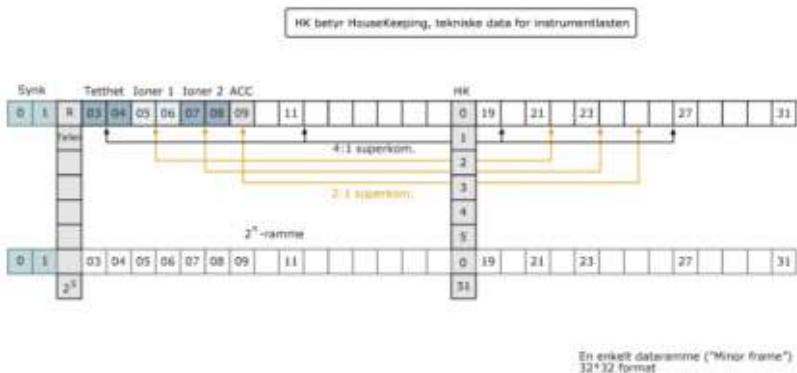
[Dekoding \(57268\)](#)

PCM-dekoding er grunnleggende sett en form for demultiplexing. På sendersiden ble informasjonen fra forskjellige sensorer tidsmultiplekset sammen til en enkelt datastrøm. På mottakersiden må vi fra den mottatte datastrømmen skille ut de sekvensene som representerer de forskjellige sensorene.

## Synkronisering

Det er i hovedsak egenskaper ved nyttelasten, slik som antallet sensorer og deres oppløsning og nødvendige oppdateringsrate, som bestemmer oppbygningen av PCM-formatet. Utfordringen på mottakersiden er i første rekke å identifisere hvilke bit i datastrømmen som representerer hvilken sensor. Det betyr at vi må kjenne oppbygningen av formatet til minste detalj, og ikke minst må vi kunne finne starten på hver ramme. For å gjøre dette mulig inneholder formatet noe overhead, informasjon som er nødvendig for rammesynkronisering og ramme- og formatidentifikasjon. For rammesynkronisering settes det inn en synkroniseringskode i starten av hver ramme, mens en rammeteller gir hver ramme unik id innenfor ett format. Formattelleren gir hvert format sin unike id.

Synkroniseringskoden må velges slik at det er minst mulig risiko for at et tilsvarende bitmønster skal oppstre ellers i ramma. I lenkesamlingen finner du lenke til eksempler på rammesynkroniseringskoder. Under ser du eksempel på et format med 32 rammer med 32 8-bits ord i ramma.



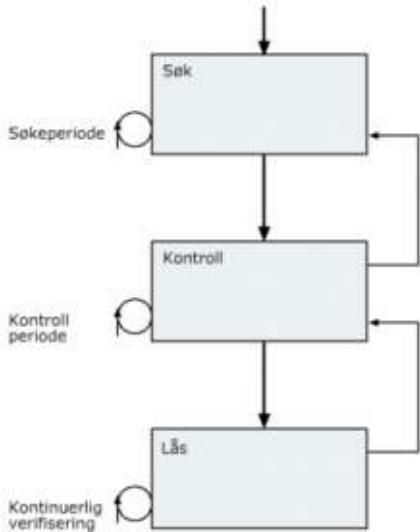
PCM-format tatt fra PCM-eksempel i kapittel Senderside.

PCM-format

Opphavsmann: [Narom](#)

Du ser at rammesynkroniseringsordet er bare 16 bit for å begrense overheaden i formatet, men dette anses tilstrekkelig for å unngå feilsynkronisering av betydning. Rammetelleren som gir unik id til ramma innenfor ett format ligger her i ord 02. Formattelleren er ikke vist i denne figuren, men i eksemplet i artikkelen om planlegging av PCM-format, som denne figuren er basert på, lå den i ordene 16 og 17.

Selve rammesynkroniseringen skjer i tre stadier, søk, kontroll og løsing som vist i figuren til venstre.



I søkerstadiet søkes det etter et bitmønster som passer med den oppgitte rammesynkroniseringskoden og i kontrollfasen kontrolleres det at dette bitmønstret repeteres med nøyaktig en rammelengdes avstand. Etter kontrollen vellykket går vi over i låsestadiet, men med kontinuerlig verifisering.

Søk etter synkroniseringskode er vist i animasjonen under. Signalet blir sendt inn i et langt skifteredister. Innholdet i dette registeret blir bit for bit sammenliknet med det korrekte bitmønsteret programmert inn i registret kalt permanent register i animasjonen. Ved treff registreres dette i summeringskretsen til en presatt korrelator-summeringskrets, merket  $\Sigma$ . Nivået i korrelatoren kan settes slik at det kreves flere treff før rett synkronisering kan aksepteres.



De tre rammesynkroniseringsstadiene.

### Rammesynkronisering / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/53525>

NAROM  
Opphavsmann: [Narom](#)

### Pakkeleimetri

Mer avanserte systemer, spesielt i forbindelse med satellitter, benytter pakkeleimetri.

Dette innebærer at data sendes ned som selvstendige datapakker som blir kontrollert ved mottakelsen.

Ett eksempel på en datapakke, MIL-STD 1553, er vist i figuren til høyre. Som navnet antyder var denne utviklet som en militær standard, men er blitt tatt i bruk også sivil luft- og romfart. Pakken inneholder kode for feilsjekk, og sjekken avgjør om pakken skal aksepteres og videresendes, eller om den skal forkastes.

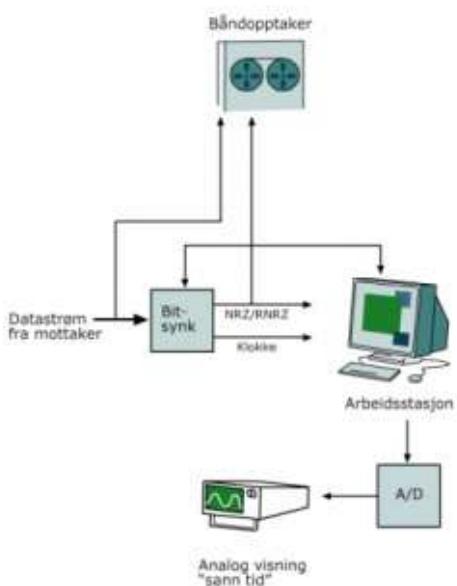
Andre kommunikasjonsprotokoller kan også brukes, blant annet allment utbredte protokoller for LAN og WAN. I lenkesamlingen finner du to eksempler, en generell skisse av LHDC og den svært gamle, men også svært robuste, protokollen X.25.

Selv om vi som sluttbrukere av pakkeleimetri ofte ikke behøver detaljkunnskaper om selve pakkeformatet, må vi fortsatt kjenne formatet til nyttedata i pakkene.

Synchronization Marker (32 bits)											
Version ID		Spacecraft									
Identifier		Virtual Channel ID		flag							
Master Channel Frame Count											
Virtual Channel Frame Count											
Flag	Flag	Flag	Segment Length ID	First							
Header Pointer											
Version No.		Header Length									
Secondary Header Data (maximum of 504 octets)											
Spacecraft Application Data (variable length)											
Type	Version No.	Status Field		COP							
Virtual Channel Identifier				Spare							
NORF	NOBL	LkOt	WAIT	RXMIT	Farm B Cntr RepTy						
Report Value											
CCITT-16 CRC Code (16-bits)											

MIL-standard 1553 pakkestruktur.

MIL-STD 1553  
Opphavsmann: [Narom](#)



Med stadig raskere datamaskiner og stadig bedre DMA-støtte kunne hele prosessen med oppsett av format, dekoding, lagring og presentasjon samles i en arbeidsstasjon slik det er vist i figuren til venstre. Den prosesseringen som ikke kan gjøres i programvare, for eksempel bitsynkroniseringen, gjøres med innstikkort.

Programvare dekoding med arbeidsstasjon.

PCM-dekoding i programvare  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Mottakersystemets egenstøy

Forfatter: Narom, Rolf Lien

[Mottakersystemets egenstøy \(54073\)](#)

Signalene vi mottar fra raketter og satellitter er ofte svake og kan lett drukne i støy. Denne støyen kan komme fra eksterne kilder – i artikkelen om frekvensbånd har vi sett at vi mottar kosmisk støy selv fra et ”tomt” verdensrom – og fanges opp av antennen sammen med nyttesignalet. Men også komponentene i mottakersystemet genererer støy, såkalt egenstøy. Denne egenstøya bidrar til å forverre signal/støy-forholdet til signalet vi mottar. Det er ikke likegyldig hvor i mottakersystemet egenstøya genereres, og det er viktig å forstå hvordan støybidraget i de forskjellige komponentene påvirker totalsystemets evne til å motta svake signaler.

## Støytemperatur og støytall

Før vi begynner å regne på støyen i mottakersystemet må vi gjøre oss kjent med noen begreper. Det første av disse er ekvivalent støytemperatur. Ekvivalent støytemperatur  $T_e$  er definert som

$$\begin{aligned} T_e = \frac{N_0}{kB} \end{aligned}$$

hvor  $N_0$  er støyeffekt generert internt i kretsen,  $B$  er kretsens båndbredde og  $k$  er Boltzmanns konstant lik  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  (oftest oppgitt med benevnelsen  $\text{W/K/Hz}$  i elektronikk sammenheng).

Ekvivalent støytemperatur må ikke forveksles med kretsens fysiske temperatur, men tilsvarer temperaturen til en ideel støykilde som genererer samme støyeffekt som kretsen vi oppgir  $T_e$  for.  $T_e$  beskriver altså en egenskap ved kretsen. En støysvak krets kan for eksempel ha en fysisk temperatur  $T_p$  på  $290\text{K}$  og en ekvivalent støytemperatur  $T_e$  som ligger under  $100\text{K}$ .

Også passive komponenter kan tilordnes en ekvivalent støytemperatur

$$\begin{aligned} T_e = \frac{1-G}{G} T_p = (A-1) T_p \end{aligned}$$

hvor  $A$  er dempingen og  $T_p$  er fysisk temperatur. Om ikke annet er oppgitt regner vi med  $T_p=290\text{K}$ . Tap i for eksempel kabler er oftest oppgitt i dB og vi må huske å regne om fra dB når vi skal beregne  $T_e$ .

## Nedlasting av værbilder fra NOAA-satellittene

Forfatter: Narom

[Nedlasting av værbilder fra NOAA-satellittene \(61821\)](#)

Målet med øvelsen er å lære om grunnleggende amatørradioutstyr og hvordan dette kan brukes til å laste ned værbilder fra NOAA-satellittene

Øvelsen er vedlagt som PDF-dokument.

# Linkanalyser

Forfatter: Narom

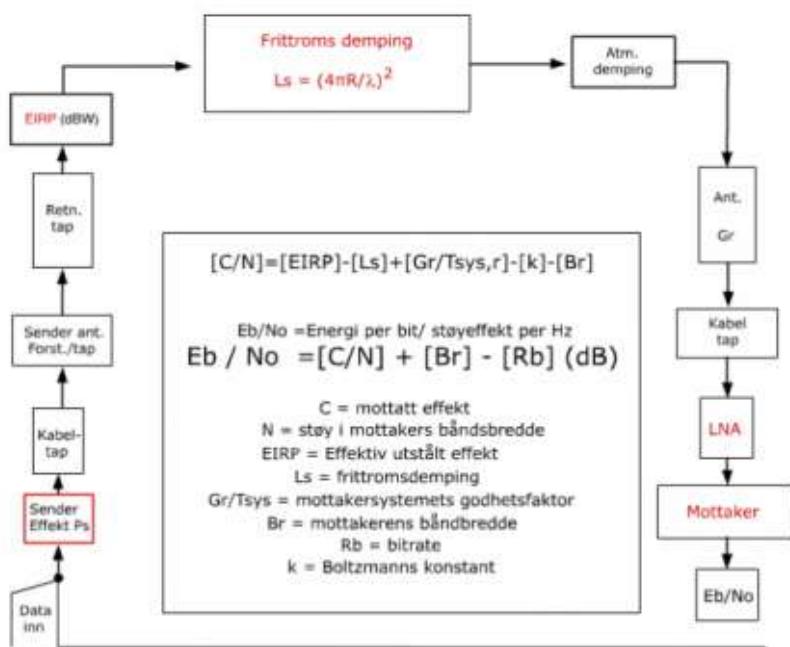
[Linkanalyse \(58960\)](#)

Linkanalyse er et verktøy vi kan bruke for å bestemme hvor stor effekt vi trenger på en sender for å få overført signalet vårt over en gitt avstand med ønsket signalkvalitet. Ved linkanalyse kan en regne ut signal/støy-forholdet i en link og avgjøre om dette er tilfredsstillende for de krav en setter.

Følgende parametre bestemmer nivået på det mottatte signal

- avstanden mellom sender og mottaker
- utsendt og mottatt antenneforsterkning for sender og mottakerantenne
- senderens utgangseffekt
- mottakersystemets støytemperatur
- kilder til forringelse og svekking av signalet
- akseptabel feilrate på mottakersiden

Figuren under oppsummerer de viktigste faktorene som påvirker kvaliteten på et signal på linken mellom sender og mottaker.



Linkanalyse

Opphavsmann: [Narom](#)

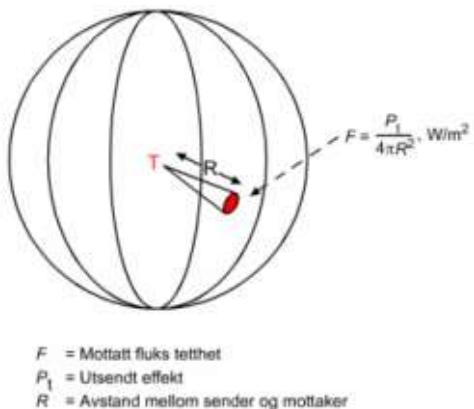
# Strekningsdempning

Forfatter: Narom

[Strekningsdempning \(58964\)](#)

I denne artikkelen skal vi utlede et uttrykk for strekningsdempningen i en link. Det vil si tapet som skyldes avstanden mellom sender og mottaker.

Vi kan tenke oss en isotropisk antennen i rommet som sender ut effekten  $P_t$  uniformt, det vil si like kraftig i alle retninger. Den utsendte effekten vil da bre seg utover i rommet som en sfære med antennen i sentrum. Ettersom radien på denne sfæren øker, vil effekten per kvadratmeter sfære minke. Dette er utgangspunktet for beregning av elektromagnetisk flukstetthet og er illustrert av figuren under.



Flukstetthet i en gitt avstand.

Flukstetthet på en gitt avstand

Opphavsmann: [Narom](#)

## Flukstetthet

Arealet av en kule med radius  $R$ , er gitt av formelen

$$A = 4\pi \cdot R^2$$

For å finne effekten pr kvadratmeter ved en avstand  $R$  fra senderantenna må vi derfor dele sendereffekten  $P_T$  med arealet av kuleskallet. Denne effekten pr kvadratmeter kalles elektromagnetisk flukstetthet og er gitt ved formelen

$$F = \frac{P_T}{4\pi R^2}, \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

## Effektiv isotropisk utsendt effekt, EIRP

Formelen over gjelder for antenner som stråler uniformt i alle retninger (Ideell isotropisk antennen). Dersom senderantennen er retningsbestemt vil den sende ut større effekt i retning av mottakeren enn i andre retninger. Vi sier da at antennen har antenneforsterkning  $G_T$ . For å få med denne effekten brukes begrepet effektiv utsendt isotropisk effekt(EIRP). EIRP står for "Effective Isotropic Radiated Power".

$$\text{EIRP} = P_T G_T, (W)$$

Vi må da korrigere uttrykket for flukstetthet til

$$F = \frac{R_T G_T}{4\pi R^2} = \frac{\text{EIRP}}{4\pi R^2}$$

Den maksimale effekten mottakerantenna kan fange opp fra det utsendte signalet er bestemt av mottakerantennas effektive areal.,  $A_e$ . Fra formelen for antennevinning i [Mottakerantenners karakteristiske egenskaper](#) kan vi utlede følgende formel

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$$

hvor  $G_R$  er gain til mottakerantenna og lambda er bølgelengden.

Den mottatte signaleffekten på mottakersiden kan dermed regnes ut ved å multiplisere flukstettheten med mottakerantennas effektive areal.

$$P_R = F * A_e = \frac{\text{EIRP} * A_e}{4\pi R^2} = \frac{G_T P_T}{4\pi R^2} * \frac{\lambda^2 * G_R}{4\pi} = \text{EIRP} * G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

Vi kan si at

$$\text{Mottatt effekt} = \frac{\text{Utsendt effekt} * \text{Gain i senderantenna} * \text{Gain til mottakerantenna}}{\text{Strekningsdempning}}$$

der strekningsdempning er gitt ved

$$L_S = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

Vi kan skrive om uttrykket med  $\lambda = \frac{c}{f}$  for å kunne regne med frekvens istedenfor bølgelengde. Vi deler også opp uttrykket for å skille  $R$  og  $f$  fra konstantene.

$$L_S = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = \left( 4\pi \frac{f}{c} R \right)^2 = \left( \left( \frac{4\pi}{c} \right) * f * R \right)^2$$

Strekningsdempningen utrykkes ofte i dB, slik

$$L_{S(\text{dB})} = 20 \log \left( \frac{4\pi}{c} \right) + 20 \log(f) + 20 \log(R)$$

Da blir den mottatte effekten gitt dB slik

$$P_{R(\text{dB})} = \text{EIRP}_{(\text{dB})} + G_{R(\text{dB})} - L_{S(\text{dB})}$$

Eksempel

Finn frittromsdempningen for tilfellet  $R = 1000\text{km}$  og  $f = 2,2\text{GHz}$ .

Husk å bruke SI-enheter, avstand  $R$  i meter og  $f$  i Hertz.

$$L_{S(\text{dB})} = 20 \log \left( \frac{4\pi}{3 * 10^8} \right) + 20 \log(2,2 * 10^9) + 20 \log(1000 * 10^3) = -147,56 + 186,84 + 120 = 159,3 \text{ dB}$$

# Systemstøy

Forfatter: Narom

[Systemstøy \(58963\)](#)

Alle legemer som har en temperatur over det absolute nullpunkt, vil sende ut elektromagnetisk stråling. For kommunikasjonssystemer er denne tilfeldige forstyrrelsen et uønsket signal som forstyrre det informasjonsbærende signalet, og vi kaller det støy.

Vi antar, for øyeblikket, at all støy kommer fra mottakeren, og at all støy antas å være av termisk karakter. Den termiske støyeffekten vil da være gitt ved

$$N = kT_{sys_r} B_r, [W]$$

der

- $N$  er termiske støyeffekten (watt)
- $T_{sys_r}$  er mottakerens støytemperatur (kelvin)
- $B_r$  er mottakerens båndbredde (hertz)
- $k$  er Boltzmanns konstant ( $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{joule}}{\text{kelvin}}$ )

Det er derfor viktig at inngangsfiltret på mottakeren settes så smalt som mulig for å slippe inn minst mulig støy.

## Bærebølge til støyforhold

Vi husker at mottatt signaleffekt ved mottaker var gitt av

$$P_r = \frac{EIRP}{G_R} L_s$$

Den mottatte signaleffekten blir også kalt bærebølgoeffekt,  $C$ .

Vi kan da sette opp forholdet mellom mottatt effekt fra signalet og støyeffekten.

Vi får da

$$\frac{C}{N} = \frac{EIRP}{L_s} \frac{G_r}{T_{sys_r}} \frac{1}{kB_r}$$

I likningen har vi isolert uttrykket  $\frac{G_r}{T_{sys_r}}$ . Grunnen til dette er at dette er godhetsfaktoren til mottakersystemet. Dette er et meget nyttig begrep og det karakteriser mottakersystemets evne til å detektere svake signaler. Det innbefatter både mottakerantennens forsterkning og systemets egenstøy. Det omtales vanligvis som  $\frac{G}{T}$ , dB/K. For digitale datalinker brukes forholdet mellom energi per bit og støytetthet. Dette forholdet betegnes som  $\frac{E_b}{N_0}$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\text{energi per bit}}{\text{støytetthet}}$$

Energi per bit,  $E_b$ , regnes ved å multiplisere signaleffekten  $C$  med periodetiden av en bit,  $T_b$

$$E_b = C \cdot T_b = \frac{C}{R_b}$$

der

- $E_b$  er energi per bit

- $T_b$  er bit-perioden
- $R_b$  er bit-frekvensen

$E_b$  er på mange måter et mål for hvor mye arbeid en bit kan utføre, og en indikasjon på hvor lett det er for mottakersystemet å detektere hver enkelt bit.

Støytettheten  $N_0$  er gitt ved støyeffekten per båndbreddeenhett.

$$N_0 = \frac{N}{B_r} = \frac{kT_{sys_r} B_r}{B_r} = kT_{sys_r}$$

Vi kan da regne ut forholdet  $\frac{E_b}{N_0}$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \frac{B_r}{R_b}$$

Av praktiske grunner gjøres utregninger av linkbudsjett ofte i decibelform. Alle uttrykkene i klammparenteser er oppgitt i dB.

$$\frac{C}{N} = \frac{\text{EIRP}}{L_s} \frac{G_r}{T_{sys_r}} \frac{1}{kB_r} \rightarrow \left( \frac{C}{N} \right) = (\text{EIRP}) - (L_s) + \left( \frac{G_r}{T_{sys_r}} \right) - (k) - (B_r)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \frac{B_r}{R_b} \rightarrow \frac{E_b}{N_0} = \left( \frac{C_r}{N} \right) + (B_r) - (R_b)$$

Og setter vi  $\frac{C}{N}$  inn i ligningen for  $\frac{E_b}{N_0}$ , får vi

$$\frac{E_b}{N_0} = (\text{EIRP}) - (L_s) + \left( \frac{G_r}{T_{sys_r}} \right) - (k) - (R_b)$$

hvor

- $C$  er bærebølgoeffekten
- $N$  er støyeffekten
- $E_b$  er energi per bit
- $N_0 = kT_{sys_r}$
- $\text{EIRP}$  er effektiv utsendt effekt
- $L_s$  er avstandsdempning
- $\frac{G_r}{T_{sys_r}}$  er mottakersystemets godhetsfaktor
- $k$  er Boltzmanns konstant (-228,6 dB)
- $R_b$  er bitraten
- $B_r$  er mottakerbåndbredden (avhengig av bitraten)

# Overføringsmargin og tap

Forfatter: Narom

[Overføringsmargin og tap \(58970\)](#)

Til nå har vi diskutert signal støyforholdet på en ideell overføringslenke uten noen form for tap. I virkeligheten er det en rekke forhold som må tas med i beregningen slik at en kan avgjøre om overføringsmarginene er tilfredsstillende.

I artikkelen om systemstøy kom vi frem til følgende uttrykk for å beskrive signal/støyforholdet for digitale overføringslinker

$$\frac{E_b}{N_0} = (\text{EIRP}) - (L_s) + \left( \frac{G_r}{T_{\text{sys}_r}} \right) - (k) - (R_b)$$

Når en skal gjøre linkanalysen og bestemme for eksempel hvilken sendeffekt vi trenger kan vi velge en minsteverdi for forholdet  $\frac{E_b}{N_0}$ . Vi kaller denne verdien overføringsmargin,  $S_{\text{mar}}$ .

$$\frac{E_b}{N_0} \geq S_{\text{mar}}$$

For å kunne gjøre denne beregningen må vi også sette inn verdier for alle typer tap vi kan få på overføringslenken i uttrykket

$$S_{\text{mar}} = (\text{EIRP}) - (L_s) + \left( \frac{G_r}{T_{\text{sys}_r}} \right) - (k) - (R_b) - (L_p) - (L_r) - (L_f) - (L_m) - (L_{\text{misalign}}) - (L_{\text{BER}})$$

## Polarisasjonstab L<sub>p</sub>

Polarisasjonstab avhenger av egenskapene til senderantennen og mulighetene for å motta både høyre- og venstredreid polarisasjon på mottakersiden. Dersom sender og mottakerantennen har lineær polarisering vil vi oppleve en svekkelse i signalet dersom de får ulik orientering.

## Regntap L<sub>r</sub>

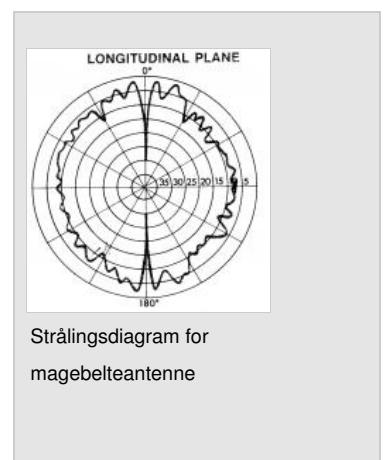
Regntap er avhengig av intensitet og telemetrfrekvensen. Frekvenser i S-bandområdet blir lett absorbert av vannmolekyl. Mikrobølgeovner utnytter denne effekten til å varme opp mat og bruker frekvensen 2459 MHz.

## Flammetap L<sub>f</sub>

Flammetap kommer av at partikler i avgassen fra rakettmotoren demper signalet. På raketter med mye metall i avgassene kan flammetapet komme opp i 30 dB. Det er imidlertid uvanlig at de viktige målingene skjer i rakettens brennfase, så det har mindre betydning.

## Svekkingsmargin eller Fading Margin L<sub>m</sub>

Svekkingsmarginen er først og fremst avhengig av senderantennens effektive polardiagram. Et typisk polardiagram fra en "båndantenne" er vist i figuren til høyre. Legg merke til de dype minima ved 0 og 180 grader, det vil si i retning rett forover og rett bakover i forhold til nyttelastens lengdeakse. Ifølge dette polardiagrammet kan, i uheldige tilfeller, signalstyrken bli så meget som 30 dB svekket i disse retninger. Med en enkel mottakerstasjon kan vi ikke gardere oss mot dette. To telemetristasjoner med en tilstrekkelig horizontal avstand (for eksempel samtidig telemetri ned til både ASC og Tromsø) kan eliminere dette. Det er derfor viktig å fremheve betydningen av parameteret "fading margin".



## Tap grunnet feil antennepokevinkel Lmisalign

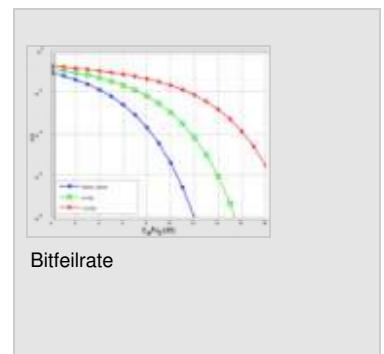
**misalign** står for miss alignment, og dette er et tap som er lagt inn for å håndtere at mottakerantennen ikke er rettet nøyaktig mot senderen.

### Krav til bitfeilrate LBER

Ved digital overføring er det antall bitfeil som er det antall mottatte bit i en bitstrøm over en kommunikasjonskanal som har blitt forandret pga støy, interferens, forvrengning eller synkroniserings feil.

Ved å lese av figuren ved siden av så kan man finne ønsket bitfeilrate og dens tilhørende  $\frac{E_b}{N_0}$ .

Denne verdien settes da som  $L_{\text{BER}}$ . Siden  $\frac{E_b}{N_0}$  skal være større eller lik enn overføringsmarginen, kan vi sette overføringsmarginen til 0 og dermed kan vi sette  $\frac{E_b}{N_0} = L_{\text{BER}}$ . Da vil det være mulig å finne ut hvor lav effekt en kan sende med.



# Prosessering og presentasjon av data

Forfatter: Narom

[Prosessering og presentasjon av data \(59362\)](#)

I moderne telemetrisystemer er det vanlig at antall variabler som skal overføres er svært stort. Målingene fra raketten kommer i all hovedsak som en sammenhengende serie av binære symboler oppdelt i et bestemt format som må dekodes før det kan presenteres for operatører eller eksperimentator. Presentasjon av data må gjøres oversiktlig og vises i en form som lett kan oppfattes direkte som fysiske størrelser. I forbindelse med en operasjon er det også en rekke bakkedata som skal presenteres, både fra bakkeinstrumenter og tekniske data fra telemetristasjonen.

Kravet til presentasjon av data varierer med hvilken type data som skal behandles. Enkelte variable kan operatør og eksperimentator ha stor nytte og interesse av å få presentert mens det faktisk skjer, i sann tid. For andre data kreves det et grundig etterarbeid, kanskje over måneder eller år, for å gi vitenskapelig nytteverdi.

I dette kapitlet skal vi se på systemer og programvare som benyttes i ulike former for presentasjon og prosessering av data, både i sanntid og ikke sanntid.

## Sanntidsoverføring

Når data presenteres i sanntid vil ideelt sett hvert datapunkt overføres og vises før det neste sendes. I virkeligheten er ofte ikke dette mulig, men vi kaller denne type presentasjon for sanntidsvisning likevel. Sanntidsoverføring er viktig hvis operatørene må ta stilling til data under flukten. For eksempel hvis destruksjon av raketten er nødvendig av sikkerhetsgrunner. Sanntidsvisning av bakkedata som signalstyrke og banedata er alltid viktig for telemetrioperatørene. Sanntidstelemetri kan også være av betydning under utprøving av en instrumentlast før en oppskyting.

## Ikke sanntid

Når data ikke behandles og presenteres i sanntid kan det ha ulike årsaker. Det kan for eksempel være at alle data i en hel raketflukt eller en satellittpassasje blir overført til et stort minne og spilt tilbake før operatøren eller eksperimentatoren får muligheten til å vurdere data. Under "ikke sanntid" kommer også pakketelemetri, som brukes i forbindelse med satellittelemetri. Her blir en datapakke oversendt og godkjent med retursvar fra mottakeren på bakken. Ved hjelp av for eksempel paritetskontroll kan mottakeren sjekke om pakken inneholder feil og automatisk be om gjentakelse hvis pariteten ikke stemmer.

Tilbakespilling og etterbehandling av lagrede raketdata er selvfølgelig også ikke sanntid. Dette gjøres nesten alltid, selv om data har vært presentert i sann tid under flukten.

# Presentasjonsformer

Forfatter: Narom

[Presentasjonsformer \(59372\)](#)



Hvordan data skal brukes er bestemmende for hvordan det er hensiktsmessig å presentere de. Tidligere var ulike papirskrivere, viserinstrumenter, display og statuslys mye brukt, I dag blir data i all hovedsak behandlet av datamaskiner og presentert på dataskjermer.

For å gjøre det mulig å tolke dataene må en rekke elementer være tilstede

- dataord som er viktig for en umiddelbar vurdering av data
- tidsreferanse
- omforming av data til ett felles tallsystem
- datavisning i kalibrert form (for eksempel spenning, strøm, temperatur, tellinger/tidsenhet o.l.)
- datavisning i grafisk form, 2D eller 3D

Data kan bli presentert grafisk (linje-, punkt-, søylediagram o.l.) eller i tabellform på papir eller skjerm.

## Papirskrivere

Papirskrivere (eng. Chart recorders) plotter på sammenhengende papirruller med ruter som på et millimeterpapir. Disse har fordelen av at en lett kan få oversikt over lange serier av data. Mange foretrekker dette, men som alle ikke skjermbaserte former for datapresentasjon er metoden på vikende front. Først og fremst er metoden for langsom i forhold til presentasjon på elektronisk skjerm.

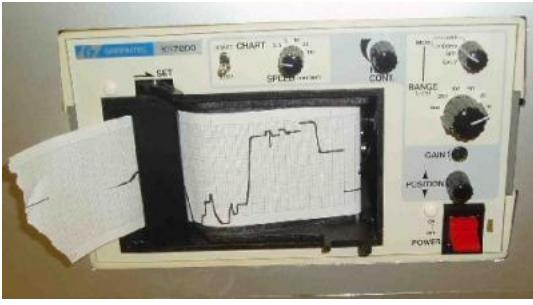
På ASC benyttes papirskrivere enda i dag som et supplement til digital lagring og visning. Forsterkningsreguleringen, AGC i mottakerne (eng. Automatic Gain Control) og skråavstandsberegninger ut fra faseforskyvning av signalet er data som er nyttig å kunne se gjennom under flukten og rett etter nedslag på en lang papirstrimmel.

Papirskrivere forekommer som følgende typer

- multipenn blekkskrivere med vanlig papir
- multipenn termiske skrivere som plotter på spesialpapir
- speilgalvanometerskrivere som skriver på lysfølsomt papir



Multikanal termisk skriver  
Opphavsmann: [Narom](#)



Enkanals termisk skriver  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Presentasjon i tabellform

Den enkleste form for visning av data er rådata vist i heksadesimal form. Et eksempel fra et format med en rammelengde på 96 biter er vist i figuren under. Dataene er listet ut direkte fra rådata lagret i sanntid på PC-ens magnetplate. Av praktiske grunner viser vi bare en del av hele formatmatrisen (1 format = 96 ord X 32 subrammer). I formatet brukes et 16 bits synkroniseringsord gitt ved den binære tallrekken 1110 1011 1001 0000 som på heksadesimal form er gitt ved tallet EB 90. Når data lagres på denne måten vil to og to bytes bytte plassering. Vi kan derfor lese ut 90EB fra figuren ved starten av hver nye ramme.

000000	FF	00	51	D9	7D	82	DF	69-A4	69	10	7B	00	23	00	00
000010	00	00	D8	7D	82	DF	37	77	C4	06	20	83	90	00	00
000020	51	81	99	D9	7D	82	DF	00	00	7A	00	23	00	00	00
000030	FF	00	60	9E	00	00	00	00	00	00	00	00	20	90	E9
000040	C1	8F	E1	09	7D	82	DF	00	00	7B	00	20	90	E9	00
000050	C1	7E	90	EB	00	0A	28	00	00	C2	06	70	11	00	80
000060	FF	00	29	DA	7D	82	DF	9D-A4	6E	10	7B	00	20	00	00
000070	00	00	D8	74	7D	82	DF	52-55	01	C6	06	10	83	70	90
000080	51	81	66	DA	7D	82	DF	A0-A4	00	00	00	00	23	00	00
000090	FF	00	30	9F	00	00	00	00	7B-S1	00	00	00	00	00	00
0000A0	D1	8F	A4	DA	7D	82	DF	6F-A4	00	00	00	00	20	80	E9
0000B0	C1	7E	90	EB	00	0B	97	74-06	00	00	00	00	11	00	7F
0000C0	FF	00	00	07	7D	82	DF	2F-A4	00	00	00	00	00	00	00
0000D0	00	00	E8	01	7D	00	00	75-00	01	C8	06	10	83	90	90
0000E0	61	81	18	DB	7E	82	DF	01-L4	77	10	7B	00	1E	00	00
0000F0	FF	00	30	9F	00	00	00	BB	77-00	01	C7	06	00	8B	C0
000100	C1	8F	4E	DR	00	02	DF	E1-A4	77	10	79	00	1E	20	E9
000110	51	7F	90	EB	00	0C	27-00	01	C2	06	20	11	50	7F	00
000120	FF	00	7F	DE	7E	82	DF	F2-A4	75	10	7A	00	1F	00	00
000130	00	00	81	B2	7D	00	00	7C	77-96	01	C4	06	20	83	80
000140	61	81	AE	DB	7E	82	DF	03-A4	77	10	7A	00	1F	00	00
000150	FF	00	50	9F	00	00	00	66	78-96	01	C3	06	10	88	60
000160	C1	8F	DD	DR	7E	82	DF	14-A4	7B	10	7B	00	1E	20	E9

Heksadesimale tabelldata  
Opphavsmann: [Narom](#)

Brukere av data vil som oftest kun studere data på denne formen dersom en skal lage et dataprogram for å dekode dataene. Det er mange måter å gjøre dette på, men programmer som Matlab, og språk som phyton og C++ sammen med gnu plot er ofte brukt.

Dekodingsystemer som EIDEL og VTS vil også gjøre denne oppgaven for deg og vil kunne presentere data i tabeller, ferdig sortert etter variable med tilhørende tidsflagg.

## Søylediagram

I denne figuren vises et eksempel hvor data er presentert som søylediagram, og i tillegg også i sifferform, skjermdumpen er hentet fra EIDEL system EE315.

Data vises sammen med navn, tidslukenummer og kommuteringsrate. Data kan vises både i sanntid og ikke sanntid. Oppdateringsfrekvensen vil være avhengig både av maskinvare og programvare. Presentasjonsmetoden egner seg ikke til å vise data som varierer hurtig. Data kan også vises i kalibrert form. Flere tidsluker kan kombineres slik at for eksempel det dynamiske området kan utvides. I forskingssammenheng er det ofte behov for å overføre variable som gjør det nødvendig å dekke mange dekader. Typisk kan en måleverdi komme fra en tidsluke som inneholder mantissen og en tidsluke som inneholder eksponenten. Dette vil bli behandlet i detalj i etterfølgende avsnitt.

## Grafisk form

All presentasjon av data er avhengig av både programvare og maskinvare. For hurtig visning av grafiske data er det nødvendig at maskinen er utstyrt med spesielle grafikkdrivere som kan håndtere store datamengder uten at sentralprosessoren sinker overføringen. For data som varierer hurtig er en grafisk visningsmetode absolutt nødvendig. I sanntidssammenheng vil det være vanlig å vise kurver med tiden langs den horisontale aksen. På y-akse(r) kan en eller flere variable plottes.



Telemetridata som søylediagram  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Etterbehandling av data

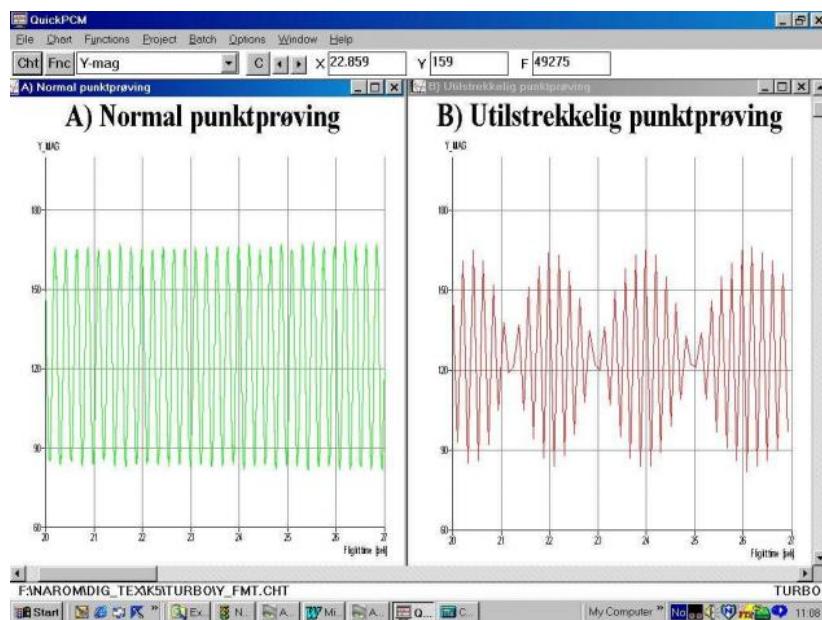
Forfatter: Narom

[Etterbehandling av data \(59421\)](#)

Etterbehandling av data gir andre muligheter for presentasjon og mer inngående studier enn ved sanntidsvisning. Siden det ikke finnes noen sanntidskrav vil det være mulig å behandle hvert eneste datapunkt, noe som minsker faren for undersampling selv for målinger som varierer svært raskt. Ved etterbehandling er alle punktprøver fra hele flukten lagret i en permanent form. Dette gir mulighet for å behandle data med ulike filter og matematiske funksjoner for å fjerne støy eller vise nye sammenhenger.

## Tidskurver og XY-grafer

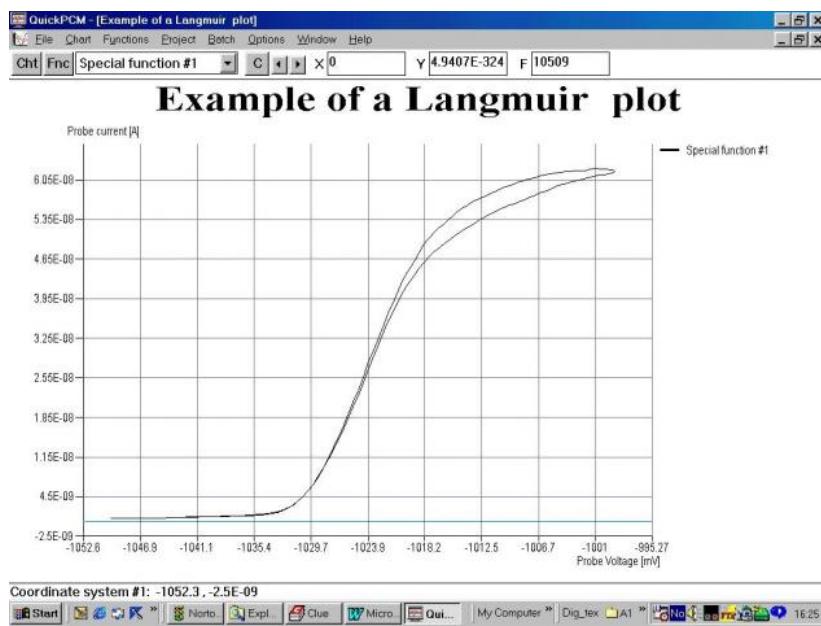
Ved sanntidsvisning av data vil det ofte bare være en andel av datapunktene som blir brukt i plottingen. Med hurtig varierende data kan ikke alle datapunktene komme med i en sanntidsanalyse. Da er det ofte nødvendig å gjøre tilbakespilling fra data som er lagret, slik at hurtige datavariasjoner kan studeres. Figuren under viser magnetometermålinger fra en rakett som roterer med ca. 5 Hz. Grafen til venstre viser hvordan grafen skal se ut med alle måleverdiene, mens grafen til høyre viser alvorlige feil på grunn av utilstrekkelig punktprøving i sanntidsvisning. Se også artikkelen om aliasing.



Aliasing skjermdump

Ophavsmann: [Narom](#)

Et viktig punkt er at data ikke behøver å behandles og vises som funksjon av tid. Det kan for eksempel være ønskelig å vise to variable som funksjon av hverandre i oppgitte tidsintervaller. Dette er illustrert i følgende figur hvor strøm til en probe er vist som funksjon av en forspenning på probeoverflaten.



Coordinate system #1: -1052.3, -2.5E-09

Start Norto Expl Clue Micro Qui... My Computer Dig\_Tex A1 16:25

Langmuir-plot  
Opphavsmann: Narom

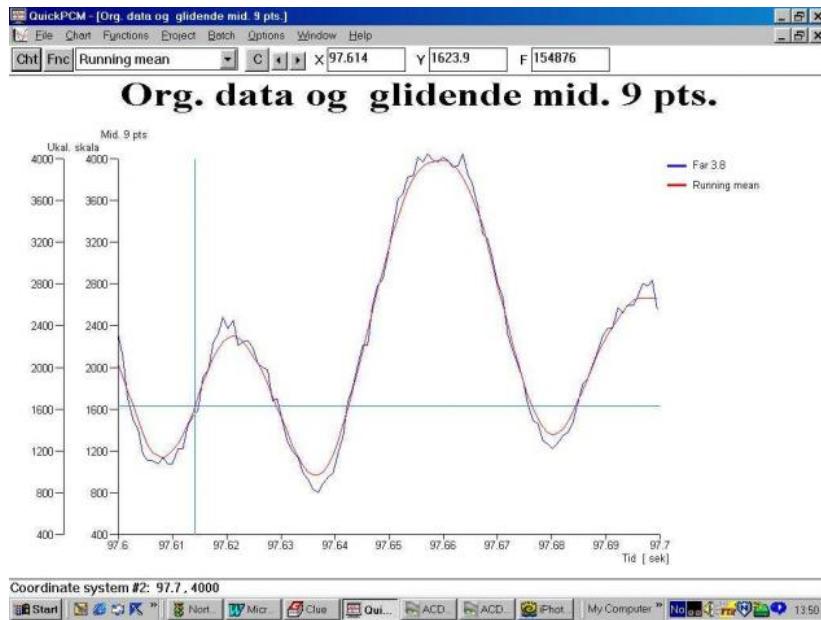
## Matematiske funksjoner

Det finnes mange standardfunksjoner som er nyttige i vurdering av data. Her er en del eksempler

- numerisk derivasjon (eng. "numerical derivation")
- løpende middel (eng. "running mean")
- lineær regresjon (eng. "linear regression")
- FFT spektralanalyse (eng. "fast fourier transform")

## Løpende middel

En vanlig måte å jevne ut en ujevn graf på er å bruke løpende middelverdi. Figuren nedenfor viser eksempler på kurver med støy hvor et løpende middel er plottet sammen med de originale data med støy. Hvert punkt i den utjevnede grafen er altså en middelverdi av et gitt antall punkter, i dette eksemplet ni, rundt det samme tidspunktet i den originale grafen.



Coordinate system #2: 97.7, 4000

Start Norto Expl Clue Micro Qui... ACD Phot My Computer 1350

Glidende middel  
Opphavsmann: Narom

## Lineær regresjon

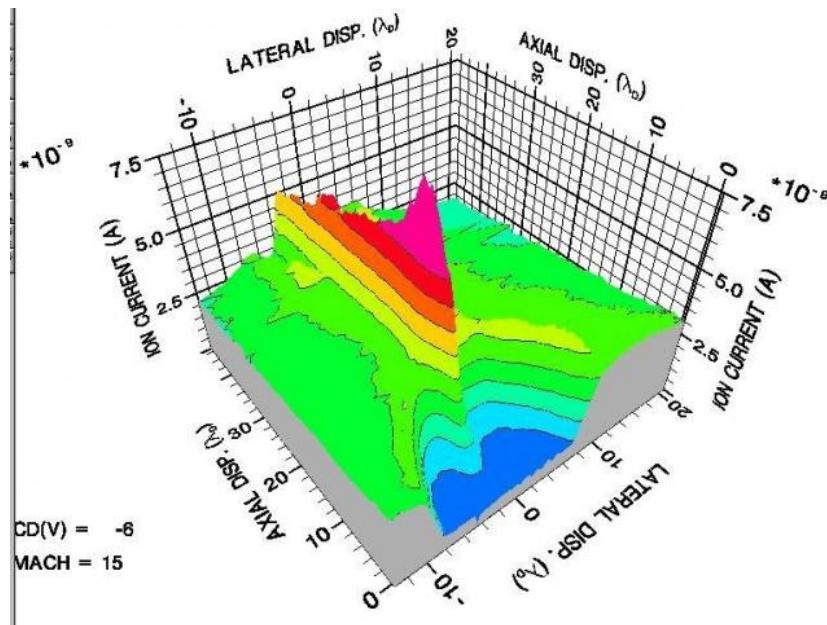
Lineær regresjon innebærer å finne en lineær funksjon der funksjonsgrafen ligger så nær flest mulig datapunkter i de opprinnelige data som mulig.

## FFT (Fast Fourier Transform)

I mange sammenhenger er det av interesse å studere spektralfordelingen i et utvalg av punkter over et gitt tidsintervall. Resultatet kan presenteres som et X-Y plott med frekvens langs X-aksen og effekt eller energi langs Y-aksen.

## 3D grafikk

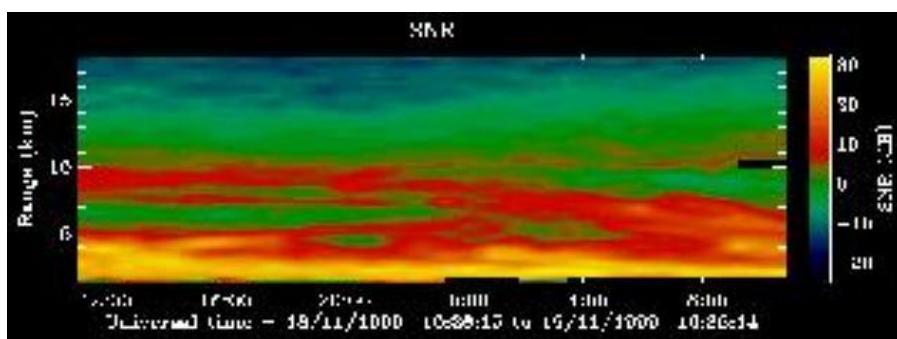
Det kan være ønskelig å vise sammenhengen mellom tre, og ikke bare to parametre. Figuren under viser sammenhengen mellom tid, ionefluks og energi omkring et skiveformet legeme i et plasmakammer. Eksperimentet skal simulere ionestrømmen rundt en satellitt. Grafikken er laget ved hjelp av programsystemet IDL.



3D-plott av ionestrøm  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Flere variable ved hjelp av fargekoder

En annen metode til å fremstille tre eller flere variable på en todimensjonal skjerm er bruk av fargekoding. Et eksempel er vist i figuren under der horisontal akse representerer tid, vertikal akse avstand (høyde) mens intensiteten av signalene er fargekodet etter en skala vist på høyre side av plottet.



Fargekoding  
Opphavsmann: [Narom](#)

# VTS - System for dekoding, lagring og sanntids..

Forfatter: Narom

[VTS - System for dekoding, lagring og sanntidvisning av data \(59349\)](#)

På ASC gjøres demultiplesing eller dekoding av data ved bruk VTS (eng: Visual Test System). Systemet består av maskinvare i form av PC-innstikkskort og tilhørende programvare, og er et komplett system med mulighet for bit-synkronisering, visualisering av sanntids måledata samt opptak og lagring av data.

## Maskinvare

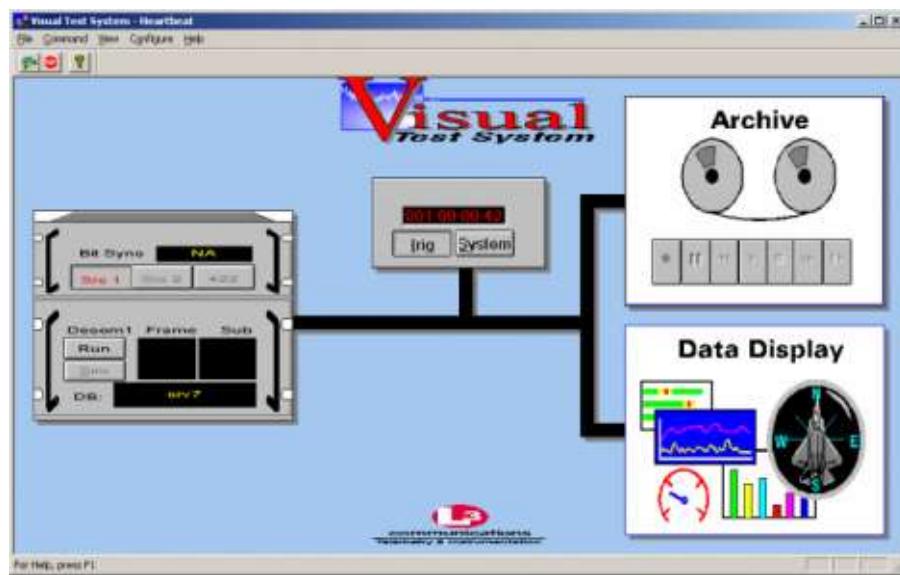
VTS innstikkortene inneholder to uavhengige bitsynkronisatorer, og kan derfor behandle data fra raketter med to telemetrisystemer samtidig. Den innebygde bitsynkronisatoren gjør at VTS kan kobles direkte til utgangen av telemetrimottaker og ta i mot en ubehandlet PCM datastrøm med bitrate opp til 15 Mbit/s. Dersom kun en av bitsynkronisatorene brukes til å ta mot PCM datastrøm, frigjøres innganger i VTS-systemet til å ta i mot tidskode i form av IRIG-B. På denne måten kan hvert datapunkt lagres sammen med et tidsflagg i UTC tid.

## Programvare

Figuren under viser hovedvinduet til brukergrensesnittet i VTS-programvaren. Til venstre ser vi to bokser som skal illustrere modulene bitsynkronisator og dekoder (også kalt dekommutator). Alle innstillinger av disse gjøres i programvaren ved å klikke seg inn på modulene. Bitsync-modulen må settes opp med blant annet type inngangssignal og bitfrekvens.

I dekodermodulen må en sette opp en tabell med hele PCM-formatet til den nyttelasten en skal motta data fra. For å kunne finne frem til og sette sammen måledata, som ligger i de forskjellige ordene, må programvaren som styrer dekoderen også vite plassering av og type synkroniseringsord samt ordlengde, rammelengde og formatlengde. Til slutt kan en legge inn formler som omformer desimalverdiene en mottar i hvert dataord til fysiske verdier, for eksempel temperatur for en temperatursensor eller meter per sekund for et akselerometer.

Midt i figuren ser vi et display som viser tiden i UTC. Hvert datapunkt kan tillegges et tidsflagg slik at en kan lagre og visualisere data relativt til tiden.



VTS hovedvindu  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Lagring og arkivering

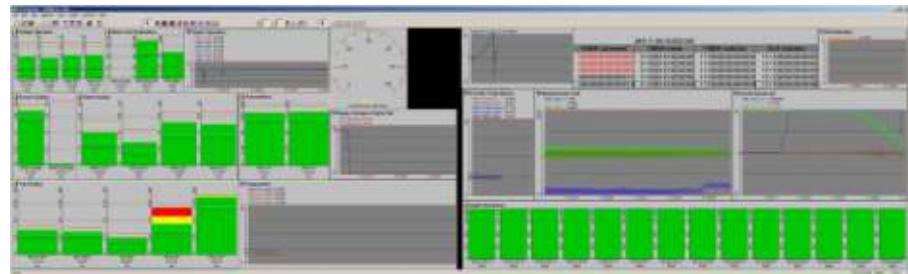
Til høyre i figuren over ser vi modulen for lagring og arkivering av data. Den kan betjenes med knapper omrent som på en kasettopptaker. En kan derfor se gjennom dataen rett etter skudd ved å foreta en digital tilbakespilling. De lagrede filene kan eksporteres i binærform eller i ASCII format for etterbehandling og grundigere analyse, for eksempel i programmet Matlab.

## Visualisering

Ved å trykke på den siste boksen nederst til høyre kan en sette opp ulike former for datavisninger. Alt etter hva en ønsker å fremstille kan en velge

- løpende grafer med tid som x-akse
- søylediagram
- tallvisning
- oscilloskopvisning
- viserinstrumenter med nål

I displayene kan det legges inn advarsel og alarm dersom verdiene kommer utenfor forventet område. Da det som regel ikke er toveiskommunikasjon med raketten vil sanntidsvisning av data først og fremst være nyttig ved testing før skudd. Dersom noe går galt underveis i flukten er det lite en kan gjøre.



VTS

Ophavsmann: [Narom](#)

# Datalagring og arkivering

Forfatter: Narom

[Datalagring og arkivering \(60238\)](#)



Mottaking av telemetri innebærer nesten alltid overføring av store mengder måledata. Vurdering og analyse i sanntid vil ofte være umulig. Overføring til et mer eller mindre permanent lager er derfor av avgjørende betydning.

Lagring av informasjon er selvfølgelig ikke spesiell for faget telemetri. Datalagring foregår i forbindelse med enhver bruk av datamaskiner, og behovet for lagringsplass øker eksponentielt. Mengden av lagrede data på verdensbasis passerte 1 Zettabyte i 2010, og økte med omtrent 60 % dette året. Innenfor romteknologi er satellitter en leverandør av enorme mengder data.

Når vi skal velge lagringsmetode er det en rekke hensyn å ta

- lagringskapasitet
- overføringshastighet
- aksessstid, dvs. den tid det tar å hente ut data fra et tilfeldig sted i datalageret
- maksimal lagringstid og sikkerhet (degradering over år)
- kompatibilitet med eksisterende og fremtidig maskin- og programvare
- pris

Hvilke hensyn som veier tyngst avhenger av om vi skal lagre i sanntid, eller sikkerhetskopiere for arkivering og hvordan vi skal bruke dataene. Magnetbånd kan for eksempel lagre store mengder data til en forholdsvis lav pris, men har svært lang aksessstid. Datalagre basert på halvledere har svært kort aksessstid, men har (2010) begrenset lagringskapasitet og relativt høy pris.

Data som skal arkiveres, altså lagres over tid, krever et bevisst forhold ikke bare til mediets fysiske levetid, men også teknisk levetid. Vi må ha maskin- og programvare for avspilling av gamle data, og dette blir ofte utdatert før lagringsmediet er fysisk degradert. Fysisk levetid kan også være kort for noen medier, ikke minst eldre typer magnettape. Dette innebærer at vi må regne med å kopiere lagrede data over til andre medier, kanskje flere ganger, i løpet av den tiden vi skal ta vare på disse. Gjelder dette analoge data på magnetbånd innebærer kopieringen i praksis alltid digitalisering samtidig.

I artiklene som følger skal vi se på forskjellige metoder for lagring av data. I tillegg til de som er mest aktuelle å lagre til i dag (2010), må vi være oppmerksomme på noen eldre medier som vi kan støte på i arkiver for data som er lagret tidligere. Vi skal også forsøke å spå om mulige trender fremover, men datalagring er et område hvor teknologien er i rivende utvikling.

# Analog og digital lagring

Forfatter: Narom

[Analog og digital lagring \(61464\)](#)

Nesten all datalagring skjer i dag digitalt. Dette gjelder også data som i utgangspunktet er analoge, enten de lastes ned fra rommet eller er tekniske data generert lokalt. Historisk var det ikke slik, og noe data kan også i dag lagres analogt om ulempene ved analog lagring ikke er store nok til å forsvare kostnadene ved utfasing av utstyr for analog lagring. Digital lagring er likevel dominerende og i ferd med å bli enerådende.

Felles for alle analoge metoder er

- begrenset dynamikk og båndbredde
- nullpunkt drift
- degradering ved kopiering grunnet akkumulert støy
- begrensede muligheter for etterbehandling uten digitalisering

Dette er ulempen som begrenser bruksområdet for analog lagring.

Felles for digitale metoder er

- ingen nullpunkt drift ved ekte
- ingen degradering ved kopiering
- det er enkelt å etterbehandle data
- data kan komprimeres før lagring

Dette er fordeler ved digital lagring sammenliknet med analog lagring. Ulempene ved digital lagring er mulig tap av informasjon og aliasing ved digitalisering av originalt analoge data, noe som er et generelt problem ved all digitalisering og ikke direkte knyttet til selve lagringen. En annen ulempe er at digital informasjon ikke uten videre kan tolkes av mennesker i sin lagrede form. Et raskt blikk på en papirstrimmel med en analog AGC-utskrift gir umiddelbar informasjon på en måte et digitalt signal ikke kan gi.

## Eksempler på analog lagring

1. Amplituden av en kanal som inneholder datainformasjon styrer magnetisering av et magnetbånd, for eksempel analoge opptakere for lyd og bilde som var dominerende for noen tiår siden.
2. Frekvensen av en kanal som inneholder datainformasjon, for eksempel frekvensen i et frekvensmultipleks innspilt på et magnetbånd.
3. Grafisk kurve på en papirskriver.
4. Lyd lagret som mekaniske endringer i et spiralformet spor, for eksempel vinylplatene som var et populært medium for salg av musikk til midten av 1980-årene.

Grafisk lagring på papir brukes til en viss grad fortsatt, men vi skal konsentrere oss om lagring på magnetbånd videre.

## Eksempler på digital lagring

Alle medier som kan preges med to distinkte tilstander, i datasammenheng gjerne omtalt som diskrete tilstander, kan brukes til digital lagring. Dette er noen eksempler:

1. Papir med hull eller ikke hull, som i hullkort og hullbånd.
2. Papir med sverte eller ikke sverte, som i strekkoder.
3. Magnetisk belegg med hvor vi bare utnytter to distinkte magnetiseringsnivåer, som i magnetplatalager og magnetbånd for digital lagring.
4. Metallisk belegg i optiske medier som reflekterer eller ikke reflekterer lys mot en sensor, som i CD-, DVD- og Blu-ray-plater.
5. Elektriske komponenter som kan være i to distinkte tilstander, for eksempel ledende eller ikke ledende, som i flashminne.

Papirbasert digital lagring har bare historisk interesse i telemetrisammenheng, men de andre metodene skal vi se nærmere på.

# Magnetbånd og analog lagring

Forfatter: Narom

[Magnetbånd og analog lagring \(61495\)](#)



Magnetbånd er det eldste mediet for magnetisk lagring som fortsatt er i bruk. Den største ulempen ved bruk av magnetbånd er lang aksesstid, men der aksesstid ikke betyr noe, som sikkerhetskopier som skal legges tilbake i sin helhet ved behov, er magnetbånd fortsatt konkurransedyktige og er fortsatt under utvikling for å øke datatettheten. Magnetbånd kan brukes til både analog og digital lagring, og i denne artikkelen ser vi på grunnleggende egenskaper og analog lagring.

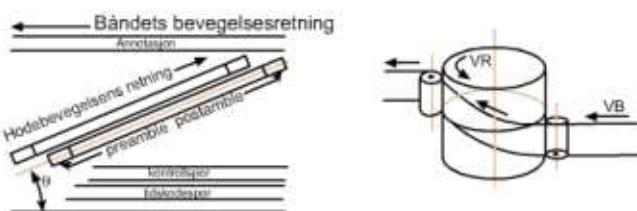
Beskrivelsen i denne artikkelen av magnetbånd som medium er selvsagt gyldig enten vi lagrer analogt eller digitalt, og bør leses som bakgrunnsstoff også for artikkelen om digital lagring på bånd.

## Hovedprinsipper for lagring på magnetbånd

For lagring på magnetbånd brukes to forskjellige teknologier, lineær og spiralformet lagring.

Lineær lagring med opptaker med stasjonære inn- og avspillingshoder som gir flere parallelle spor på langs av transportretningen til båndet. Den relative hastigheten mellom båndet og hodet er bestemt av transporthastigheten til båndet. Metoden er velegnet for kontinuerlige signaler uten større krav til båndbredde.

Spiralformet lagring på opptaker med roterende hoder som gir spor som går fra kant til kant på båndet, med en ganske høy vinkel på transportretningen. Her er den relative hastigheten mellom bånd og hode fullstendig dominert av rotasjonshastigheten til hodene.



Spiralavsøking (Helical Scan) av magnetbånd.

For analog lagring var metoden velegnet, og i sin tid mye brukt, for video for TV hvor hvert spor tilsvarte en linje i bildet og eventuell støy i overgangen fra et spor til det neste ikke utgjorde noe problem.

	Spiralformet båndlagring ( <i>Helical Scan</i> )	Lineær båndlagring ( <i>DLT: Digital Linar Tape</i> )
Båndhastighet	Lav	Høy
Strek i båndet	Lav	Høy
Sporlengde ( <i>track</i> )	Kort	Lang
Dataetethet i ett spor	Høy	Lav
Maksimal lagring per kassett/spole	Meget høy	Relativ lav

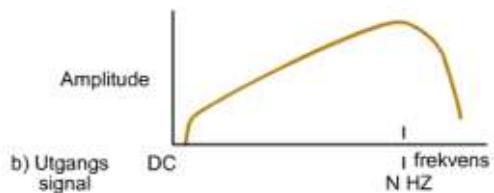
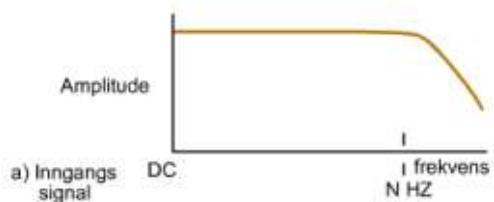
De viktigste egenskapene til de to teknologiene er oppsummert i tabellen over. Hvor høye frekvenser vi kan lagre, og dermed hvor stor båndbredde eller dataetethet vi kan oppnå, avhenger av den relative hastigheten mellom hode og bånd. Vi ser at dataetetheten er lav for lineær lagring til tross for høy båndhastighet.

Hastighet ips (tommer/s)	Båndbredde kHz
240	4000
120	2000
60	1000
30	500
15	250
7 ½	125
3 ¾	62,50
1 7/8	31,25

Tabellen til høyre viser sammenheng mellom båndbredde og båndhastigheter typisk for lineær lagring. Forholdet mellom båndhastighet og frekvensrespons

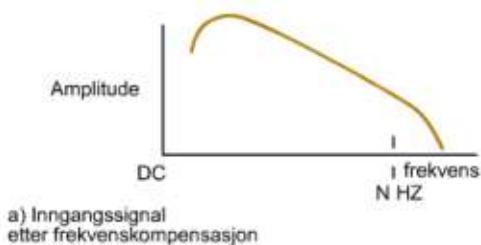
Forvrengning av signalene

Innenfor det frekvensområdet vi kan lagre er ikke frekvensresponsen lineær. Figuren under viser typisk frekvensrespons for en gitt båndhastighet.



Inn- og utgangs signalet i en typisk registrering på magnetbånd.

Vi kan langt på vei kompensere for ulineariteten med aktive filtre (eng: equalizer) som har en karakteristikk som vist i kurve a) i figuren under. Siden frekvensresponsen er avhengig av båndhastighet må også frekvenskompensasjonen i filtret endres om vi endrer båndhastighet. Det sier seg selv at analog lagring av amplitudevariasjoner er svært følsom for unøyaktigheter i denne frekvenskompensasjonen.

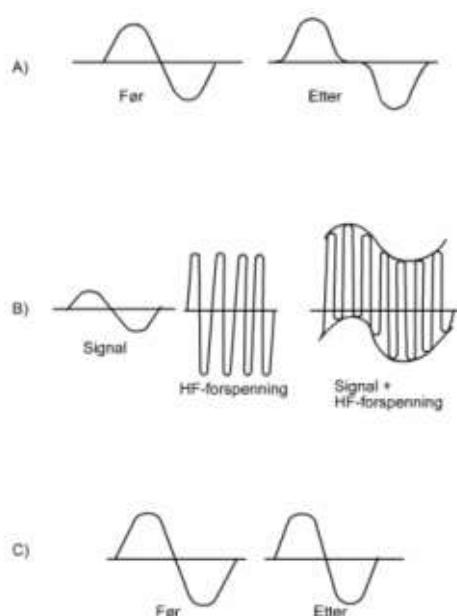


Utgangssignalet før og etter kompensering for frekvensgang.

Vi ser av figurene over at vi ikke har noen respons ved og nært 0 Hz. Vi kan altså ikke uten videre lagre en eventuell DC-komponent i inngangssignalet.

Et annet problem ved magnetisk lagring er fenomenet vi kaller hysteresis. Når vi skifter retningen på magnetiseringsstrømmen i hodene får vi en forsinkelse før dette viser seg i magnetiseringen av partiklene i båndet. Vi kan kanskje beskrive det som en "ketsjupeffekt" hver gang strømmen bytter polaritet, noe som gir forvrengning rundt nullgjennomgangen i signalet. Dette kan vi kompensere for med en høyfrekvent forspenning (eng. bias).

Frekvensforspenningen er typisk en sinus med en amplitude 10 ganger maksimal signalamplitude, og frekvens 3,5 ganger maksimal frekvensrespons til innspillings- og avspillingsforsterkerne, men den ideelle verdien avhenger av typen magnetisk belegg som er brukt på båndet.

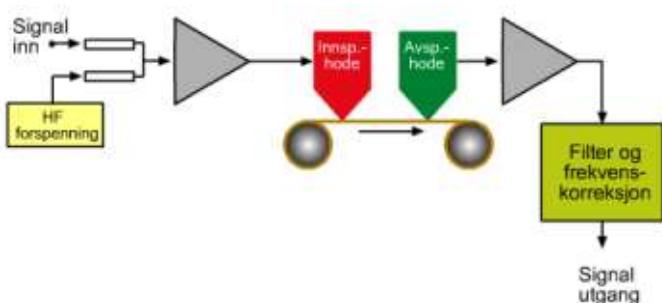


Figuren til høyre viser A) et signal før og etter lagring uten HF-forspenning, B) signaler ved innspilling i et system med HF-forspenning og C) signal før og etter lagring når HF-forspenning er brukt.

Figuren fokuserer på forvrengning, men vi forstår at dynamikken også bedres siden signaler med liten amplitude ga liten eller ingen respons uten forspenning.

Kurveformer i et system med HF-forspenning.

Figuren under viser prinsippskisse av et komplett system for inn- og avspilling med forspenning og frekvenskompensasjon.



Innspilling av magnetbånd med HF-forspenning.

En metode som har vært brukt for analog lagring av svært lavfrekrente signaler, helt ned til DC, er FM-lagring. Da frekvensmoduleres

inngangssignalet, vanligvis i selve opptakeren, før lagring på bånd. Signalet må demoduleres igjen ved avspilling. Siden informasjonen ligger i frekvensen til det lagrede signalet løses også problemene med ulinearitet vi har beskrevet over så lenge frekvensen på det modulerte signalet holdes innenfor et begrenset område. Ulempen med metoden er en betydelig reduksjon i båndbredden på nyttesignalet i forhold til båndhastigheten.

### Utstyr for analog lagring på magnetbånd

Utstyr for spiralformet lagring har i praksis alltid brukt kassetter med fødespole og oppnakspole i en lukket enhet. Flere systemer har vært brukt. Det mest kjente for analog lagring er nok VHS, men spiralformet lagring har i telemetrisammenheng først og fremst vært forbundet med digital lagring.

For lineær lagring har multisporopptaker med løse båndspoler vært dominerende. De 14-spors båndstasjonene som fortsatt er i bruk ved Andøya Space Center bruker spoler med 1 tomme bredde på båndet og typisk 9200 fot bånd på spolen. Mens dette gir god kapasitet ved lave båndbredder, ser vi fra tabellen over at vi kan lagre mindre enn åtte minutter ved maksimal båndbredde på 4 MHz.

# Digital lagring på magnetbånd

Forfatter: Narom

[Magnetbånd og digital lagring \(68179\)](#)



Som en overgang fra analog lagring på magnetbånd har digitale data blitt lagret på samme utstyr som, og med metoder som i prinsippet er analoge.

Etter hvert kom det utstyr hvor også selve lagringsmetoden var digital, og det ble mulig å lagre data med stor tetthet og uten de ulemepene som kjennetegner analog lagring. De høye aksesstidene, som spoling medfører, endres derimot ikke av overgangen til digital lagring og begrenser bruksområdet.

Det samme opptaksutstyret som brukes til å lagre analoge signaler kan også brukes til å lagre digitale data. Lagring av PCM på analoge båndstasjoner er et typisk eksempel. I og med at selve lagringsmetoden fortsatt er analog innebærer også dette lagring av en kurveform. Forskjellen er at informasjonen ikke lengre ligger i den eksakte formen på kurven og forvrenging og variasjon i nivå innefor visse grenser er ikke kritisk. Digitale signaler som er lagret på denne måten må fortsatt tolkes for å identifisere klokkeraten og det enkelte bit.

Det er to forhold å ta hensyn til når digitale data skal lagres til tape på denne måten. Vi bør velge en kode som gir lavest mulig båndbredde, samtidig som vi unngår likespenningskomponenter. Som vi allerede har sett på i sendersidekapitlet betyr det at vi bør velge RNRZ, eventuelt bifasekoding om bitraten er lav.

I båndopptagere hvor også selve lagringsprosessen er digital er klokkeraten gitt av lagringsformatet, hver bit lagres i en såkalt bitcelle på båndet og hver bitcelle er magnetisert på en av to distinkte måter. Om vi ser på LTO (Linear Tape Open) som eksempel er logisk '1' definert som bytte av magnetisk polarisering midt i en bitcelle, og logisk '0' er definert som uendret magnetisering.

## Utstyr og standarder

På samme måte som med analoge data brukes lineær eller spiralformet lagring. Metodene er nærmere beskrevet i artikkelen om analog lagring på magnetbånd. Spiralformet lagring er på mange måter bedre egnet for digital lagring enn for analog, siden digitale data kan pakkes slik at de er tilpasset lengden på sporene.

På skytefeltet brukes opptakere med mekanisme basert på VHS-standarden og som bruker standard S-VHS kassetter med 12,7 mm brede på båndet. Men båndhastigheten er seks ganger høyere enn standard VHS, og data lagres digitalt. Optakerne har innebygd A/D-omformer og kan lagre signaler med båndbredde opp til 12 MHz.

Eksempler på andre standarder som bruker spiralformet lagring er AIT, VXA, Mammoth og DAT (eller DDS). AIT, VXA og Mammoth bruker magnetbånd med 8 mm bredde, mens DAT/DDS bruker bånd med 4 mm bredde. Det finnes flere varianter av disse standardene og flere andre standarder i tillegg. Ingen av disse standardene utvikles lengre aktivt.

DAT/DSS har på grunn av liten størrelse hatt en viss popularitet til portable løsninger før halvlederminne overtok. Bildet til venstre viser en DAT-kassett ved siden av et LR03 batteri.



DAT-båndkassett

Eksempler på standarder som bruker lineær lagring er QIC, DLT, ADR og LTO. Også for lineær lagring finnes det mange standarder og varianter av disse. Det er bare LTO (Linear Tape Open) som fortsatt utvikles og har økende popularitet på bekostning av utdaterte formater. Med digital lagring er det mulig å pakke data mye tettere. Opphavsmann: [Yaolelei](#)

LTO-5 som per 2010 er nyeste generasjon i produksjon har 1280 spor på et bånd som er 12,7 mm bredt. Det gir en kapasitet på 1,5 TB og maks datarate på 140 MB/s, men forskning publisert i 2010 åpner for bånd med langt høyere datatetthet, over 30 TB med samme størrelse på båndkassettene. Dette gjør at bånd fortsatt er et aktuelt lagringsmedium for formål hvor søketid ikke betyr noe.



LTO og ekstern drivenhet

Opphavsmann: [Wikipediabruker Trimbo](#)

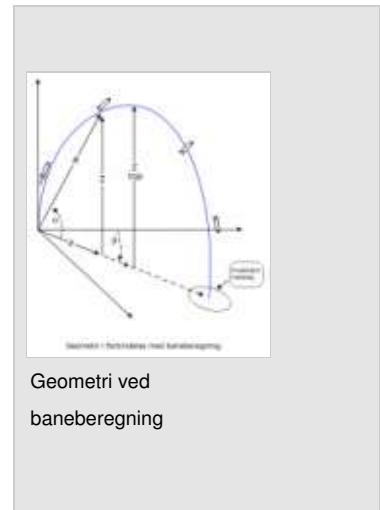
# Baneberegning

Forfatter: Narom

[Baneberegning \(58932\)](#)

Ved vitenskapelige målinger med sonderaketter er det av sikkerhetsmessige grunner avgjørende å ha gode modeller for å forhåndsberegne rakettens bane. Rakettene som skytes fra ASC har ikke noen form for styring og utskytningsvinkelen blir derfor bestemmende for hvor raketten lander. For etterbehandling av data er det i mange tilfeller viktig å vite rakettens posisjon ved de tidspunktene der de interessante målingene er gjort.

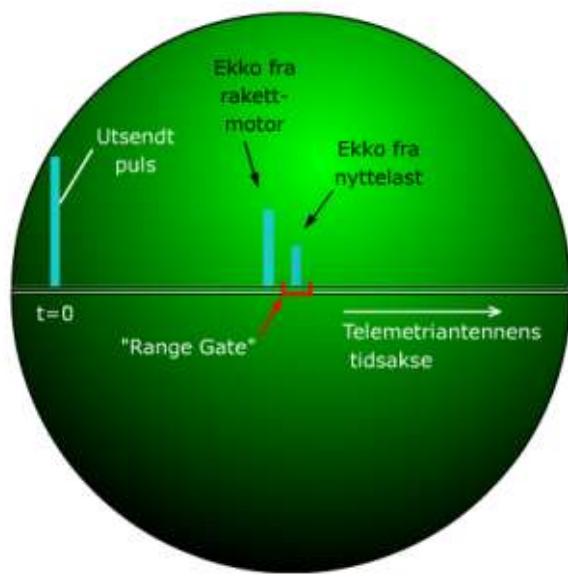
Dette kapitlet gir en innføring i de vanligste metodene for baneberegning på rakter. Som en oversikt gis først en beskrivelse av forskjellige metoder som er i bruk for baneberegninger. I de etterfølgende artiklene vil noen metoder for baneberegning som benytter seg av telemetrisystemet bli beskrevet i detalj.



## Passiv radarmåling

Passiv radar fungerer med at utsendte elektromagnetiske bølger blir reflektert av raketten. Ekkoet fra raketten forteller hvor den befinner seg og avstanden til raketten kan beregnes ved hjelp av tidsforsinkelsen mellom utsendt signal og mottatt ekko.

Passiv radarfølging kan være meget problematisk i forbindelse med flertrinns rakter. I automatisk følgemodus vil radaren ha en tendens til å låse seg på det sterkeste ekko. Dette kommer sannsynligvis fra rakettboosteren. Operatøren må, ved hjelp av "range gating" manuelt velge det svakeste signalet. Dette krever stor erfaring.



Manuell retting av radar

## Aktiv radarmåling

Aktiv radarfølging er basert på bruk av transponder som gir et forsterket ekko tilbake til radarmottakeren. Metoden er god, men det krever ekstra stort og kostbart utstyr i instrumentlasten.

## GPS

Global Positioning System, eller GPS er et navigasjonssystem som fastslår posisjon til en GPS mottaker ved hjelp av flere satellitter i bane rundt jorda. Det sivile GPS systemet har innebygde begrensninger som gjør at det ikke skal kunne brukes for å styre raketter. Derfor vil det kreves en spesiell GPS mottaker for å kunne bruke GPS til posisjonsbestemmelse i raketter.

Se høyre marg for utfyllende informasjon om GPS.

## Dopplermetoden

- To-veis metode: Et signal sendes opp til raketten, mottas og returneres, enten på en egen sender eller via telemetri. Signalet fasesammenlignes på bakken med det utsendte signalet. Denne metoden muliggjør bestemmelse av avstand uten å følge det telemetrerte signalet fra start. Metoden er imidlertid ikke ideell, fordi den innebærer inngrep i eksisterende telemetrisendere og fordi det kreves frekvens- og fasestabile referanser gjennom hele telemetrikjeden.
- En-veis metode: Metoden baseres på en meget stabil oscillator i instrumentlasten. Selv om en absolutt fasemåling er umulig, vil en stabil oscillator gi en relativ Dopplereffekt tilstrekkelig til at en måling av radiell hastighet er mulig. Måling av avstand foregår ved en kontinuerlig integrering av hastighet fra start. Metoden er enkel. Den vil bli beskrevet i egen artikkel om fasemåling.

## Krysspeiling mellom flere telemetristasjoner

Denne metoden forutsetter en relativt stor basisavstand mellom stasjonene, slik at nøyaktigheten ved krysspeiling blir akseptabel. Avstanden fra Andenes til Tromsø telemetristasjon (~120 km) er en ideell avstand. De ganger hvor satellittstasjonen i Tromsø har vært tilgjengelig for følging har dette gitt en signifikant forbedring av banenøyaktigheten. Metoden muliggjør også en korreksjon av en eventuell drift av den stabile oscillatoren i flighten.

## Optisk målfølging

Optisk følging er begrenset av sikt og brukes bare i første fase av banen. Et optisk sikte er som regel koblet til radar- eller telemetriannten for å oppnå målfølging i første fase av banen. Hovedproblemets er høy vinkelhastighet i de første sekunder av flukten, særlig hvis radar- eller TM-antennen er nær utskytningsrampen.

# Dopplereffekten

Forfatter: Narom

[Dopplereffekten \(58902\)](#)

Vi har alle opplevd dopplereffekten på lydbølger. Om vi står i ro ved en motorvei vil vi kunne høre at lyden fra bilene vil endre seg i det bilen passerer. Lyden er lysere når bilen kommer mot oss og blir mørkere når bilen kjører fra oss. Dette er fordi lydbølgene som treffer oss endrer frekvens på grunn av bilens bevegelse i forhold til oss. Den samme effekten vil også virke på alt som sender ut elektromagnetiske bølger som radiobølger og lys. For rakter kan dopplereffekten brukes for å beregne fart og avstand.



Dopplerfrekvens

Opphavsmann: [Charly Whisky](#)

En kilde som sender ut elektromagnetiske bølger beveger seg med en radiell hastighet  $v_r$  i forhold til en observatør som står stille ved et fast punkt. Observatøren vil registrere at frekvensen på de elektromagnetiske bølgene fra kilden vil ha en frekvensforskyvning

$$\Delta f = f \cdot \frac{v_r}{c}$$

Dette kalles dopplerforskyvingen av signalet, hvor

$f$  = frekvensen til kilden

$v_r$  = hastigheten til kilden; vil være negativ dersom kilden beveger seg bort fra observatør

$c$  = lyshastigheten  $(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$

Hvis  $\Delta f$  måles kan vi bestemme den radielle hastigheten  $v_r$  til kilden

$$v_r = \frac{\Delta f \cdot c}{f} = \Delta f \cdot \lambda$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

hvor  $\lambda$  er bølgelengden til kilden.

For et mål som fjerner seg fra mottakeren vil frekvensforskyvingen være negativ.

For et mål som nærmer seg mottakeren vil frekvensforskyvingen være positiv.

Den mottatte frekvensen blir da

$$f' = f + \Delta f$$

der fortegnet til  $\Delta f$  er avhengig av om den radielle hastigheten er positiv eller negativ.

## Eksempel

En rakett sender ut et signal med frekvens 300 kHz. Den frekvensen som mottas på bakken er imidlertid bare 299.999 kHz.

Hva er rakettens hastighet, og er den på vei opp eller ned?

## Løsning

Vi ser her at frekvensen blir redusert med 1 Hz. Det vil si at frekvensforskyvningen er negativ og vi vet derfor at raketten fjerner seg fra bakken, altså den er på veg opp.

Vi bruker så formelen  $v_r = \Delta f \cdot c / f$

og finner at raketten beveger seg bort fra oss med en radiell hastighet på

$$v_r = 1 \text{ Hz} \cdot (300000000 \text{ m/s} / 300000 \text{ Hz}) = 1000 \text{ m/s}$$

# Skråavstandsberegning ved hjelp av fasemåling

Forfatter: Narom

[Skråavstandsberegning ved hjelp av fasemåling \(58940\)](#)

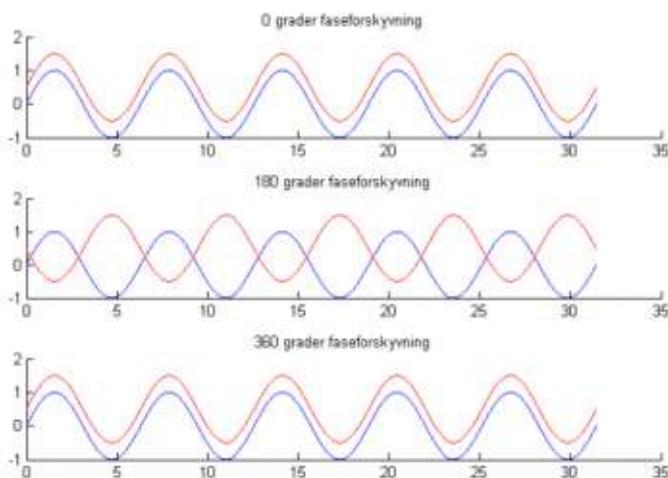
Som en følge av dopplereffekten vil frekvensen på det mottatte signalet fra en raket være avhengig av rakettens radielle hastighet relativt til bakkestasjonen. Denne frekvensfeilen vil over tid gjøre at det mottatte signalet vil få en faseendring målt i forhold til et referansesignal. Denne faseendringen kan måles og brukes til å beregne skråavstanden til raketten.

Vi starter med å klargjøre noen begreper brukt i teksten

- Avstand: Brukes om avstand langs bakken. (Eng: Range)
- Høyde: Den vertikale avstanden mellom raketten og bakken. (Eng Altitude)
- Skråavstand eller radiell avstand: Direkte avstand mellom raketten og telemetristasjonen. (Eng Slant Range)

## Fasemåling

Når to sinuskurver med tilnærmet lik frekvens har lik fase vil bølgetoppene og bunnene være nøyaktig overfor hverandre. Om de har 180 graders faseforskyvning vil en bølgetopp på det ene signalet være over bølgebunnen på det andre. Etter en 360 graders fasegjennomgang er signalene igjen i fase.



## Faseforskyving

Ophavsmann: [Narom](#)

Fasemåling kan for eksempel gjøres ved å bruke klokkepulsen ut fra bitsynkronisatoren og sammenligne dette med et referansesignal produsert på bakken. Dersom raketten for eksempel har en bitfrekvens på 300 kbit/s, vil klokkepulsen ut fra bitsynkronisatoren ha frekvensen 300 kHz. Denne er i utgangspunktet en firkantpuls og må gjøres om til et sinussignal ved hjelp av et lavpassfilter før fasemålingen kan gjøres.

Når raketten begynner å bevege seg vil signalet fra raketten få en dopplerforskyvning  $\Delta f$  i frekvensen. Dette vil medføre at vi over tid får en faseforskyvning mellom signalet fra raketten og referansesignalet på bakken.

I det øyeblikket raketten har beveget seg en avstand tilsvarende en bølgelengde bort fra telemetristasjonen vil vi se at signalene har forskjøvet seg en hel fasegjennomgang ( $360^\circ$ ).

Forholdet mellom avstand og faseforskyvning er gitt av formelen

$$\Delta R = \Delta\Phi \cdot (\lambda / 360)$$

eller  $\Delta R = \Delta\Phi \cdot (\lambda / 2\pi)$  dersom en regner faseforskyvningen  $\Phi$  i radianer.

$\Delta R$  = endring i skråavstand mellom to punkter i rakettflukten

$\Delta\Phi$  = endring i fase mellom to punkter i rakettflukten

Eksempel

En raket med bitfrekvens på 300 kHz beveger seg bort fra telemetristasjonen. Mellom tidspunktene T = 2 s og T = 3 s etter launch har fasemeteret på telemetristasjonen registrert en hel fasegjennomgang 360°.

Hvor stor avstand har raketten beveget seg, og hva var gjennomsnittshastigheten i perioden?

### Løsning

Vi bruker formelen over

$$\Delta R = 360 \cdot (\lambda / 360) = \lambda$$

Raketten har altså beveget seg en bølgelengde  $\lambda = c / f = 300000000 / 300000 = 1000$  m

Gjennomsnittshastigheten blir da  $v = s / t = 1000$  m / 1s = 1000 m/s

Tiden radiosignalet bruker på å bevege seg 1000 m er gitt ved

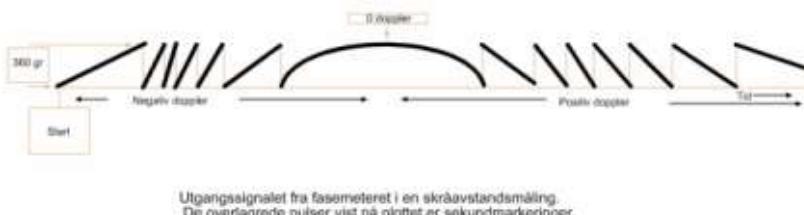
$$t = s / v = 1000\text{m} / 300000000\text{m/s} = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{s}$$

Siden signalet har 300000 svingninger i sekundet vil signalet i løpet av denne tiden gjennomføre  $300000 / s \cdot 3,33 \cdot 10^{-6} \text{s} = 1$  hel periode. Det gir derfor mening at signalet fra raketten har blitt en hel periode forskjøvet mens raketten har tilbakelagt 1000 m.

Denne metoden for avstandsberegning forutsetter at signalene registreres hele tiden fra start. Om en bruker et signal med frekvens på 300 kHz, som i eksemplet over vil det registeres en hel fasegjennomgang per 1000 m. For en raketflukt med en maksimal skråavstand på 100 km vil det registreres 100 fasegjennomganger. Ved signaltap, selv i korte perioder, vil en kunne "miste tellinga" og skråavstandsberegningen kan gå tapt.

### Fasemeter

Instrumentet som registrerer faseforskjellen mellom referansesignalet og signalet fra raketten kalles fasemeter. Utgangen av fasemeteret viser direkte faseendringen, og dermed frekvensendringen som funksjon av tid. Faseendring vises som en sagtannkurve med et hopp fra 0° til 360°. Utgangen representerer direkte en avstandsendring. Eksempel: Ved en klokkeferanse på 30 kHz er bølgelengden  $\lambda = c / f = 3E+8 / 3E+5 = 10000$  m = 10 km. En 360° faseendring representerer derfor 10 km. I første halvdel av banen observeres en negativ dopplerforskyning. Det vil si at raketten fjerner seg fra mottakeren. Med mindre utskytningsvinkelen er uvanlig lav vil avstanden begynne å minke etter at raketten har passert toppunktet av banen, og vi vil observere en positiv dopplerforskyning. Dette kan tydelig sees av kurven i figuren under ved største skråavstand ("0 doppler").



Utgangssignalet fra fasemeteret i en skråavstandsmåling  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Skråavstandsberegning basert på tidsforsinkels..

Forfatter: Rolf Lien, Narom

[Skråavstandsberegning basert på tidsforsinkelse \(59643\)](#)

Skråavstandsberegning basert på tidsforsinkelse er en annen metode for bruk av telemetridata til avstandsberegning. Den krever mer komplisert signalbehandling enn metoden med telling av fasegjennomganger, men gjør baneberegningsene mindre sårbarer for perioder uten mottak av signaler under flukten. Omregningen fra måleverdi til skråavstand er også enklere. Grunnlaget for denne metoden er identisk med metoden basert på fasemåling, og bygger også på observert dopplerforskyving av det mottatte telemetrisignalet.

## Ulempe ved telling av fasegjennomganger

Metoden beskrevet i artikkelen om skråavstandsberegning ved hjelp av fasemåling ga veldig enkel signalbehandling, men om vi mistet signalet i deler av flukten ville vi ikke lengre ha et sikkert avstandsmål når vi igjen mottok signaler. Mistet vi for eksempel signalet like etter start ved avlesing  $200^\circ$  på fasemetret og fikk avlesing  $300^\circ$  når vi igjen mottok signalet, ville vi ikke vite sikkert om signalet hadde forskjøvet seg  $100^\circ$ ,  $460^\circ$ ,  $820^\circ$  eller en annen verdi lik  $100^\circ + n \cdot 360^\circ$ , hvor  $n$  er 0 eller et positvt heltall. Dette skyldes at frekvensen på signalet vi mørte faseforskyvningen til – klokkepulsene – var så høy at vi fikk mange fullstendige fasegjennomganger i løpet av en rakettflukt. Problemet blir ikke mindre av at den delen av flukten hvor det er størst sjanser for å miste signalet er under brenntiden til motoren.

## Løsningen er lavere frekvens

Om signalet vi mører faseforskyvingen på har så lav frekvens at vi ikke kommer over  $360^\circ$  grader faseforskyving i løpet av hele flukten unngår vi dette problemet. Mister vi signalet ved en avlesing på  $100^\circ$  faseforskyving og vi har en avlesing på  $110^\circ$  når signalet kommer tilbake vet vi med sikkerhet at det er faseforskjøvet  $10^\circ$  i mellomtiden.

For at frekvensen skal være lav nok til å unngå mer enn  $360^\circ$  faseforskyving må den tilsvare en bølgelengde som er større enn maksimal skråavstand. For en typisk studentrakett vil det si mer enn 10 km, også en frekvens under 30 kHz. De største raketene som skytes opp fra Andøya går opp mot 1500 km høyde og lander nord for Svalbard. Det gir oss en maksimal skråavstand som er mer enn 1600 km. Dette tilsvarer en frekvens godt under 200 Hz.

## Mer komplisert signalbehandling

Signaler med så lave frekvenser kan vi ikke lett hente fra telemetristrommen som vi kunne med klokkepulsene. Vi må ha en puls i telemetriformatet som gjentas regelmessig og tilstrekkelig sjeldent, og denne må vi kunne skille ut. Til dette trenger vi en dekoder med mulighet til å skille ut ett enkelt bit i riktig ord i formatet.



ASC dekoder

Opphavsmann: [Andøya Space Center](#)



ASC dekoder - tilkoplinger

Opphavsmann: [Andøya Space Center](#)

Bildene over viser dekoder utviklet ved Andøya Space Center. Den må settes opp med beskrivelse av formatet, synkroniseringsord og hvilket bit i hvilket ord som skal trekkes ut.

Dekoderen tilføres NRZ-signal og klokkepuls fra bitsynkronisator og referansesignal fra stasjonær oscillator. Referansesignalet pulstilpasses og sendes ut igjen på utgang A. Pulser med samme frekvens og fase som det valgte bitet i formatet sendes ut på utgang B. Disse signalene sendes til tidsintervallteller for sammenlikning.

## Valg av egnet bit i PCM-formatet

Om vi har mulighet for å definere formatet selv, vil ikke valg av bit være noe problem. Da kan vi legge inn et dedikert bit for skråavstandsmåling i tekniske data. Men ofte er formatet gitt på forhånd uten slike hensyn. Vi må da se etter andre bit som skifter helt regelmessig, og format- og rammeteller inneholder slike bit. Minst signifikante bit i rammetelleren skifter mellom høy og lav verdi fra ramme til ramme, og gir en puls med frekvens lik halve rammefrekvensen. Nest minst signifikante bit gir en puls med frekvens lik en firedel av rammefrekvensen osv. Tilsvarende gir bitene i formattelleren pulser som har frekvens lik brøker av formatfrekvensen. Ramme- og formatrate vil ofte være oppgitt i dokumentasjonen til en nyttelast. Hvis ikke kan vi regne ut disse når vi kjenner bitraten og oppbygningen av formatet.

### Eksempel

Vi har oppgitt at et format har ordlengde 8 bit, 96 ord per ramme og 64 rammer per format. Bitraten er oppgitt til 833,333 kb/s. Hva blir ramme- og formatfrekvens?

Vi har 96 ord á 8 bit per ramme, dvs. at rammefrekvensen er  $833333 / (8 \cdot 96) = 1085$  Hz, og formatfrekvensen er  $833333 / (8 \cdot 96 \cdot 64) = 16,95$  Hz.

Maksimal skråavstand er forhånds beregnet til omtrent 600 km. Er det ett bit i ramme- eller formattelleren som er egnet til avstandsmåling?

### Tidsintervall

Til nå har vi bare snakket om faseforskyving. Dette har vi gjort for å synliggjøre at den viktigste prinsipielle forskjellen på metodene ligger i frekvensen til signalet vi mäter = dopplervirkningen til. I praksis har det vist seg enklere å oppnå høy nøyaktighet i avlesingen av forskyvingen om vi mäter tidsforsinkelse i stedet for faseforskyving. Valg av tid som måleenhet gjør også beregningen av avstand enklere, siden avlest tidsforsinkelse multiplisert med lyshastigheten gir oss avstanden direkte.

Bølgelengden til signalet vi skal bruke til avstandsmåling må være minimum lik maksimal skråavstand, altså 600 km. I tillegg vil vi gjerne ha en god sikkerhetsmargin.

Vi regner ut at en bølgelengde på 600 km tilsvarer en frekvens på 500 Hz.



Tidsintervallteller  
Opphavsmann: [FLUKE](#)

Om vi ser på minst signifikante bit i rammetelleren gir den en frekvens på 1085 /  $2 = 542,5$  Hz. Dette gir altså for høy frekvens.

Neste bit i telleren gir  $1085 / 4 = 271,25$  Hz, altså en bølgelengde på 1106 km. Dette er tilstrekkelig og gir en god sikkerhetsmargin.

Vi kan selvsagt bruke en enda lavere frekvens, men en veldig lav frekvens gjør det vanskeligere å se faseforskyvningen på et oscilloskop mens vi tester oppsett av dekoder og referanseoscillator.

Instrumentet til venstre kan, i tillegg til andre funksjoner, brukes både som fasemeter og til å māle tidsintervall. Til avstandsmåling ved Andøya Space Center brukes instrumentet som tidsintervallteller. Måleverdiene leses ut fra instrumentet over GPIB og sendes til skytefeltets baneberegningssystem.

For baneberegnning må vi trekke fra tidsforsinkelsen  $\Delta t_i$  vi mālte i startøyeblikket for å få endringen i skråavstand,  $\Delta R$ .

$$\Delta R = (\delta t - \delta t_i)c$$

\textbf{Eksempel}

Et stykke ut i flukten leser vi av en tidsforsinkelse  $\Delta t$  på 450  $\mu$ s. Vi hadde notert at tidsforsinkelsen ved start,  $\Delta t_i$  var 50  $\mu$ s. Hvor mye har skråavstanden  $\Delta R$  endret seg siden start?

$$\Delta R = \left(450 \cdot 10^{-6} - 50 \cdot 10^{-6}\right) \cdot 3 \cdot 10^8 = 120 \text{ km}$$

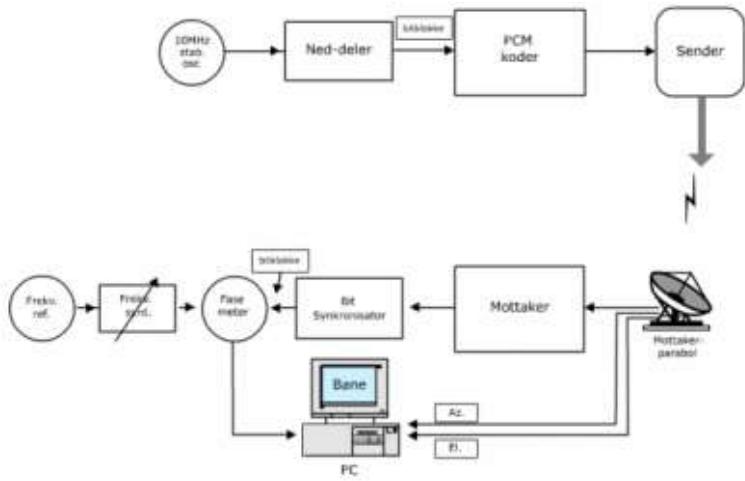
# Baneberegning basert på antennepokevinkler og ..

Forfatter: Narom

[Baneberegning basert på antennepokevinkler og skråavstand \(58942\)](#)

For å bestemme banen til en rakett kan en utnytte telemetriantennens automatiske målfølging. Antennen vil med sin elevasjon- og asimutvinkel peke ut retningen til raketten så lenge den følger raketten. Denne informasjon sammen med skråavstanden er nok til å fastslå raketts posisjon i rommet.

Blokdiagrammet under beskriver prinsippet for baneberegning ved hjelp av skråavstandsberegning basert på fasemåling samt telemetriantennens pekevinkler.



Prinsipp for baneberegning basert på radiell avstand og TM-pekevinkler.

Baneberegning med TM-data

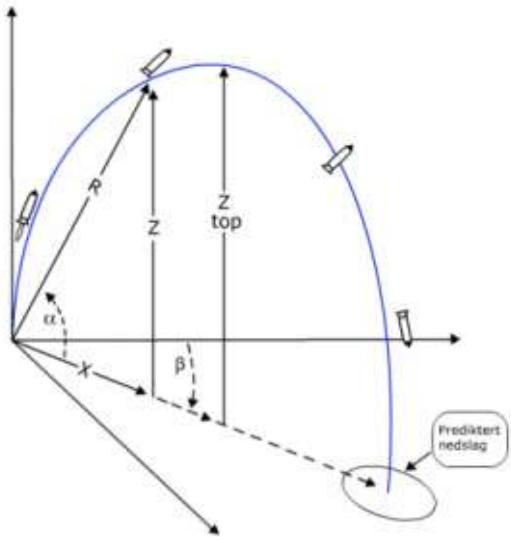
Opphavsmann: [Narom](#)

Telemetriantennen har vinkeldekodere som sender informasjon om antennens asimut- og elevasjonsvinkel til et datasystem som lagrer og behandler disse sammen med informasjonen fra fasemetret.

For å kunne beregne hele raketts banen trenges fire parametere

```
\begin{itemize}
\item Avstand, $R$
\item Elevasjon, $\alpha
\item Asimut, $\beta
\item Tid, $t
\end{itemize}
```

I figuren under er avstanden langs bakken betegnet \$X\$, høyden \$Z\$ og skråavstanden \$R\$.



Geometri i forbindelse med baneberegning.

#### Geometri ved baneberegning

Ophavsmann: [Narom](#)

Fra figuren kan vi se at størrelsene  $Z$  og  $X$  kan regnes ut fra trigonometri ved hjelp av de kjente vinklene.

Høyden  $Z_t$  beregnes som en funksjon av tiden  $t$  fra

$$Z_t = R_t \sin(\alpha_t)$$

Horisontalavstanden  $X_t$  finnes fra

$$X_t = R_t \cos(\alpha_t)$$

Asimutvinkelen ( $\beta_t$ ) kan så benyttes sammen med horisontalavstanden  $X$  for å bestemme nøyaktig posisjon av fotpunktet til  $Z$ .

#### Begrensninger

For at posisjonsbestemmelsen skal bli nøyaktig ut i fra denne metoden kreves det at antennen til en hver tid peker nøyaktig mot raketten. Dersom antennen har stor åpningsvinkel kan en risikere at de vinklene som mottas er noen grader feil.

Ved skråavstandsberegning basert på dopplereffekten er det av avgjørende betydning at referanseoscillatoren i instrumentlasten har optimal kortidsstabilitet. Den interessante del av en typisk rakettflukt varer fra 300 til 600 sekunder (5 til 10 minutter).

En absolutt feil i frekvensen behøver ikke ha noen alvorlige konsekvenser. Vi kan nullstille denne like før start med frekvenssyntetisatoren på bakken. En frekvensforandring under flukten er derimot alvorlig. Derfor vil oscillatorens mekaniske og termiske egenskaper i de få minutter flukten varer være avgjørende.

Miljøprøving av oscillatoren er derfor viktig. Prøving på ristebord og i temperaturskap har vist at det er fullt mulig å skaffe oscillatorer med en kortidsstabilitet på bedre enn  $\delta f/f < 1 \cdot 10^{-8}$ . Det vil si en  $\delta f$  på 0,01 Hz ved en standard referanseoscillator på 10 MHz hvilket igjen vil si en endring på 360 fasegrader på mer enn 100 sekunder.

Vi kan beregne en fiktiv hastighet ved en feil i frekvens  $\delta f$

$$v' = \frac{\delta f}{f} \cdot c = \frac{\delta f/n}{f/n} \cdot c$$

hvor  $n$  = ned-delingsfaktor fra stabil oscillator og bakkereferanse (f.eks. fra 10 MHz).

#### Eksempel

Ved en referanseoscillator med kortidsstabilitet på  $\delta f/f = 1 \cdot 10^{-8}$  gir dette

$$v' = (1 \cdot 10^{-8}) \cdot c = \pm 3 \text{ m/s}$$

hvor  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Etter omrent 100 sekunders flukttid gir dette en feil i skråavstanden på

$$R' = 3 \cdot 100 = \pm 300 \text{ m}$$

Frekvensavvik på grunn av mekaniske og termiske påvirkninger i boostfasen er ikke lett å beregne. For å kontrollere dette er det blitt tatt ned signaler samtidig fra to TM-stasjoner, ASC og Tromsø telemetri stasjon (avstand ca 120 km). I Tromsø er det ikke mulig å få signalet helt fra start på grunn av jordkrumming og fjell. Det er likevel mulig å få et godt estimat av oscillatorfeilen. Det kan vises at oscillatorfrekvensen kan elimineres i dopplerlikningen ved samtidig mottaking fra to eller flere stasjoner med stabil referanse. Forutsetningen er en rimelig stor basisavstand. I tillegg får en krysspeilingsinformasjon ved å registrere pekevinklene fra begge stasjoner. Når radar er tilgjengelig er det også

gjort sammenlignende målinger. Resultatet av disse målingene er en absolutt feilmargin ved disse målingene på ca  $\pm$  100 m for en rakett med apogeum (topp høyde) på ca. 200 km.

# TPS – Baneberegningssystemet på ARS

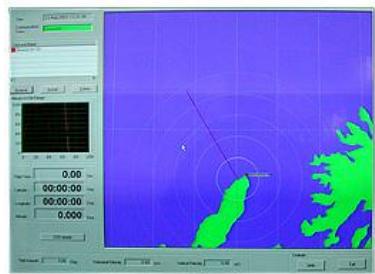
Forfatter: Narom

[TPS – Baneberegningssystemet på ASC \(58944\)](#)

Baneberegningssystemet som er i bruk ved ASC kalles Trajectory and Position System (TPS). Systemet er basert på skråavstandsmåling ("slant range"), pekevinkler fra ASC' 10 og 20 fots antenner samt radar. Hensikten med systemet er å kunne presentere rakettbaner i sann tid. Spesielt er dette viktig i forbindelse med bering av instrumentlaster.

Dette systemet tar inn data fra alle tilgjengelige følgesystemer. Vi har ett sett med målinger:  $R$  (avstand),  $\alpha$  (elevasjon),  $\beta$  (asimut) og  $t$  (tiden målt fra start). Disse går gjennom følgende prosess: Hver individuell måling omregnes til horisontalavstand,  $X$ ,  $Y$  og høyde  $Z$ . Vi benytter så lineær regresjon for  $X$  og  $Y$  og kvadratisk regresjon for  $Z$ . Regresjonen, eller utjevning som vi også kan kalle det, går over et bestemt antall målinger. For hvert slike sett av målinger får vi da ut midlede verdier  $X$ ,  $Y$  og  $Z$ , og også de tidsderiverte av disse størrelsene. Dette gjøres for hvert av følgeinstrumentene og de endelige verdier tilsvarer et veid middel av verdiene fra hvert av instrumentene.

Vi har nå en tilstandsvektor for rakettbanen ved en bestemt tid som er valgt som midtpunktet av regresjonsintervallet. Dersom dette er en tid etter siste brennfase, kan vi bruke denne utjevnede tilstandsvektoren til å forutsi den videre bane. Den videre banen beregnes ut fra forutsetning om at raketten vil følge en ellipsebane med ett av brennpunktene i jordens massesenter. For å oppnå større nøyaktighet kunne vi brukt numerisk integrasjon, noe som gir større nøyaktighet. Med dagens raske prosessorer er dette mulig og vil bli benyttet i neste versjon av TPS. En slik prediksjon av banen, fremover i tid, ut fra tilstandsvektoren i øyeblikket, kalles gjerne IIP, Instant Impact Prediction. Dette er viktig i forbindelse med bering av instrumentlasten.



Plott av rakettbane  
Opphavsmann: [Narom](#)

TPS systemet presenterer den aktuelle banen på en skjerm i kontrollsenteret, hvor operasjonsledelse og sikkerhetspersonell befinner seg. Her vises høyde mot tid og breddegrad mot lengdegrad på forskjellige plot. Figuren til venstre viser data slik de blir presentert i sann tid. TPS nøyser seg ikke med å forutsi nedslagspunkt. TPS beregner også aktuelle pekevinkler for aktuelle observasjonsposter. Det kan gjelde f.eks. radar, lidar, kamera eller andre mulige følgestasjoner.

Mister operatøren målet av en eller annen grunn, kan han benytte prediksjonene fra TPS til å finne det igjen.

## Etterbehandling av data

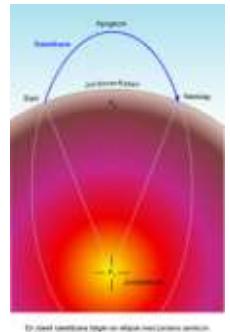
For å finne den mest sannsynlige banen, kreves etterbehandling av følgedataene. Dersom vi ikke har svært gode følgedata, er det best å benytte en modell for banen og tilpasse parametre i denne banen slik at de observerte følgedata blir gjengitt best mulig. Kravet til denne modellen må da være at den er i stand til å representere banen med en nøyaktighet som er lik eller bedre enn feilen som skyldes støyen fra målingene.

Alle rakettbaner kan representeres ved en elliptisk bane som følger Keplers lover. Ellipsens ene brennpunkt befinner seg i jordens sentrum. En komplikasjon er at nær jordoverflaten må en ta hensyn til luftmotstanden. Ved etterbehandling av data lages modeller som i større eller mindre grad tar hensyn til dette.

Det kan anvendes to forskjellige koordinatsystemer

- Et system hvor alle koordinater er fiksert relativt til en fast ikke roterende jord.
- Et system hvor alle parametre relateres til en jord som roterer under banen.

Bruken av det ene eller det annet system er avhengig av krav til nøyaktighet og rakettbanens topphøyde over jorden.



Ideell rakettbane  
Opphavsmann: [Narom](#)

Modellene er som følger:

- Banen representeres ved en kasteparabel. Her kan feilen være stor, 10–20 km.
- Banen representeres ved en ellipse. Modellen blir unøyaktig på grunn av Jordens flattetrykking og luftmotstanden. Feilen kan bli 1–5 km.
- Banen representeres ved numerisk integrasjon der tyngdekraft og luftmotstand er inkludert, samt en modell for feil ved at mottakerantennen ikke står plassert eksakt i forhold til utskytningsrampen.

For å få en komplett bane brukes den siste modellen ved ASC. Følgende fremgangsmåte benyttes

1. Velg et tidspunkt  $t_1$ , like etter at øvre rakettrinn er utbrent.
2. Anta en tilstandsvektor ved denne tiden  $x, y, z, dx/dt, dy/dt, dz/dt$  et kjent koordinatsystem. Denne tilstandsvektoren kan hentes fra nominell bane eller fra sanntidsbanen.
3. Beregn en bane med denne tilstandsvektoren som startbetingelse. Teoretiske verdier som tilsvarer målte verdier av  $R$  (skråavstand),  $\alpha$  (elevasjon) og  $\beta$  (asimut) beregnes for alle observasjonstider.

For tiden brukes full integrasjon av alle parametere fra start til nedslag. Ved sammenligning av observerte og beregnede verdier finnes et nytt estimat for tilstandsvektoren ved tiden  $t_1$ . Ved å gjenta denne prosessen noen ganger oppnås tilstrekkelig samsvar mellom beregnede og målte verdier.

I tillegg til å bestemme tilstandsvektoren ved tiden  $t_1$  eller for et annet tilsvarende parametersett, kan modellen også avsløre og korrigere for feilinnstilling av de forskjellige antenner, og også finne eventuelt avvik mellom referansefrekvens og frekvens for oscillatoren ombord i nyttelasten. Komplett bestemmelse av alle disse feilene kan bare gjøres ved å benytte mer enn en følgestasjon, helst tre. Likevel kan banebestemmelsen være akseptabel med bruk av bare en enkel telemetristasjon som referanse. Dette gjelder i alle fall når det gjelder raketter med lav topophøyde, dvs. under ~150 km.

Etter at den "best mulige banen" er bestemt, lages en presentasjonsmodul i form av enkle tidspolynomer, som tilpasses høyde, geografisk lengde og geografisk bredde. Disse distribueres til brukerne som kan benytte dem i forbindelse med egen programvare. Et PC-basert presentasjonsprogram følger gjerne også med.

## Måling av skråavstand ved hjelp av fasemeter

Forfatter: Narom

[Måling av skråavstand ved hjelp av fasemeter \(61832\)](#)

Målet med øvelsen er å demonstrere hvordan faseforskjellen mellom en lokal referanseoscillator og oscillatoren i en rakettnyttelast kan brukes til å måle hastighet og avstand til en nyttelast.

Øvelsen er vedlagt som et PDF-dokument. (Engelsk!)

# Romfysikk

## Romfysikk – det spennende fysikkfaget

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Romfysikk – det spennende fysikkfaget \(26095\)](#)

### Forord

Disse digitale læremidlene er skrevet etter den nye læreplanen i faget romfysikk for landslinjen Vg3 Romteknologi. Læremidlene inneholder følgende temaer:

- Romfysikk - det spennende fysikkfaget
- Mekanikk
- Atom- og kjernefysikk
- Elektromagnetiske felt og elektromagnetisk stråling
- Elektromagnetisk stråling og partikkelstråling fra sola
- Atmosfærens sammensetning og egenskaper
- Klima og miljøfysikk
- Jordas permanente magnetfelt
- Nordlysfysikk
- Astrofysikk
- Atmosfære-, ionosfære- og nordlysinstrumenter
- Formler og tabeller



En detaljert omtale av hva som registreres og målemetoder for instrumenter ved Andøya Space Center (ASC), finnes i temaet "Atmosfære-, ionosfære- og nordlysinstrumenter". "Formler og tabeller" inneholder en liste over konstanter, måleenheter og formler som er aktuelle innenfor romfysikk. Innledningen gir en kort oversikt over hva romfysikk handler om. Ellers følger opplegget det som er standard for lærebøker i fysikk. Viktige definisjoner, naturlover og konklusjoner finnes i hele teksten. I tillegg finnes korte sammendrag – som en slags huskeliste. Det er viktig å regne gjennom oppgavene – som står til slutt i hvert tema, for å komme bedre inn i fysikken. Når teksten er lest og forstått, vil sammendragene være spesielt viktige for en hurtig repetisjon.

I romfysikken må vi arbeide både med meget store og knytt små dimensjoner og avstander for å forstå fysikken. For å få en følelse av dette enorme spranget i avstander fra atomkjerner ( $10^{-15} \text{ m}$ ) til en astronomisk enhet ( $1\text{Au} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$ ), har vi tatt med en illustrasjon.

Flere steder finnes koblinger til fordypningsstoff. Dette er ikke pensum. Slikt stoff går litt dypere inn i et spesielt tema. Det viser f. eks. hvordan man matematisk kan komme fram til resultater som er gitt i teksten. Her finnes også forklaringer på kjente fenomener i naturen, samt korte historiske opplysninger.

Vi håper at mange vil studere tilleggsstoffet eller deler av det. Jo dypere en trenger inn i romfysikken, desto mer spennende blir faget.

## Kort om innholdet i romfysikken og historie

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Kort om innholdet i romfysikken og dens historie \(26487\)](#)

Dette temaet inneholder:

- Jordas magnetfelt
- Nordlyset
- Ionosfæren - den øvre atmosfære
- Klassisk fysikk
- Relativitetsteorien

# Jordas magnetfelt

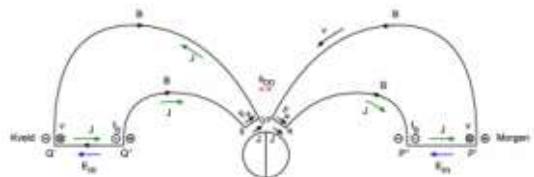
Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Jordas magnetfelt \(26100\)](#)

Den vitenskapelige utforskningen av jordas magnetfelt startet med engelskmannen William Gilberts (1544–1603) bok "De Magnete" fra år 1600. Ved hjelp av enkle observasjoner, magnetiske modeller og teoretiske spekulasjoner kom han fram til at "... jorda selv er en stor magnet".

Systematiske observasjoner av jordmagnetfeltet begynte for 200 år siden. Pioneeren i norsk naturvitenskap, Professor Christopher Hansteen (1784–1873) vant internasjonal oppmerksomhet for sine grundige observasjoner av feltet. Det var den tyske forskeren, Professor C. F. Gauss (1777–1855) som omkring 1840 utarbeidet dipolteorien for magnetfeltet som dominerte fram til romalderen begynte med Sputnik I, 4. oktober 1957.

Professor Kristian Birkeland (1867–1917) bidro sterkt til at fysikken knyttet til variasjonene i magnetfeltet kom i fokus. Omkring 1900 demonstrerte han – både teoretisk og eksperimentelt, at forstyrrelsene i feltet skyldes intense elektriske strømmer i den øvre atmosfæren innenfor nordlyssonene. I tillegg foreslo han at elektriske strømmer parallelt med magnetfeltet, fra verdensrommet til nordlysområdene, var viktige og nødvendige for å forklare observasjonene. Slike strømmer kalles – etter at de ble observert med satellitter, Birkelandsstrømmer. En modell av strømmene er avbildet på 200-kronerseddelen. Variasjonene i jordmagnetfeltet er av stor interesse i romfysikken.



Moderne illustrasjon av Birkelandsstrømmene på jordas kvelds- og morgenseide. Strømmene opp og ned langs magnetfeltlinjene skifter retning fra kveldsiden til morgen og de forbinder ionosfæren med magnetosfæren.

Opphavsmann: [Narom](#)

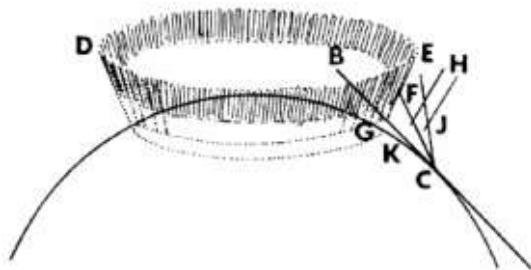
# Nordlyset

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Nordlyset \(26429\)](#)

De eldste, sikre nordlysbeskrivelsene går tilbake til boka Kongespeilet fra ca. år 1230. Her har denne glorie av himmellys for første gang fått et eget navn, nordurljos, og nordlyset er detaljert omtalt. Forfatteren setter også fram en teori om nordlyset som ikke så sin like før 500–600 år senere.

Den vitenskapelige utforskningen av nordlyset begynte for ca. 200 år siden. Professor Hansteen konkluderte omkring 1820: "Det må være en viktig forbindelse mellom nordlys og jordas magnetisme." Anders Celsius (1701–1744) og hans assistent O. P. Hiorter (1696–1750) fant at kompassnålen beveget seg ved store nordlysutbrudd. Omkring 1830 ble det foreslått at nordlyset danner en sammenhengende ring rundt polarkalotten. Først etter 1960 ble denne ringen, som vi i dag kaller nordlysovalen, oppdaget og godt dokumentert.



Kopi av Hansteens originale skisse fra 1827 av nordlyssringen. Illustrasjonen ble også benyttet til å beregne høyden av nordlyset, men metoden hadde mange svakheter.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Omkring 1850, fra studier av nordlysets polarisasjon, ble det klart at nordlyset måtte være et selvlysende fenomen; dvs. det var ikke refleksjon av sol eller månelys. I siste halvdel av det 19. århundre ble det klart at nordlysaktiviteten og intensiteten var størst i en ca. 500 km bred sirkelformet sone omtrent 2500 km fra magnetpolene. Det var den sveitsiske fysikeren Hermann Fritz, i boka "Das Polarlicht" fra 1881, som først dokumenterte dette.

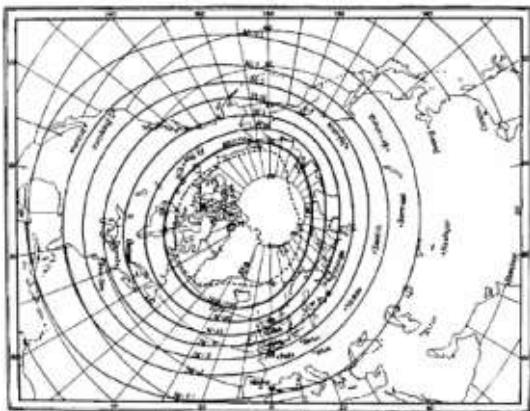


Faksimile av en side fra Kongespeilet med oversettelse av A. Hellevik (1965) til norsk. I denne boka som er skrevet som en samtale mellom far og sønn, kan man lese vikingenes tanker om nordlyset.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Faksimile av en side fra Kongespeilet med oversettelse av A. Hellevik (1965) til norsk. I denne boka som er skrevet som en samtale mellom far og sønn, kan man lese vikingenes tanker om nordlyset.  
**NAROM**



Kristian Olaf Bernhard Birkeland (1867–1917). Professor i fysikk ved Universitetet i Oslo fra 1898 til 1917. Han var en usedvanlig begavelse, med sterk trang til forskning. Han innførte den moderne fysikk i Norge.  
Opphavsmann: [Public domain](#)



Fritz' originale skisse av nordlyssonen fra 1881. De heltrukne kurvene viser steder på den nordlige halvkulen med samme sannsynlighet for å observere nordlys. Maksimalsonen strekker seg rundt den geomagnetiske polen og passerer i vår del av verden utenfor kysten av Nord-Norge.

Det var de norske pionerene, professorene Birkeland, Størmer og Vegard som avslørte mange av nordlysets karakteristiske egenskaper. Her skal vi nøyne oss med å gi noen stikkord om deres hovedbidrag.

Birkeland lanserte den første realistiske nordlysteori i 1896. Hovedideen var at elektrisk ladde partikler fra sola var kilden til nordlys. Mest imponerende var nok likevel at Birkeland demonstrerte sin nye teori ved å lage kunstig nordlys i laboratoriet ved hjelp av de berømte terrellaeksperimentene. Dette er også avbildet på 200-kroner seddelen. Birkeland argumenterte også for nødvendigheten av samtidige, koordinerte og globale observasjoner. Han organiserte flere storstilte nordlysobservasjoner.

Professor Størmer bestemte nordlyshøyden. Han utarbeidet den første nordlysatlas og kartla nordlysets geografiske utbredelse. Størmer testet Birkelands nordlysteori teoretisk. Han regnet nemlig ut banene til elektriske partikler fra sola til jorda.

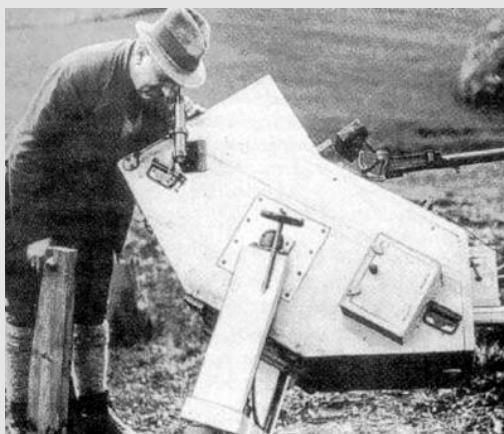
Professor Vegard kartla fargene i nordlyset. Han var også den første som påviste at positive hydrogenioner, protoner, kan generere nordlys.



Carl Fredrik Mülertz Størmer (1874–1957). Professor i matematikk ved Universitetet i Oslo fra 1904 til 1944. Han var en aktiv og ivrig nordlysforsker.  
Opphavsmann: [Public domain](#)



Hannes Olof Gösta Alfvén (1908–1995) er den kjente svenske nordlysforskeren som fikk Nobelprisen i fysikk.  
Opphavsmann: [Public domain](#)



Lars Vegard  
Opphavsmann: [Public domain](#)

Lars Vegard (1880–1963). professor i fysikk ved Universitetet i Oslo fra 1918 til 1950. Her er han avbildet med sin store nordlysspektrograf.

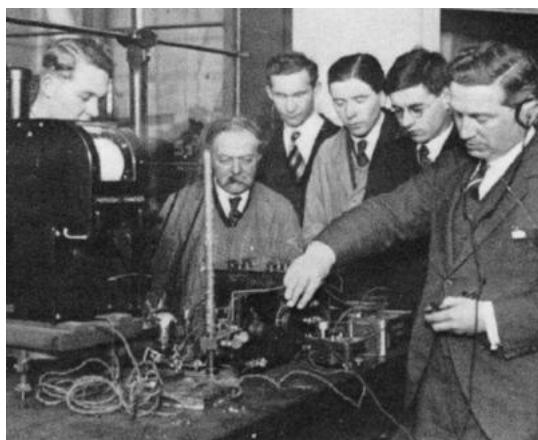
## Ionosfæren - den øvre atmosfære

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Ionosfæren - den øvre atmosfære \(26436\)](#)

Den øvre atmosfære mellom ca. 60 og 500 km, kalles ionosfæren. I 1901 klarte den italienske forskeren G. Marconi å sende radiosignaler fra Cornwall i England til Amerika. For å forklare utbredelsen over så lange avstander ble det foreslått at den øvre atmosfære måtte virke som et speil, som reflekterte bølgene tilbake til jorda.

De første detaljerte studier av ionosfæren ble utført av den kjente britiske forskeren, Sir Edward Appleton (1892–1965). I perioden mellom 1920 og 1930 utførte han en mengde forsøk med en teknikk som i dag kalles radioekkoforsøkene, dvs. at han sendte radiobølger med ulike frekvenser vertikalt opp i atmosfæren. Så mørte han intensiteten av de reflekterte signalene sammen med tiden det tok før signalene kom tilbake til jorda. Alle observasjoner av ionosfærrens høyde og elektrontetthet før romalderen, dvs. før 1957, ble utført med radiobølger.<sup>1</sup>



Sir Edward Victor Appleton (1892–1965) fikk Nobelprisen i fysikk 1947 for grunnleggende arbeid over utbredelsen av radiobølger.

Opphavsmann: [Public domain](#)

Ionosfærestudiene demonstrerte tydelig at den øvre atmosfære var elektrisk ledene – dvs. at det måtte finnes store mengder frie elektroner i atmosfæren over 60 km. Det finnes to markerte topper i ionosfærrens elektrontetthet – en omkring 120 km og en annen nær 250 km. For sine viktige undersøkelser av ionosfæren fikk Appleton Nobelprisen i fysikk i 1947.

## Relativitetsteorien

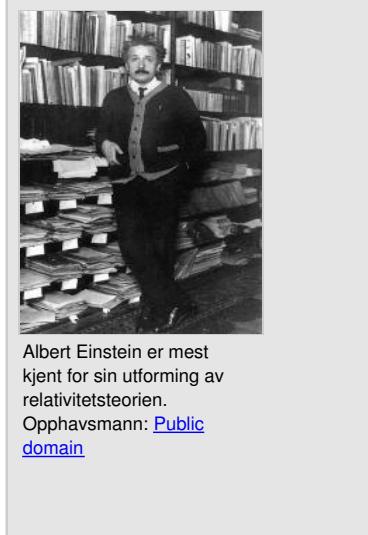
Forfatter: Narom

[Relativitetsteorien \(27068\)](#)

Jorda beveger seg i en ellipsebane rundt sola med en hastighet på ~ 30 km/s. Fra forsøkene med relativ bevegelse, burde man forvente at lys utsendt fra jorda i dens bevegelsesretning, skulle ha en hastighet på ~ 330.000 km/s, mens lys utsendt i motsatt retning skulle bevege seg med ~ 270.000 km/s.

I tidsrommet 1880 til 1910 ble det utført mange eksperimenter for å måle lysets hastighet. Målingene av  $c$  viste ingen retnings-avhengighet. Det var som om jorda skulle være i ro. Men dette var umulig ut fra gravitasjonsteorien. Sola ville da ha trukket jorda inn til seg på kort tid.

I begynnelsen av det 20. århundre publiserte Albert Einstein (1879–1955) den spesielle relativitetsteorien. Et av postulatene i teorien er: Lys i det tomme rom (vakuum) beveger seg alltid med konstant hastighet uavhengig av bevegelsen til kilden. Denne påstanden er tilsynelatende i strid med den relative bevegelsen i mekanikken som Galilei og Newton introduserte, men Einstein fant en forklaring.



Albert Einstein er mest kjent for sin utforming av relativitetsteorien.  
Opphavsmann: [Public domain](#)

Det fundamentalt nye var at ved høye hastigheter, nær lyshastigheten, kan vi ikke bruke Newtons bevegelseslære. Den gjelder bare for objekter med relativ lav hastighet, mye mindre enn 10 % av  $c$ .

Den mest betydningsfulle konsekvens av relativitetsteorien er Einsteins berømte formel, som gir en sammenheng mellom masse og energi.

$$E = m c^2$$

hvor  $c$  er lyshastigheten (i m/s),  $m$  legemets masse (i kg), mens  $E$  er energien i joule (J). Et legeme med masse  $m$  inneholder en enorm energi, selv om  $m$  er liten. Dette skyldes at kvadratet av  $c$  er et veldig stort tall. Om bare et milligram masse blir frigjort får man nok energi til et vanlig norsk hjem for ett år.

Einstein argumenterte også for at lys avbøytes i et tyngdefelt. Det betyr at lysstrålene har masse. En slik avbøyning, selv om den er meget liten, stemmer med observasjoner.

# Romfysikk

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Romfysikk \(27070\)](#)

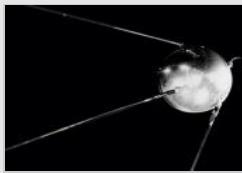
I romfysikken skal vi konsentrere oss om rommet mellom jordas værsone (som strekker seg opp til ca. 10 – 15 km) og helt ut til sola. På engelsk kalles dette fagfeltet *Space Physics*. På norsk kalles det rom- eller plasmafysikk.

Vi mennesker setter merkelapper på ulike tidsperioder, som f. eks. stein- eller bronsealderen. Perioden vi nå er inne i, dvs. etter at Sputnik I ble sendt opp 4. oktober i 1957, kan med full rett kalles romalderen.

Menneskene har gjennom tusener av år vært opptatt av vårt solsystem. Nysgjerrighet er en viktig drivkraft som fører til ny vite. Før 1950-årene var våre kunnskaper og vår fysikalske forståelse av verdensrommet meget begrenset. Takket være romforskningen samt nye teleskoper og kraftige radarer på bakken, er vårt solsystem i dag kartlagt i stor detalj. De mange raketter, satellitter og romsonder som kretser mellom jorda og sola har økt våre kunnskaper enormt og gitt oss ny vite. Romforskningen har vært særlig framgangsrik de siste 20 – 30 årene.

Hovedmålet med dette læreverket er å formidle, på en deskriptiv måte, hva vi i dag vet om jord-solsystemet. De fysikalske prosesser som foregår i vårt solsystem har vist seg å være av generell og fundamental karakter. Samme type fysikk kan derfor senere også brukes til studier av eksotiske objekter som galakser, kvararer, svarte hull – ja, de fleste himmellegemer. En faglig forståelse av romfysikken er også viktig for vår forvaltning av jordas natur og ressurser – som er så viktig for vår felles framtid. Derfor har også klima- og miljøfysikken fått en sentral plass i læreverket.

Den klassiske fysikken som er nødvendig for å tolke *in-situ* målingene i verdensrommet, er omtalt i temaene "Mekanikk", "Atom- og kjernefysikk" og "Elektromagnetiske felt og elektromagnetisk stråling". Romfysikken begynner med solas elektromagnetiske stråling og partikelstråling. Energiproduksjonen er viktig. Partikelstrålingen fra sola, solvinden, er den viktigste parameteren. Denne gassen av elektrisk ladde partikler, elektroner og ioner fra solas korona, "blåser" kontinuerlig mot jordas nære verdensrom, kalt magnetosfæren.



Den sovjetiske satelitten Sputnik 1 ble skutt opp 4. oktober 1957, og var dermed den første kunstige satelitten i bane rundt Jorda. Dette regnes som starten på romalderen. Satelitten veide 83,6 kg og hadde en omløpstid på 96,2 minutter.

Opphavsmann: [NASA](#)



Sol-jord-systemet. Sola sender ut en kontinuerlig strøm av partikler som kalles solvinden. Noe av solvinden kommer ned i atmosfæren og danner nordlys, selv om jorda er delvis beskyttet mot denne partikel-strømmen av sitt magnetfelt.

Opphavsmann: [NASA](#)

Solvinden er kanskje den viktigste oppdagelsen i romalderen. Den er "kommunikasjonsskanalen" fra sola til jorda - dag og natt. I kapittelet "Atmosfæreens sammensetning og egenskaper" diskutes jordas atmosfære. Dens sammensetning og egenskaper er viktig for alt liv på jorda. Hvordan strålingen fra sola vekselvirker med atmosfæren og gjør den elektrisk ledende, er diskutert i kapittelet om nordlyset, hvor også egenskapene til jordas øvre atmosfære (dvs. over ca. 60 km) presenteres.

Miljøfysikken og klimaproblemene diskutes under temaet "Klima og miljøfysikk". Verdens øyne har de to siste tiårene blitt fokusert på miljøproblemene. Uten en faglig forståelse av de fundamentale prosesser vil vår forvaltning av jordas natur og dens ressurser bli dårlig. Det er derfor viktig at moderne forskning relateres til miljøproblemene. Vi tar opp problemer med energiressurser som fører til forurensning og hvordan dette skaper klimaproblemer.

Jordas magnetfelt er hovedtemaet i temaet "Jordas permanente magnetfelt". Både langsomme og hurtige variasjoner i feltet diskutes. Her omtales også hvordan magnetfeltet skjermer livet på jorda for den energirike partikkelenstrålingen fra universet.

# Vårt nye verdensbilde

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Vårt nye verdensbilde \(27071\)](#)

I det følgende skal vi kort nevne noen av de viktigste oppdagelsene innen romforskningen, oppdagelser som har ført til at vi har fått et helt nytt verdensbilde. Før romalderen trodde man at verdensrommet var praktisk talt tomt. Det var en gradvis overgang fra den øvre atmosfære til vakuum ca. 1000 km over bakken. Disse nye kunnskapene har vi først og fremst fått ved å bruke rakter, satellitter og romsonder til observasjoner utenfor jordas atmosfære. Den tekniske utviklingen har innleddet en ny epoke i vår forståelse av verdensrommet.

## Solvinden – kommunikasjonskanal mellom sola og jorda

Allerede fra målingene med romsonden MARINER i 1962, den første på vei til Venus, ble det klar at sola sender ut en kontinuerlig strøm av elektroner og ioner. De fleste – ca. 95 % av ionene, er protoner ( $H^+$ ). Massetettheten er  $\sim 10^7$  partikler per kubikkmeter ( $m^3$ ). Hastigheten til solvindpartiklene – selv under rolige forhold på sola, er  $> 300$  km/s.

Pga. de høye temperaturene i koronaen – over en million grader, er trykkkraftene i gassen større enn gravitasjonskraften. Derfor blåser deler av atmosfæren i koronaen bort fra sola. Oppdagelsen av denne solare vinden, solvinden, er sannsynligvis den viktigste oppdagelsen for romfysikken. Hele vårt solsystem ligger innesluttet i denne ekspanderende gasskyen fra sola som inneholder like mange negative som positive partikler, slik at den totalt sett er elektrisk nøytral. Satellitmålingene har også vist at solvinden bærer med seg et magnetfelt – som vi kaller det interplanetare magnetfeltet, ofte forkortet til IMF.

Solvinden er den viktigste sambandslinjen mellom sola og jorda. Den er også kilden til nordlys og geomagnetiske forstyrrelser.

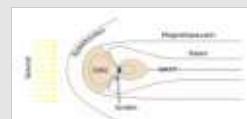
## Magnetosfæren – det nære verdensrommet

Det nære verdensrommet, første gang kalt magnetosfæren i 1965 av den britiske forskeren Thomas Gold, er den delen av himmelrommet hvor jordas magnetfelt kontrollerer bevegelsen av elektroner og ioner.

På grunn av vekselvirkningen mellom solvinden og jordas magnetfelt, har magnetosfæren en meget spesiell form, som illustrert i figuren. Dette skyldes at solvinden er supersonisk, dvs. at hastigheten er større enn lydhastigheten. Derfor beveger jorda seg rundt sola med en sjokkfront foran. Magnetosfæren blir trykket sammen på dagsiden. Her går den bare ut til ca. 10 jordradier – dvs. omkring 65.000 km. På nattsiden blir magnetfeltet dratt ut i en enorm Hale som strekker seg forbi månen. Grenselaget mellom magnetosfæren og det interplanetare rommet kalles magnetopausen. Formen på magnetopausen minner om strømmene i vannet i en elv som renner forbi en stor stein. I tillegg er det mange intense elektriske strømmer i dette området, spesielt viktig er Birkelandstrømmene. Magnetosfæren begrenses nedad av ionosfæren som strekker seg opp til ca. 500 km over



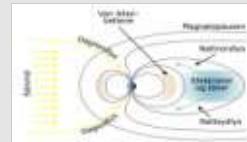
Romsonden Mariner 2 var en reserve for Mariner 1 som ble ødelagt under oppskyting. Formålet med sonden var å gjøre målinger av magnetfeltet og atmosfæren til Venus. Samtidig gjorde den verdifulle målinger av solvinden.  
Opphavsmann: [NASA](#)



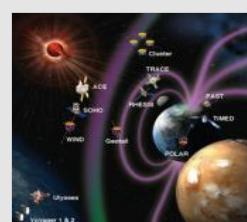
Forenklet dag-natt-snitt gjennom jorda og dens nære verdensrom.  
Opphavsmann: [Narom](#)



Explorer 1 ble skutt opp 31. januar 1958 og var den første Amerikanske satellitten.  
Opphavsmann: [NASA](#)



Noen sentrale områder innen magnetosfæren.  
Opphavsmann: [Narom](#)



jordoverflaten.

Magnetopausen er grensen mellom det interplanetare rommet og jordas nære verdensrom. Den er et magnetisk skjold som hindrer solvinden å trenge gjennom. Men skjoldet er langt fra perfekt. Vi får stor slåtte nordlys når solvinden trenger gjennom magnetopausen.

En lang rekke satellitter og romsonder er med på å hente inn data om romværet.

Opphavsmann: [NASA](#)

### Om struktur og dynamikk i magnetosfæren

Inne i magnetosfæren finnes mange områder og lag med forskjellig tetthet av elektroner og ioner, og hvor bevegelsene er meget variabel.

Selv om Sputnik I var første kunstige satellitt i bane rundt jorda, var det de første amerikanske satellittene – i Explorer-serien, som førte til de første store forandringer i datidens enkle verdensbilde. Satellitmålingene viste to belter med høye konsentrasjoner av partikler med energier opp mot 1000 keV. De fikk navnet van Allen beltene etter prosjektlederen. Disse lå som smultringer rundt jorda. Mens det indre belte hadde maksimal tetthet ca. 3000 km fra jorda, hadde det ytre belte sentrum ca. 30.000 km fra jordoverflaten. Strålingsbeltene har stor praktisk betydning for satellitter og satellittkommunikasjon.

Magnetosfæren er gradvis blitt kartlagt, men fortsatt er det mye ukjent. Den dekker jo et enormt volum. Her finner vi de områdene som er spesielt viktig for forekomsten av nordlys, for forstyrrelser i jordas magnetfelt og kilden til de intense elektriske strømmene og feltene i ionosfæren. Fordi aktiviteten på sola varierer mye, vil vi også ha store og hurtige variasjoner i vårt nære verdensrom.

For en mer detaljert forståelse av fysikken i det nære verdensrommet er det nødvendig med en detaljert analyse av bevegelsene til elektronene og ionene i magnetosfæren. En generell behandling av ladde partikler i elektriske og magnetiske felt - som varier mye i både tid og rom, er komplisert og vil ikke bli diskutert her.

Det er tre spesielt viktige bevegelser for elektronene og ionene i magnetosfæren. Disse er:

1. Rotasjoner rundt magnetfeltlinjene, gyrobevegelser.
2. Bevegelser langs magnetfelt linjene mellom den nordlige og sørlige halvkulen, kalt speilbevegelser.
3. Banene til elektroner og ioner som driver rundt jorda innenfor magnetopausen, kalles driftbevegelser rundt jorda.

### Varsling av romvær

Forholdene i jordas nære verdensrom er i stadig forandring. I tillegg til intens elektromagnetisk stråling, er variasjonene og dynamikken til partikelstrålingen meget store. Dette fører til intense elektriske strømmer. Disse sammen med høyenergipartikler fører til en kraftig ionisering av den øvre atmosfære. De intense uværene som oppstår i jordas nære verdensrom vil også påvirke tekniske installasjoner og følsomme systemer både i rommet og nede på jorda. Kostbart utstyr i raketts og romfarkoster blir ødelagt hver eneste år, men problemene er størst ved høy solaktivitet.

Det har lenge vært kjent at uvær på sola kan føre til brudd i radiosamband og navigasjonssystemer både bakkebaserte og de som benytter satellitter. Under kraftig uvær på sola har også hele kraftnett blitt slått ut. Vi har også mange eksempler på at satellitter har sluttet å fungere pga. den intense strålingen som kan oppstå i verdensrommet.

Det ville være meget viktig å kunne forutsi når slike intense forstyrrelser vil opptre. – dvs. å utarbeide varsler for forstyrrelser i romværet (på engelsk Space Weather Forecast). Dette er forsatt et nytt, men meget viktig forskningsfelt som er på et utviklingsstadium.

## Astrofysikk

Astrofysikken er per definisjon fysikken om himmellegemene og verdensrommet – som vi også kaller universet. Den elektromagnetiske strålingen fra universet brukes til å få informasjon om temperatur, tetthet, elektriske- og magnetiske felt, avstander og bevegelser i verdensrommet. Ut fra Hertzsprung-Russel-diagrammet blir stjernene delt inn i syv spektralklasser basert på deres farge og overflatetemperatur. I temaet "Astrofysikk" er også hovedtrekkene i stjernenes utvikling diskutert. Big Bang teorien er kort omtalt i forbindelse med diskusjonen av universets utvikling.

# Mekanikk

Forfatter: Narom  
[Mekanikk \(27080\)](#)

Mekanikk er den grenen av fysikken som beskriver bevegelser. Innen romfysikk har vi behov for å forstå bevegelser til raketter, satellitter og planeter, men også partikelbevegelser som opptrer f.eks. i solvinden eller bevegelser i atmosfæregassene. Vi skal i dette kapitlet diskutere sammenhenger mellom bevegelse, kraft, arbeid og energi. Bakgrunnskunnskap innen den klassiske fysikken vil bli brukt i mange av de etterfølgende kapitlene.

Når du har gjennomgått temaet skal du ha nådd følgende mål:

- ha kjennskap til det internasjonale systemet for måleenheter (SI-systemet)
- kunne forklare forskjellen mellom skalare størrelser og vektorstørrelser og kunne gi eksempler
- kunne summere og dekomponere vektorer grafisk
- kunne utføre beregninger for rettlinjet bevegelse, spesielt bevegelse med konstant akselerasjon
- kunne forklare Newtons tre lover og kunne anvende dem i ulike sammenhenger
- kunne forklare forskjellen mellom masse og tyngde
- kunne utføre enkle beregninger av arbeid og energi
- kunne formulere Keplers lover og kunne anvende dem på planet- og satellittbevegelse
- kunne anvende Newtons gravitasjonslov
- kjenne til unnslipningsfart og frigjøringsarbeid fra tyngdefelt

## SI-systemet

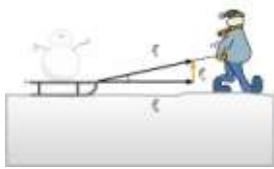
SI-enheter (Système International d'Unités) som er basert på 7 grunnmåleenheter - slik det er bestemt i det internasjonale system for måleenheter. Alle andre måleenheter i fysikken er sammensatt eller avledet av disse 7 måleenhetene:

1. kilogram (kg) for masse
2. meter (m) for lengde
3. sekund (s) for tid
4. kelvin (K) for temperatur
5. ampere (A) for elektrisk strøm
6. mol (mol) for stoffmengde
7. candela (cd) for lysstyrke

# Skalarer og vektorer

Forfatter: Narom

[Skalarer og vektorer \(27082\)](#)



Noen fysiske størrelser er fullstendig beskrevet, når måltallet og måleenhet er kjent. Disse størrelser kalles for skalarer. Eksempler på skalare størrelser er masse, tetthet, temperatur, tid.

Til en fullstendig beskrivelse av andre fysiske størrelser kreves i tillegg opplysningen om retningen. Disse størrelsene kalles for vektorer. Eksempler på vektorstørrelser er fart, akselerasjon, kraft.

Når f.eks. to personer drar med samme kraft i et tau, må man ha tilleggsopplysningen om de drar i hver sin retning eller i samme retning for å kunne forstå situasjonen. Når f.eks. en bil kjører med 50 km/time (h) må vi kjenne fartsretningen for å kunne vite hvor den befinner seg etter en time. Når en bil som kjører med 50 km/h blir påvirket av en akselerasjon på  $3 \text{ m/s}^2$ , må vi vite hvilken retning akselerasjonen har i forhold til bevegelsesretningen. Er den i bevegelsesretningen, øker hastigheten, er den mot bevegelsesretningen, kjører bilen saktere. Danner akselerasjonen i en vinkel til fartsretningen vil bilen svinge.

Vektorer skrives med en pil over symbollet, f.eks.  $\vec{v}$  for fartsvektoren. Når vektorene er parallelle kan vi uttrykke retningen ved hjelp av fortegn. Hvis vi bare regner med tallverdien uten å ta hensyn til retningen skriver vi  $(\vec{v})$  eller bare  $v$ . En tallverdi som alltid regnes som positiv kalles absoluttverdi. At vi skal bruke absoluttverdien til en størrelse viser vi med to vertikale streker. F.eks. er  $(-5) = (+5) = 5$ .

## Vektoraddisjon

Ved grafisk løsning av vektoraddisjon parallellforskyver vi vektorene slik at endepunktet til den ene pilen blir startpunkt til den nye. Vektorsummen er gitt ved vektoren som begynner i startpunktet til den første vektoren og har pilspissen i endepunktet til den siste vektoren. Lengden på pilen angir summen av vektorene, mens pilspissen viser retningen til vektoren, som vist i figuren over. Når vi summerer vektorer, er lengden til resultantvektoren alltid mindre eller lik summen av absoluttverdiene:  $\vec{a}_1 + \vec{b}_1 = \vec{c}_1$  og  $(\vec{c}_1) < (\vec{a}_1) + (\vec{b}_1)$ , se figuren.

[Eksempel: Vektoraddisjon](#)

**a)**  $\vec{a}_1 + \vec{b}_1 = \vec{c}_1$   
og  
 $(\vec{c}_1) < (\vec{a}_1) + (\vec{b}_1)$

**b)**  $\vec{a}_2 + \vec{b}_2 = \vec{c}_2$   
og  
 $(\vec{c}_2) = (\vec{a}_2) + (\vec{b}_2)$

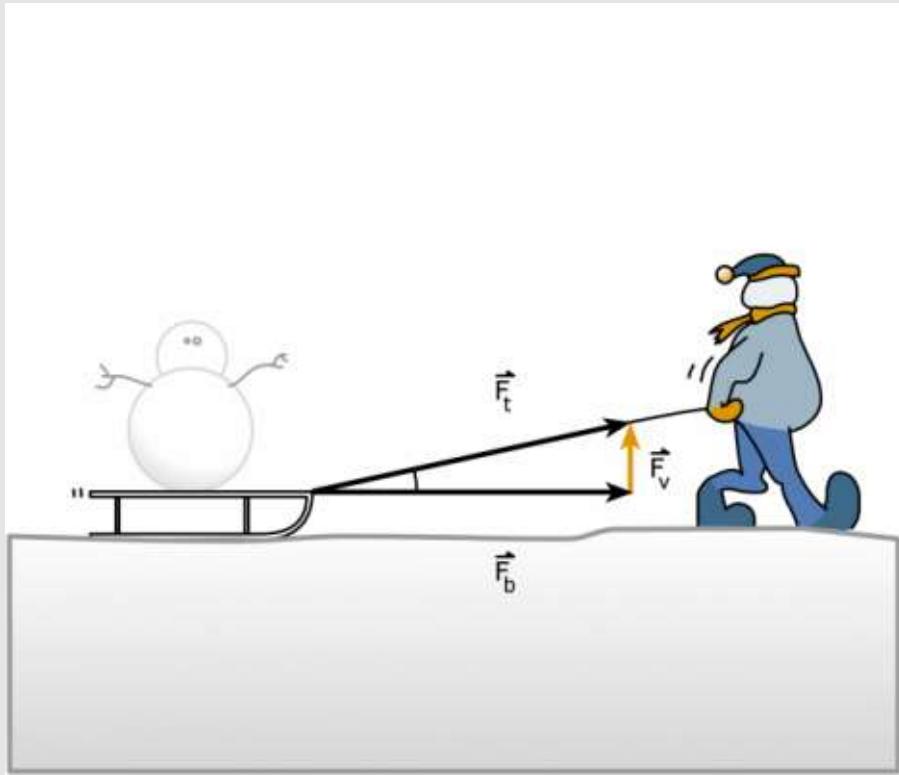
## Dekomponering av vektorer

Dekomponering av en vektor er det motsatte til vektoraddisjon. Vi finner enkeltvektorer som ved addisjon gir vektoren vi skal diskutere. Dette har vi spesielt behov for i forbindelse med krefter samt ved magnetiske og elektriske felt hvor vi må bestemme komponentene i bestemte retninger.

[Eksempel: Dekomponering av vektorer](#)

En sledes trekkes med en kraft på  $F_t = 100N$ . Vinkelen mellom bakken og kraften er  $\alpha = 30^\circ$ . Hvor stor er kraftkomponenten i vertikal og i horisontal retning?

Svar: Vi kan oppfatte trekkraften  $\vec{F}_t$  som summen av en kraft i horisontalretning  $\vec{F}_h$  og en kraft i vertikalretning  $\vec{F}_v$ . Av figuren kan vi se at  $F_h = F_t \cdot \cos(\alpha) = 100N \cdot \cos(30) = 87N$  og  $F_v = F_t \cdot \sin(\alpha) = 100N \cdot \sin(30) = 50N$ .



Dekomponering av en vektor

## Rettlinjet bevegelse

Forfatter: Narom

[Rettlinjet bevegelse \(27106\)](#)

Rettlinjet bevegelse dekker emner slik som fart og akselrasjon. Ved konstant akselrasjon kan man utlede et sett med bevegelsesligninger som gjelder for objektet.

# Fart

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Fart \(27110\)](#)

Når vi tilbakelegger 100 km i løpet av 2 timer – uavhengig av om vi stopper underveis – har vi en gjennomsnittsfart på 50 km/h. Vi ville ha brukt like lang tid dersom vi hadde kjørt med konstant fart på 50 km/h.

Gjennomsnittsfarten (For gjennomsnitt og middelverdier brukes en rett strek som symbolet.) kan vi uttrykke med følgende formel:

$$\text{Gjennomsnittsfarten} = \frac{\text{forflytning}}{\text{tidsenhet}} \quad \overline{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Man bruker den greske bokstaven  $\Delta$  (delta) for å uttrykke små, korte intervaller eller forskjeller. I eksemplet har vi brukt måleenheten km/h for farten. SI-enheten for fart = m/s.

$$1 \text{ km/h} = 1000 \text{ m}/3600 \text{ s} = 0,2778 \text{ m/s}$$

## Eksempel: Gjennomsnittsfart

Hvilken banefart har en geostasjonær satellitt?

Svar: Satellittbevegelser er ikke rettlinjet. Men vi vil her bare vite farten. Vi behandler både forflytningen og dermed også farten som skalarer. En geostasjonær satellitt kretser i ca. 36000 km høyde over et fast punkt på ekvatoren. Vi regner med en omløpstid  $T = 24$  h og jordas radius  $R_j = 6370$  km.

$$\begin{array}{l} \overline{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\pi \cdot (R_j + h)}{T} \\ = \frac{2\pi \cdot (6,37 \cdot 10^6 \text{ m} + 3,6 \cdot 10^7 \text{ m})}{24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ m/s} \end{array}$$

Gjennomsnittsfarten til en geostasjonær satellitt er 3,1 km/s. (Størrelsen med minst antall gjeldende sifre i beregningen bestemmer antall sifre vi angir sluttsvaret med. Høyden til satellitten er gitt med to gjeldende sifre. Derfor angir vi sluttsvaret med to gjeldende sifre.)

## Momentanfart

Når vi har en gjennomsnittsfart på 50 km/h kan vi godt ha kjørt 100 km/h enkelte steder. Ved fartskontroller måler politiet om vi holder oss til fartsgrensen på et bestemt sted. Politiet vil vite farten i det øyeblikket bilen passerer målepunktet. For å få farten så nøyaktig som mulig, må vi gjøre veistrekningen  $\Delta s$  kortere og kortere. Dette gjøres normalt ved å la tiden,  $\Delta t$ , gå mot null. Farten i det øyeblikket bilen passerer målepunktet kalles momentanfart. I dagligtale bruker vi bare ordet fart, men det er viktig å vite om vi er interessert i gjennomsnittsfart eller farten i et bestemt øyeblikk. Speedometeret på en sykkel eller i en bil måler momentanfarten. Vi kan beregne momentanfarten  $v$ , når tidsintervallet  $\Delta t$  er meget kort. Matematisk uttrykker vi det ved å la grenseverdien (lim)  $\Delta t$  gå mot 0:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \text{når } \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{eller} \quad v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

### Fordypning: Momentanfart

For å vise at intervallene går mot null bruker man  $d$  som symbol i stedet for  $\Delta$ . Dermed blir  $v(t) = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{s(t+d) - s(t)}{d}$ . Det er slik derivasjon er definert, nemlig

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = s'(t)$$

Likningen leses: Momentanfarten  $v$  er den deriverte av veien  $s$  med hensyn på tiden  $t$ .

I laboratoriet bestemmer vi momentanfarten – dvs. gjennomsnittsfarten for en liten strekning. Meget korte avstander kan vi f.eks. måle med et skyvelær eller en mikrometerskrue. Med hjelp av f.eks. fotoceller som starter og stopper en elektronisk klokke kan vi måle veldig korte tidsintervaller.

Om momentanfarten ikke varierer langs veien, flytter legemet seg med konstant fart. Vi beregner veilengden  $s$  til et legeme med konstant fart:

$$s = v \cdot t$$

### Eksempel: Skøyteløper

Hvor stor gjennomsnittsfart har en skøyteløper som går 1500 m på 1 min og 55 s?

Oppgi svaret i både m/s og km/h.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{1500 \text{ m}}{115 \text{ s}} = 13 \text{ m/s}$$

$$13 \text{ m/s} = \frac{13 \cdot 3600}{1000} \text{ km/h} = 46,8 \text{ km/h}$$

### Grafisk framstilling av fart og forflytning

Et diagram som viser forflytning som funksjon av tid kalles et  $s$ - $t$ -diagram eller veigraf. I et slikt diagram framkommer farten som stigningen til grafen. Dette gjelder både for konstant fart, gjennomsnittsfart og momentanfart. I figur a) ser vi at gjennomsnittsfarten er gitt ved stigningen til den rette linjen mellom startpunkt A og sluttspunkt D:

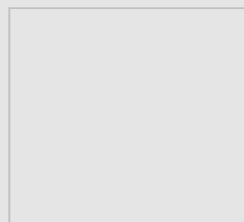
$$v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{100 \text{ km}}{2 \text{ h}} = 50 \text{ km/h}$$

På samme måte regner vi ut farten på de forskjellige etappene. Mellom A og B er farten konstant 60 km/h, mellom B og C er farten 0, mens farten mellom C og D er farten konstant 80 km/h. En bevegelse med konstant fart på 50 km/h gir den samme rette linjen mellom A og D som gjennomsnittsfarten.

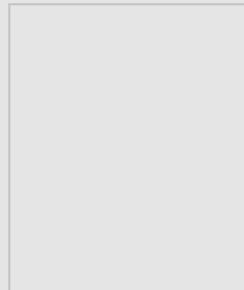
Også figur b) viser et  $s$ - $t$ -diagram, dvs. en framstilling av forflytning som funksjon av tiden. Men i dette eksemplet endrer farten seg kontinuerlig. Stigningen til linjen mellom punkt 1 og 2 er lik gjennomsnittsfarten i tidsrommet  $\Delta t$ . Om vi nå lar  $\Delta t \rightarrow 0$ , vil punktet 2 stadig komme nærmere punkt 1. Linjen mellom 1 og 2 blir da en tangent i punktet 1. Derfor er farten ved et vilkårlig tidspunkt  $t_1$  gitt ved tangenten i punktet  $(t_1, s_1)$  på kurven i figur b).

### Definisjon av momentanfart:

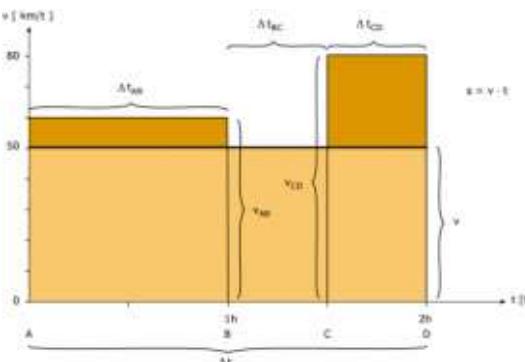
Når tidsintervallet går mot null er momentanfarten gitt ved stigningen til tangenten i målepunktet.



a)  $s$ - $t$ -diagrammet viser forflytningen som funksjon av tiden. Stigningen til grafen mellom to punkter gir gjennomsnittsfarten for strekningsintervallet. NAROM



b)  $s$ - $t$ -diagrammet viser grafisk definisjon av momentanfart. Når tidsintervallet går mot null er momentanfarten gitt ved stigningen til tangenten i målepunktet. Når  $\Delta t \rightarrow 0$



v-t-diagram  
Opphavsmann: Narom

Et diagram som viser farten som funksjon av tiden kalles et  $v$ - $t$ -diagram eller en fartsgraf. Figur c) illustrerer at forflytningen er gitt som arealet mellom grafen og førsteaksen. Fra figuren ser vi at arealet mellom grafen og førsteaksen kan beregnes som  $v \cdot \Delta t$ . Dette er lik den tilbakelagte strekningen  $\Delta s$ . Vi beregner strekningen av gjennomsnittsfarten ganget med tiden:

$$\$ \Delta s = \overline{v} \cdot \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta s = 50 \text{ km/h} \cdot 2 \text{ h} = 100 \text{ km} \$$$

Eller vi kan beregne summen av arealene i avsnittene med ulik fart.

$$\$ \Delta s = v_{AB} \cdot \Delta t_{AB} + v_{BC} \cdot \Delta t_{BC} + v_{CD} \cdot \Delta t_{CD} \$ \\ \$ \Rightarrow 60 \text{ km/h} \cdot 1 \text{ h} + 0 \cdot \frac{1}{2} \text{ h} + 80 \text{ km/h} \cdot \frac{1}{2} \text{ h} = 100 \text{ km} \$$$

Også for kontinuerlig, varierende fart kan vi beregne den tilbakelagte strekningen som arealet mellom  $v$ - $t$ -grafen og første aksen som illustrert i figur d). Dette gjelder både for konstant fart og for varierende fart. Som tilnærming kan vi beregne arealet under grafen som sum av rektangelarealer. I hvert tidsintervall anser vi farten som konstant. For store tidsintervaller er dette kun en grov tilnærming. Jo mindre tidsintervaller vi velger, desto bedre blir tilnærmingen. Den tilbakelagte veien i hvert tidsintervall er gitt ved arealet og kan uttrykkes som

$$\$ \Delta s_1 = v_1 \cdot \Delta t_1, \Delta s_2 = v_2 \cdot \Delta t_2, \dots, \Delta s_n = \Delta v_n \cdot \Delta t_n \$$$

Den totale tilbakelagde veien  $s$  er summen av enkeltintervallene  $\Delta s$ .

$$\$ s = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_n \$$$

Først når vi lar tidsintervallene går mot null får vi et nøyaktig resultat:

$$\$ s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t \$$$

Denne summen kan vi også skrive som et integral:

$$\$ s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \$$$

0\$ er \$v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = s'\$.  
\$NAROM\$

d) \$v\$-\$t\$-diagram for bevegelse med varierende fart.  
Arealet mellom grafen og førsteaksen tilsvarer den tilbakelagte strekningen:  
$$s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t$$
. Vi kan beregne arealet som sum av rektangelarealer når  $\Delta t \rightarrow 0$ . Dette kan vi også skrive som et integral. NAROM

# Akselerasjon

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Akselerasjon \(28804\)](#)

## Konstant akselerasjon og gjennomsnittsakselerasjon

Ved høy akselerasjon bruker en kort tid på en viss fartsøkning. Akselerasjon er per definisjon fartsendring per tidsenhet.

$$\text{gjennomsnittsakselerasjon} = \frac{\text{fartsendring}}{\text{tidsenhet}} \quad \overline{a} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

der  $\overline{a}$  er gjennomsnittsakselerasjon,  $v_1$  er farten i punkt 1,  $v_2$  er farten i punkt 2 og  $\Delta t$  er tidsintervallet det tok for å bevege seg fra punkt 1 til 2. Måleenheten for akselerasjon er  $\text{m/s}^2$ .

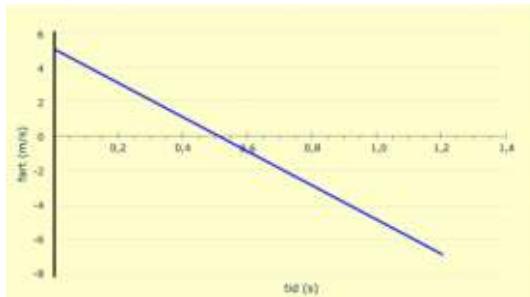
### Eksempel: Gjennomsnittsakselerasjon I

Finn gjennomsnittsakselerasjon til en bil som trenger 6 s for å øke farten fra 0 til 30 m/s.

$$\overline{a} = \frac{30 \text{ m/s}}{6 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}^2$$

Hvis en bil trenger 6 s for å stoppe fra en fart på 30 m/s har den en akselerasjon på  $-5 \text{ m/s}^2$ . En negativ akselerasjon betyr i dette tilfelle en nedbremsing eller retardasjon.

Akselerasjon er også en vektorstørrelse. Fordi vi har forutsatt rettlinjet bevegelse, kan vi uttrykke retningen med hjelp av fortegn.



v-t-diagram for en gjenstand som kastes rett opp i luften

Opphavsmann: [Narom](#)

a) v-t-diagram for en gjenstand som kastes rett opp i luften med en startfart på 5 m/s. Grafen er uavhengig av massen til gjenstanden. Det er valgt positiv retning oppover. Akselerasjonen er konstant, den er lik tyngdeakselerasjonen. NAROM

Et eksempel på konstant akselerasjon er fritt fall. Når vi slipper en gjenstand vil den få en akselerasjon på  $9,81 \text{ m/s}^2$  ved jordoverflaten, – når vi ser bort fra luftmotstand. Også når vi kaster en gjenstand i luften vil den være påvirket av tyngdeakselerasjon. Det fører til at den blir saktere på vei oppover, fordi startfarten og tyngdeakselerasjonen har motsatt retning. Når den er på vei nedover øker farten. Tyngdeakselerasjonen og farten har da den samme retningen. Figur a viser et v-t-diagram for fritt fall.

### Eksempel: Gjennomsnittsakselerasjon II

Et legeme endrer farten fra  $+3 \text{ m/s}$  til  $-2 \text{ m/s}$  i løpet av 10 s.

Hvor stor er akselerasjonen?

Svar:

$$\overline{a} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{-2,0 \text{ m/s} - 3,0 \text{ m/s}}{10 \text{ s}} = -0,50 \text{ m/s}^2$$

Tallverdien til akselerasjonen er  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Akselerasjonen har den samme retningen som sluttfarten  $v_2$ .

## Momentanakselerasjon

Akselerasjonen i et bestemt tidspunkt kalles momentan-akselerasjon. Analogt til definisjonen av momentanfart må vi også ved bestemmelsen av momentanakselerasjonen velge et så lite tidsintervall som mulig. Det betyr at  $t$  går mot null.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{når} \quad \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{eller} \quad a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Fordypning:

### Momentanakselerasjon

Igjen erstatter vi  $\Delta$  med  $d$  i likningen for å vise at intervallene skal gå mot null.

$$a(t) = \frac{v - v_0}{t - t_0} = v' = s''(t)$$

Dette gir oss definisjonen for akselerasjonen på matematisk vis:  
Momentankselerasjonen er den første deriverte av farten med hensyn til tiden.  
Akselerasjonen er også den andre deriverte til forflytningen med hensyn til tiden.

## Grafisk framstilling av akselerasjon

b)  $v-t$ -diagram med grafisk definisjon av akselerasjon. Når tidsintervallet går mot null er momentanakselerasjonen gitt ved stigningen til tangenten i målepunktet. *NAROM*

Akselerasjonen er definert ved stigningen til grafen i et  $v-t$ -diagram. I figur b kan vi se at stigningen til linjen mellom punkt 1 og 2 er lik gjennomsnittsakselerasjonen i tidsrommet  $\Delta t$ . Om vi nå lar  $\Delta t \rightarrow 0$ , vil punktet 2 stadig komme nærmere punkt 1. Når punktene 1 og 2 nesten sammenfaller er linjen mellom punktene en tangent i punktet 1. Derfor er akselerasjonen ved et vilkårlig tidspunkt  $t_1$  gitt ved tangenten i punktet  $(t_1, v_1)$  på kurven. (Se figur b.) Generelt har vi: Når tidsintervallet går mot null er momentanakselerasjonen gitt ved stigningen til tangenten i målepunktet.

# Bevegelseslikninger ved konstant akselarasjon

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Bevegelseslikninger ved konstant akselarasjon \(28882\)](#)

For å bestemme bevegelsen med konstant akselarasjon er følgende fire likninger helt nødvendige.  
Utledningen står som fordypningsstoff i dette avsnittet.

$$\begin{aligned}v &= v_0 + a \cdot t \quad \text{a} = \frac{(v-v_0)}{t} \\s &= \frac{v_0+v}{2} \cdot t \quad \overline{v} = \frac{v_0+v}{2} \\s &= \frac{1}{2} (v_0+v) \cdot t = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \\v^2 - v_0^2 &= 2as\end{aligned}$$

[Fordypning: Utledning av bevegelseslikningene for konstant akselarasjon](#)

**Eksempel: Konstant akselarasjon og konstant fart**

Startfarten til en kule som triller ned et skråplan er null. Det tar 1,5 s å trille ned det 1,8 m lange skråplanet. Deretter triller kulen videre på et horisontalplan.

- a) Hvor stor er akselrasjonen på skråplanet?
- b) Hvor langt triller kulen på 0,5 s på horisontalplanet?

Svar:

- a) Vi bruker likning  $s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$ , vi vet at  $v_0 = 0$ ;  $a = \frac{2s}{t^2}$ . Akselrasjonen på skråplanet er  $1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .
- b) Når kulen er på horisontalplanet er det ingen krefter somvirker i bevegelsesretningen. Summen av kreftene på kulen er null og farten derfor konstant (ifølge Newtons 1. lov). Vi beregner først farten kulen har ved enden av skråplanet.

Så bruker vi likningen for konstant fart for å beregne forflytningen:

$$s = v \cdot t = 2,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,5 \text{s} = 1,2 \text{ m}$$

Etter 0,5 s har kulen tilbakelagt 1,2 m på horisontalplanet.

## Krefter

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Krefter \(28919\)](#)

For å forklare hva krefter er ser man på deres virkning og egenskaper.

1. Krefter kan endre bevegelser. De kan øke eller redusere farten og de kan endre bevegelsesretningen.
2. Krefter kan deformere legemer. De kan endre formen på et legeme midlertidig eller permanent.
3. Krefter virker alltid mellom to legemer.
4. Krefter er vektorstørrelser.

Måleenheten for kraft er newton (N).  $1\text{ N} = 1\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$

## Newtons 1. lov (Tregheitsloven)

Forfatter: Narom

[Newtons 1. lov \(Tregheitsloven\) \(28920\)](#)

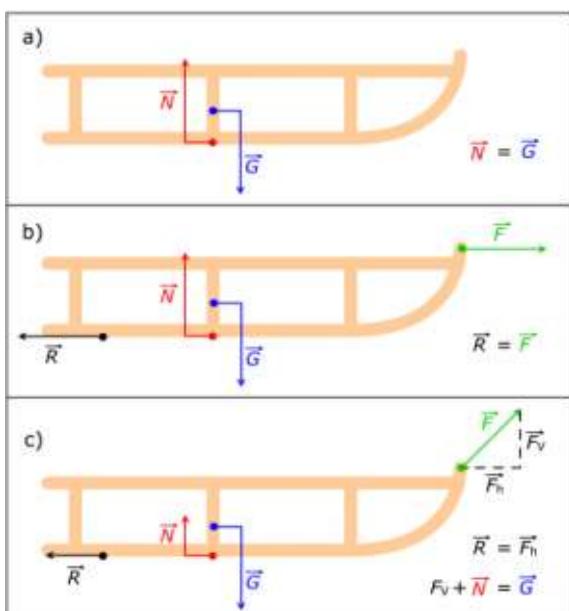
Hvilke krefter virker på et objekt i ro?

Når vi holder en stein i hånda kjenner vi at vi må bruke en kraft,  $\vec{N}$ , som er rettet oppover. Denne kraften er like stor som tyngdekraften,  $\vec{G}$  til steinen som virker nedover. Dermed er vektorsummen av kraftene på steinen null. Dette skriver vi:

$$\sum \vec{F} = \vec{G} + \vec{N} = 0$$

Hvilke krefter virker på et objekt som beveger seg med konstant fart?

Vi drar en slede med konstant fart. Tyngdekraften virker på sleden. Fra bakken vil det virke en kraft oppover som er like stor som tyngdekraften. Hvis vi drar slede over et isbelagt vann er friksjonen liten. Vi trenger bare en liten kraft på sleden til å opprettholde farten. Kraften øker med friksjonen. Den kraften vi bruker på sleden vil dermed kompensere for friksjon. Summen av kraftene vil da være null.



Kraftene på en slede som er i ro eller konstant fart

Opphavsmann: [Narom](#)

Vi kan nå formulere Newtons 1. lov:

**Når summen av kraftene som virker på et objekt er null, vil objektet være i ro eller bevege seg med konstant fart langs en rett linje.**

Med vektorer skrives dette:

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{v} = \text{konstant}$$

Vår erfaring er at vi må bruke ganske mye kraft for å opprettholde konstant fart. Vi må tråkke i pedalene på sykkelen for å holde konstant fart i flatt terren, selv om det er vindstille. En bil forbruker drivstoff også når den kjører med konstant fart. Årsaken er friksjon og luftmotstand. I verdensrommet finnes det praktisk talt ikke luftmotstand fordi partikkeltettheten er så lav. Det betyr at et romfartøy beholder fartskomponenten det engang har oppnådd. Blir det ikke påvirket av noen krefter vil det fortsette rettlinjet med konstant fart.

Kraftene på et objekt i ro.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Kraftene på et objekt i ro.  $\sum \vec{F} = \vec{G} + \vec{N} = 0$  NAROM

Newtons 1. lov kalles også treghtsloven fordi objekter motsetter seg endring av bevegelse. Dette opplever vi f.eks. når vi kjører bil og bilen bråbremser. Bilbeltet hindrer oss i å fortsette med samme fart framover. Når vi svinger til venstre blir vi presset mot høyre fordi kroppen vil fortsette rett fram. Når vi flyr og lukker øyne er det ikke vanskelig å forestille seg at man fortsatt er på bakken. Vi merker ikke farten så lenge den ikke endrer seg. Kaster vi en ball rett opp i luften, når vi sitter i en bil vil den lande igjen i hendene våre – uansett om bilen står stille eller beveger seg rettlinjet med konstant fart. Ballen og bilen har den samme farten.

At farten vi roterer med er forskjellig om vi er på en av polene, hvor vi er i ro i forhold til jorda, eller ved ekvator hvor vi beveger oss med nesten 1700 km/h, kjenner vi ikke, fordi atmosfæren rundt oss har den samme farten som vi. Man utnytter denne ekstra farten, når man skyter opp raketter fra steder nær ekvator. Man velger en oppskytning i østlig retning. På denne måten trenger man mindre brensel til f.eks. å plassere en satellitt i bane.

## Newton 2. lov (Dynamikkens grunnlov)

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Newton 2. lov \(Dynamikkens grunnlov\) \(28924\)](#)

I en heis som beveger seg med konstant fart mellom etasjene kan vi ikke kjenne om vi beveger oss oppover eller nedover. Men når heisen starter og stopper kan vi bestemme bevegelses-retningen. Om heisen starter oppover føler vi oss tyngre, fordi vi blir påvirket av en ekstra kraft. Stopper heisen sin ferd oppover føler vi oss lettere. I begge tilfellene endrer heisen, og dermed også vi, farten. Og det betyr at bevegelsen er akselerert. Summen av kreftene på oss er ikke lengre null. Sammenhengen mellom krefter, masse og akselerasjon er gitt ved Newtons 2. lov:

**Når summen av kreftene på et objekt er forskjellig fra null, blir objektet akselerert. For å endre bevegelsen til et objekt med en akselerasjon  $a$  trenges det en kraft som er lik produktet av masse og akselerasjon. Kraftsummen – også kalt resultantkraften, og akselerasjonen har samme retning.**

Ved å bruke vektorer skrives Newtons 2. lov:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Av likningen kan vi se at:

$$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

En bil som kjører med konstant fart i en rundkjøring endrer retning hele tiden. Det betyr at resultantkraften på bilen ikke er null. Dermed må bilen etter Newtons 2. lov være akselerert. Hvordan det er mulig at et objekt med konstant fart er akselerert kommer vi tilbake til i forbindelse med satellittbevegelser.

### Eksempel: G-krefter

Ved start har romferga en akselerasjon på 1,6 g, dvs. 1,6 ganger jordas tyngdeakselerasjon. Finn kraften fra setet på astronauten, når han har en masse på 70 kg?

Svar: Det er to krefter som virker på astronauten, tyngdekraften  $\vec{G}$  nedover og normalkraften  $\vec{N}$  fra setet oppover. Av Newtons 2. lov følger.

$$\sum \vec{F} = \vec{G} + \vec{N} = m \cdot \vec{a}$$

Vi uttrykker retningen med fortegn og velger positiv retning oppover.

$$N - G = m \cdot a$$

$$\begin{array}{l} N = m \cdot a + G \\ N = m \cdot (1,6 \cdot g) + G \\ N = 1,6 \cdot 70 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \end{array}$$

Kraften fra setet på astronauten er 1,8 kN.

# Tyngde

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Tyngde \(44442\)](#)

Slipper vi 2 lodd med ulik masse samtidig fra samme høyde vil de lande samtidig om vi ser bort fra luftmotstanden. Begge loddene påvirkes av den samme akselerasjonen, nemlig: jordas tyngdeakselerasjon som er  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Når vi bruker Newtons 2. lov får vi deres tyngde  $G$  som resultat.

$$G = m \cdot g$$

Hvor  $G$  = tyngde (kraft),  $m$  = masse og  $g$  = tyngde-akselerasjon.

Alle legemer som befinner seg i gravitasjonsfeltet (= tyngdefeltet til et annet legeme) blir påvirket av en kraft som kalles tyngde eller gravitasjonskraft.

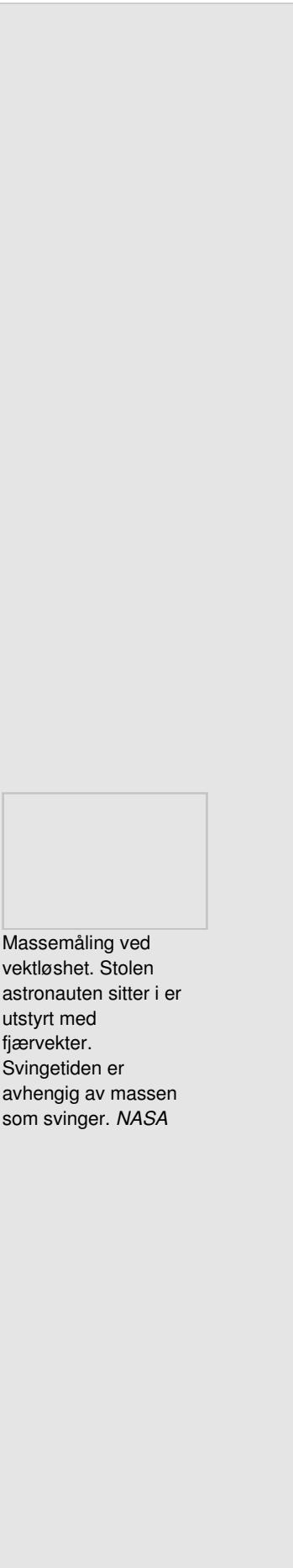
Astronauten David Scott viste eksperimentet på månen til fjernsynsseere. Han slapp en hammer og ei fjær samtidig. Begge falt like fort og landet derfor samtidig.

Astronauten David Scott slipper en hammer og en fjær samtidig, og viser at begge gjenstandene falt like fort.

Kilde: NASA

## Masse og tyngde

SI-enheten for masse er kg. For atomer og molekyler brukes atommasseenheten ( $u$ );  $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Masse er et uttrykk for hvor mye materie (masse) et legeme inneholder. Denne størrelsen er uavhengig av hvor vi befinner oss. I dagligtale blander vi ofte ordene, masse, vekt og tyngde. Vi sier f.eks. at vi veier 70 kg. Hvis vi brukte den samme vekten på månen ville den vise kun 11,6 kg. Men vår masse har ikke forandret seg. Den er fortsatt 70 kg. Det vekten egentlig måler er tyngden. Kraften vi utøver på badevekten er avhengig av tyngdeakselerasjonen, som på månen bare er en  $1/6$  av jordas tyngdeakselerasjon. Siden det er et fast forholdstall mellom masse og tyngde på jorda, er det ikke noe problem å bestemme masse med en vekt som egentlig er basert på utslag på grunn av tyngdekraften. Hvis vi veier oss i en heis, vil resultatet avhenge av om heisen har akselerasjon eller ikke, og om akselerasjonen er oppover eller nedover.



Masse måling ved vektløshet. Stolen astronauten sitter i er utstyrt med fjærvekter. Svingetiden er avhengig av massen som svinger. NASA

Når astronauter svever vektløs i romstasjonen er massen deres fortsatt den samme som på jorda, selv om en badevekt ville vise 0 kg. Vil vi bestemme massen, når vi befinner oss i vektløshet må vi bruke en annen masseegenskap enn tyngde. Alle masser er trege. De "motsetter seg" endring av sin bevegelse. Jo større massen er desto vanskeligere er det å endre bevegelsen. Dette gir en mulighet for å bestemme massen også i vektløshet. Vil man f.eks. bestemme massen til en astronaut kan man feste ham til en stol som er forbundet med ei fjær. Så setter man stolen i svingninger. Svingtiden er avhengig av massen. Jo lengre svingetid desto større er massen. Betegnelsen vektløshet er misvisende fordi man lett kan tro at tyngdekraften er null ved vektløshet. Det er ikke tilfelle.

### Eksempel: Tyngdekraft

En astronaut har en masse på 70,0 kg.

- a) Hvilken tyngdekraft virker på ham på jorda?
- b) Hvilken tyngdekraft virker på ham på månen?

Svar:

a)  $G = m \cdot g = 70,0 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 686 \text{ N}$ .

På jorda har astronauten en tyngde på 686 N.

b) På månen er tyngdeakselerasjonen  $1,62 \text{ m/s}^2 \cdot G = m \cdot g = 70,0 \text{ kg} \cdot 1,62 \text{ m/s}^2 = 113 \text{ N}$ . På månen har astronauten en tyngde på 113 N, dvs. omtrent en sjetedel av tyngden på jorda.

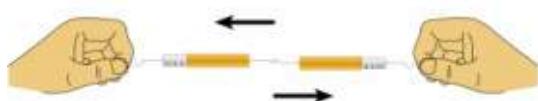
## Newtons 3. lov (Kraft og motkraft)

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Newtons 3. lov \(Kraft og motkraft\) \(44445\)](#)

Mens Newtons 1. og 2. lov handler om krefter på ett legeme, handler Newtons 3. lov om krefter mellom to legemer, dvs. om vekselvirkninger mellom legemer. Når vi hekter sammen to fjærvekter og drar i begge endene blir utslaget likt på begge – uansett om vi drar svakt eller sterkt.

Når en stein presser med 100 N på sitt underlag, virker underlaget tilbake med samme kraft. Når vi sparker en fotball virker en kraft fra foten på ballen, men vi kjenner på foten at det virker en kraft fra ballen på den. Vi kan ikke berøre noe uten selv å bli berørt. Ikke alle krefter forutsetter berøring. Fjernkrefter virker uten kontakt mellom objektene. Eksempler på fjernkrefter er tyngdekraften, elektriske og magnetiske krefter. Krefter med berøring mellom objektene kalles nærekrefter eller kontaktkrefter.



Kraft og motkraft mellom dynamometer (en kraftmåler) som er hektet sammen. De måler kraft i motsatte retninger, og utslaget viser at kraft og motkraft er like store, dvs. samme utslag på vektenes skalaer.

Opphavsmann: [Narom](#)

Newton tredje lov kan formuleres slik:

**Når et legeme A virker med en kraft  $F_A$  på et legeme B, vil B virke tilbake på A med en like stor og motsatt rettet kraft  $F_B$ . Kraft og motkraft virker alltid på hvert sitt legeme.**

$$\$ \$ \vec{F}_A = -\vec{F}_B \$ \$$$

Hvis vi brukte to store dynamometer ved tautrekking – istedenfor et tau, ville de vise samme utslag hele tiden. Hvordan kan vi da si at det ene laget er sterkere enn det andre, når begge trekker med samme kraft? Her må vi huske at det er andre krefter enn kraftene på tauet. Det sterkest laget utøver en større kraft mot underlaget og dermed vil også kraften fra underlaget på dem være større. Betydningen av kraften mot underlaget blir tydelig når vi tenker oss at det ene laget står på glatt is. Medlemmene i laget kan være nokså sterke. De får ikke brukt sin kraft, når friksjonen mangler.

Illustrasjon som viser et romferge som blir skyvet fram av raketmotorer. Tekst over bildet forteller om gravitasjonskreftene som virker på romfergen og romstasjonen. Tekst under bildet forteller om kraftene som virker på romfergen og romstasjonen.

Medlemmene til legemene er gravitasjonskreftene. De virker på romfergen og romstasjonen i motsatt retning. Samme kraft.

$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

Alle krefter i universet – både gravitasjons- og kraftkrefter – har motsatt retning. Det betyr at romfergen som trekker mot romstasjonen, virker mot romstasjonen. Romstasjonen trekker mot romfergen. Kjempekreftene er i motsetning til de små kraftene vi ser.

$\vec{F} = F_2$

Krefter  
Opphavsmann: [Narom](#)

a) Hammeren virker på spikeren med en like stor kraft som spikeren på hammeren. Alle slags krefter – både nærekrefter og fjernkrefter – har motkretfer

b) Jorda har en like stor tiltrekningskraft på månen som månen utøver på jorda.

Rakettframdrift kan forklares med Newtons 3. lov. Kraften fra rakett-motorene på forbrennings-gassene er like stor som kraften fra gassene på raketten. Kreftene har motsatt retning. Romferga Endeavour kort tid etter starten.

Opphavsmann: [NASA](#)

Hvordan akselereres en rakett i tomt rom når det ikke er noe å skyve fra? Det raketten skyver med, er gassene som produseres når drivstoffet forbrenner. Forbrenningsgass presses med stor fart gjennom dysene i rakettmotoren. Dette gir kraften fra rakett-motoren på gassene. Etter Newtons tredje lov skyver da gassene på raketten med en like stor kraft framover. Det er denne motkraften fra forbrenningsgassene som akselerer raketten. Summen av kreftene på raketten er da ikke null. Raketten trenger ikke luft eller noe annet å skyve fra. Luftmotstanden vil føre til at rakettakselerasjonen blir mindre enn ute i verdensrommet.

Newton s 3. lov betyr også at gravitasjonskraften som jorda utøver på et eple er like stor som tiltrekningeskraften fra eplet til jorda. Fordi massen til jorda er så veldig mye større faller eplet til jorda og ikke jorda til eplet.

En astronaut som arbeider på utsiden av et romfartøy i bane rundt jorda i vektløshet er sikret med en line. Den er ikke der for å hindre at astronauten faller ned fordi det er det ingen fare for. Men astronauten ville med et fraspark utøve en kraft på romferga. Ifølge Newtons 3. lov vil romferga virke tilbake på astronauten med en like stor kraft i motsatt retning. Den korte tiden under kontakt når kraften virker, blir astronauten akselerert (Newton s 2. lov). Deretter ville han bevege seg med konstant fart vekk fra romferga (Newton s 1. lov). Linen forhindrer det.



En astronaut som jobber på utsiden av Gemini 4 er sikret med en line.  
Opphavsmann: [NASA](#)

# Arbeid og energi

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Arbeid og energi \(44453\)](#)

Hver gjenstand har energi. Det kan være i form av indre energi, kinetisk energi, potensiell energi, osv. Når gjenstanden avgir eller får tilført energi skjer det en energioverføring. Energioverføring kan skje som arbeid eller som varme. Når vi løfter en stein utfører vi et arbeid, hvor vi overfører energi fra oss til steinen. Steinen får dermed økt sin energi. Når vi setter en kjøle med kaldt vann på en varm plate vil platen overføre energi som varme til det kalde vannet ved varmeledning. Vannets energi øker. Sola overfører energi til oss i form av stråling. Varme er energioverføring fra et legeme med høy temperatur til et legeme med lavere temperatur. Den kan skje ved ledning eller stråling. Vi skal i det følgende se nærmere på energioverføringen som skjer ved arbeid. Etterpå skal vi ta for oss forskjellige energiformer.

## Arbeid og effekt

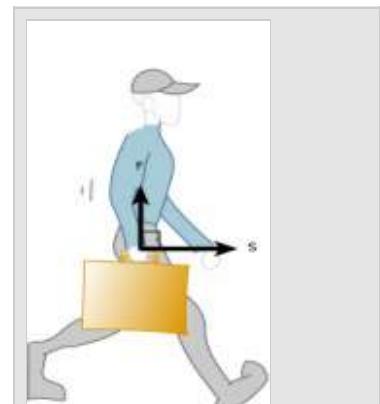
I fysikken definerer vi arbeid ( $W$ ) på følgende måte: Arbeid = produktet av kraften  $F_s$  ganger vei i bevegelsesretning  $s$ .

$$W = \vec{F}_s \cdot \vec{s} = F_s s \cos \alpha$$

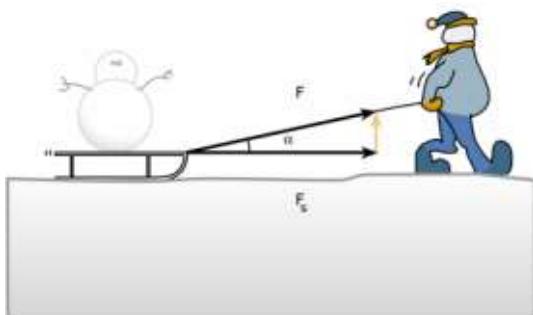
Måleenheten for arbeid og energi er joule (J), der

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

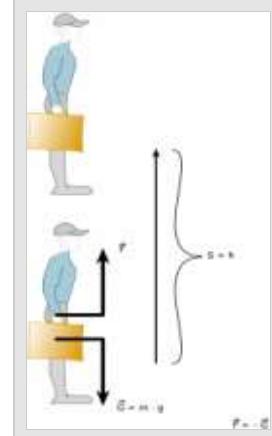
Vår definisjon av arbeid fører til en forflytning/forskyvning. Om vi bruker mye kraft på å løfte en kasse, men ikke lykkes, har vi ikke utført noe arbeid



Når vinkelen mellom  
kraften  
Opphavsmann: [Narom](#)



Kraftkomponenten i bevegelsesretningen,  
Opphavsmann: [Narom](#)



Når vinkelen mellom  
kraften og  
flytningens retning  
er null er arbeidet lik  
produktet av kraften og  
flytningen. Her er  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Eksempel: Arbeid

- Vi drar en koffert med en kraft på 100 N en strekning på 5 m over gulvet. Vinkelen mellom armen og gulvet er  $60^\circ$ . Hvor mye arbeid utfører vi på kofferten?

Svar:  $W = F \cdot s \cdot \cos a = 100 \text{ N} \cdot 5 \text{ m} \cdot \cos 60^\circ = 250 \text{ J}$

Vi utfører et arbeid på 250 J på kofferten.

- Vi bærer en koffert som har en tyngde på 100 N en 5 m lang strekning. Vi går med konstant fart. Hvor mye arbeid har vi utført på

kofferten?

Svar: Når vi bærer kofferten er vinkelen mellom kraften og bevegelsesretningen  $90^\circ$ . Siden vi forutsetter jevn fart og ingen luftmotstar trenger vi ifølge Newtons 1. lov ingen kraft til å opprettholde bevegelsen.  $\mathbf{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$  med  $\cos \alpha = 100 \text{ N} \cdot 5 \text{ m} \cdot \cos 90^\circ = 0 \text{ J}$  Når vinkelen mellom kraften og forflytningen er  $90^\circ$  utfører denne kraften ingen arbeid på kofferten. Her har vi enda et eksempel på ulik bruk av begrepet arbeid i fysikken og i dagligtale.

Når vi løfter en gjenstand utfører vi et arbeid. Vi bruker en kraft som er like stor som tyngden  $G$  til gjenstanden. Forflytningen er gitt ved høyden  $h$ . Formelen for arbeid blir da:

$$\mathbf{W} = \mathbf{F}_s \cdot \mathbf{s} = G \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

### Eksempel: Arbeid mot tyngdekraften

Hvor mye arbeid må vi utføre på en koffert på 15 kg som vi løfter 1,2 m opp?

Svar:  $W = F_s \cdot s = G \cdot h = m \cdot g \cdot h =$

$$15 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1,2 \text{ m} = 176 \text{ J}$$

Vi må utføre et arbeid på 176 J.

## Effekt

Effekten – som vi symboliserer med  $P$  (fra engelsk power) er definert som arbeid dividert på tid:

$$P = \frac{W}{t}$$

Måleenheten for effekt er watt ( $W$ ), der

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ Nm/s}$$

Vi jobber effektivt, når vi utfører et arbeid på kort tid. En gammel måleenhet for effekt som ikke tilhører SI-systemet, er hestekrefter (hk): 1 hk = 735,5 W.

### Eksempel: Effekt

En motor trenger 8,0 s for å løfte 1000 kg 5,0 m. Hvilken effekt avgir motoren?

$$P = \frac{W}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t}$$

Svar:

$$\frac{1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 5,0 \text{ m}}{8,0 \text{ s}} = 6,1 \text{ kW}$$
 Motoren avgir 6,1 kW.

# Energiformer

Forfatter: Narom

[Energiformer \(44508\)](#)

Vi skiller mellom forskjellige energiformer:

- kinetisk energi (bevegelsesenergi)
- potensiell energi (stillingsenergi)
- potensiell energi i tyngdefeltet
- elastisk potensiell energi (f.eks. en spent stålfjær)
- indre energi
- elektrisk og magnetisk energi
- kjemisk energi
- kjerneenergi (fisjon og fusjon)

Alle disse energiformene kan føres tilbake til hovedformene for energi, nemlig potensiell og kinetisk energi.  
I det følgende skal vi kun se nærmere på kinetisk og potensiell energi.

## Mekanisk energi

Mekanisk energi er fellesbetegnelsen for kinetisk og potensiell energi.

En gjenstand i bevegelse har kinetisk energi. Når vi gir en gjenstand bevegelsesenergi utfører vi et arbeid. Dette fører oss til formelen for kinetisk energi.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Konklusjon: En gjenstand med massen  $m$  og farten  $v$  har den kinetiske energien  $E_k$ .

Fordypning: Mekanisk energi

Vi vet fra før:  $W = F_s \cdot s$ ,  $F = m \cdot a$ ,  $s = \frac{1}{2} a t^2$  og  $v = a t$

Dette gir oss

$$W = F_s \cdot s = m \cdot a \cdot \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} m (a t)^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

Måleenheten i SI-systemet for både arbeid og energi er joule (J). I romfysikken brukes også måleenheten elektronvolt (eV) for energi.  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . eV brukes ofte for energien til elektrisk ladde partikler. Elektronvolt er ikke en SI-enhet. En annen måleenhet for energi – spesielt for elektrisk energi, er kilowattimer (kWh).

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Når vi løfter en gjenstand utfører vi et arbeid som øker gjenstandens potensielle energi ( $E_p$ ) tilsvarende. Derfor er uttrykket for potensiell energi i tyngdefeltet gitt ved likning.

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Denne likningen kan vi bare bruke når  $g$  er konstant. Dette er tilfelle, når vi befinner oss nær jordoverflaten. Ved større høyder må vi ta hensyn til at tyngdeakselerasjonen avtar. Dette er ivaretatt i Newtons gravitasjonslov.

Eksempel: Kinetisk og potensiell energi

a) En ball på 200 g kastes slik at den får en fart på 5,0 m/s. Hvilken kinetisk energi har ballen, når den forlater hånden?

b) Hvor høyt må vi løfte denne ballen for å gi den like stor potensiell energi som den har kinetisk energi i a)

Svar:

a)

$$\$ \$ E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,20 \text{ kg} \cdot (5,0 \text{ m/s})^2 = 2,5 \text{ J} \$ \$$$

Ballen har en kinetisk energi på 2,5 J.

b)

$$\$ \$ E_p = m \cdot g \cdot h; \Rightarrow h = \frac{E_p}{m \cdot g} = \frac{2,5 \text{ J}}{0,20 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 1,3 \text{ m} \$ \$$$

Vi må løfte ballen 1,3 m. Det betyr at hvis vi kaster ballen med 5,0 m/s rett opp i luften, når den en høyde på 1,3 m, når vi ser bort fra luftmotstand.

Vi må definere et nullnivå for potensiell energi. Velger vi nullnivået høyere enn legemets posisjon får  $E_p$  en negativ verdi. Uavhengig av vårt valg av nullnivået vil den potensielle energien øke med høyden. I romfysikken er det hensiktsmessig å definere nullnivået for potensiell energi uendelig langt borte fra jordoverflaten.

# Bevegelse av planeter og satellitter

Forfatter: Narom

[Bevegelse av planeter og satellitter \(44528\)](#)

Når vi kaster en ball skrått oppover følger den en parabelbane. Farten i horisontal retning er konstant fordi den horisontale kraftkomponenten er null etter at ballen har forlatt hånda. Ballen blir hele tiden påvirket av tyngdekraften som akselererer ballen mot jorda. På vei oppover virker tyngdekraften bremsende.

Sirkelbevegelse er et spesialtilfelle av krumlinjet bevegelse. Når vi holder en kule i en hyssing og snurrer kulen rundt må vi bruke en kraft som holder kulen i sirkelbanen. Vi kjenner at kraften blir større når vi øker massen og/eller når vi øker farten. Når vi kjører karusell må vi holde oss fast for ikke å falle av. I sentrifugen til en vaskemaskin presses tøyet mot trommelveggen. I alle tilfellene må det virke en kraft som er rettet inn mot dreieaksen som gjør at legemer ikke forlater sirkelbanen. Når f.eks. planeter og satellitter beveger seg rundt et sentrallegeme må det også finnes en kraft som holder dem i bane.

## Sirkelbevegelser

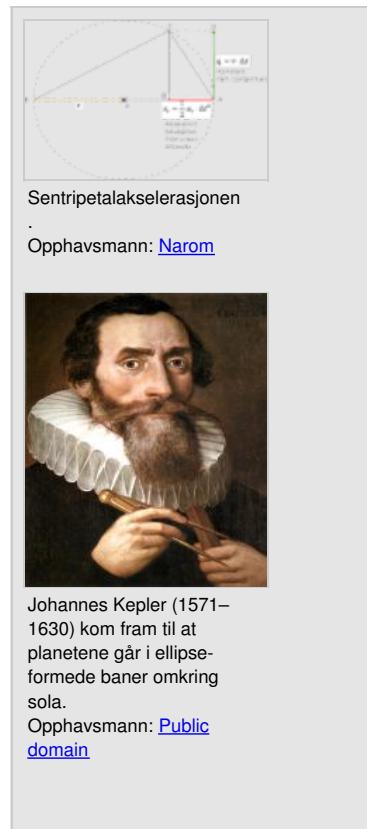
Når et legeme ikke beveger seg langs en rett linje er summen av kreftene på legemet ikke null. Dette er en konsekvens av Newtons 1. lov. At summen av kreftene ikke er null betyr ifølge Newtons 2. lov at legemet er akselerert. Det betyr også at satellitter og planeter påvirkes av krefter, selv om de beveger seg med konstant banefart.

Ved sirkelbevegelse finnes det alltid en kraft som er rettet inn mot sentrum. Denne kraften kalles sentripetalkraft. Akselerasjonen som kraften forårsaker kalles sentripetal-akselerasjonen. Den er også rette tmot sirkelens midtpunkt. Man kan vise (se fordypningsstoff i dette avsnittet) at denne akselerasjonen har størrelsen.

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

der  $a_r$  = sentripetalakselerasjon,  $v$  = banefart,  $r$  = avstand mellom massesentrene,  $T$  = omløpstid (perioden).

[Fordypning: Formel for sentripetalakselerasjon](#)



Johannes Kepler (1571–1630) kom fram til at planetene går i ellipse-formede baner omkring sola.  
Opphavsmann: [Public domain](#)

## Eksempel: Sentripetalakselerasjon

En syklist kjører i en horisontal, sirkelformet sving med radius 140m med en konstant banefart på 23 m/s. Regn ut sentripetalakselerasjonen.

Svar: Sentripetalakselerasjonen, med retning mot sentrum av sirkelbanen, er:

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \frac{(23 \text{ m/s})^2}{140 \text{ m}} = 3,8 \text{ m/s}^2$$

Sentripetalakselerasjonen er  $3,8 \text{ m/s}^2$ .

## Historikk

Himmelrommet på dagen og kanskje spesielt den klare, mørke nattehimmen har tydelig opptatt våre forfedre gjennom årtusener. Det er noe spesielt med det å se måner, stjerner og planeter. Særlig fascinerende er stjerneskudd og kometer. Månen og planetenes bevegelser og faser setter fantasien i sving.

Også når det gjelder kosmologien, dvs. vitenskapen om universet, begynner historien med de gamle grekerne. For ca. 2500 år siden begynte de med litt mer systematiske observasjoner. I den vesteuropeiske kulturen er det Aristoteles (384–322 f. kr.) som tillegges æren for det synet på kosmos som dominerte gjennom middelalderen. I følge Aristoteles sattes ”himmelen” i perfekt og evig bevegelse i skapelsesøyeblikket. Sola, månen, planetene og stjernene var festet til åtte krystallinske sfærer som dreide rundt jorda, det sentrale legemet i universet. Fordi planetene ble observert som lysprikkar som beveget seg fra stjernebilde til stjernebilde, ble de av antikkens astronomer kalt vandrestjerner. Jorda var verdens midtpunkt.

De gamle grekerne trodde at naturen skyr tomrom – horror vacui. Hele universet var fylt av en materie som verken kunne ødelegges eller forandres. Denne ble kalt eter. I tillegg fantes det fire andre elementer, nemlig jord, vann, luft og ild. I det aristoteliske verdensbildet var alle bevegelser i himmelhvelvingen perfekte, og derfor sirkulære.

Den greske astronomen Claudius Ptolemaios (80–120 e. kr.), som levde i Alexandria, gjorde små justeringer av Aristoteles’ geosentriske verdensbilde – spesielt hva angikk planetenes bevegelse. Disse er beskrevet i hans berømte verk Almagost, hvor han også beregnet avstanden til månen med relativ stor nøyaktighet.

Aristoteles og Ptolemaios verdensbilde dominerte helt fram til Kopernikus publiserte sitt berømte verk ”De Revolutionibus Orbium Coelestium” i 1543. Middelalderens univers tilhørte ikke bare naturvitenskapen og filosofiens verden, men omfattet også mennesket og dets gudeverden. Den katolske kirkens teologi var forbundet med gresk kosmologi.

Den polske presten og vitenskapsmannen Nikolaus Kopernikus (1473–1543) var en dyktig astronom. Han fikk i 1514 i oppdrag av paven å revidere kalenderen. Himmellegemenes forbindelse og deres bevegelse måtte da bestemmes. Det var under dette arbeidet, han oppdaget det heliosentriske verdenssystemet. Han var i tvil om riktigheten av den ptolemeiske modellen. Kopernikus innordnet jorda i planetens rekke og konkluderte at alle planetene kretser om sola. Sola var midtpunktet. Jorda beveget seg med en hastighet på ca. 30 km/s i en bane rundt sola. Det var begynnelsen til slutten på den perfekte skapelsen. Gjennom sitt hovedverk ”De Revolutionibus Orbium Coelestium” regnes han ofte som grunnleggeren av den nye astronomien. Kopernikus gjorde imidlertid en stor feil ved å fastholde at alle bevegelsene til himmellegemene var sirkler. På mange måter ble derfor Kopernikus’ verdensbilde nesten vanskeligere å tilpasse observasjonene enn det skolastiske systemet, dvs. den filosofiske retningen i middelalderen som prøvde å forene gresk tenkning med Bibelens ord.

Etter at Kopernikus hadde revidert kalenderen, gikk den nye kosmologien med sola i sentrum sin seiersgang. I 1576 vek forestillingen om et ”lite, koselig univers” plassen for et større system, da Thomas Digges (1543–1595) offentliggjorde det kopernikanske systemet sammen med en ytre krets av stjerner som strakte seg ut i det uendelige.

Den tyske astronomen Johann Kepler studerte Nicolaus Kopernikus' ideer og hadde nye tanker om kosmos. I tillegg fikk han overtatt Tycho Brahes (1546–1600) store observasjonsmateriale. De siste to årene av Brahes liv arbeidet de på samme sted i Praha. Basert på dette, la han grunnlaget for den moderne himmelmekanikken gjennom

formuleringen av de tre berømte Keplers lover. Det er derfor først og fremst Kepler som må få æren for overgangen til det heliosentriske verdensbildet – dvs. at sola var i sentrum. Det var han som brøt med den snart 2000 år gamle antagelsen om at himmellegemene, om de beveger seg, så må de bevege seg i sirkler. Det var den eneste perfekte bevegelsen. Han fastholdt likevel antagelsen om et harmonisk kosmos, selv med elliptiske planetbaner.

# Keplers lover

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Keplers lover \(44546\)](#)

Keplers tre lover for planetenes bevegelse – som står i hans hovedverk fra 1619, kan uttrykkes på følgende måte:

Keplers 1. lov

**Planetene beveger seg i ellipsebaner med sola i den ene brennpunktet.**

Punktet der planeten er nærmest sola kalles perihel, mens der den har størst avstand til sola kalles aphel. Både jordbanen og de fleste andre planetbaner er tilnærmet sirkler.

[Fordypning: Ellipser](#)

Keplers 2. lov

**Den rette linjen mellom sola og planeten beskriver like store flater i like lange tidsrom**

Av andre lov følger at planeten beveger seg raskest, når avstanden til sola er minst, dvs. at planeten befinner seg perihel. Planeten har lavest fart, når avstanden til sola er størst, dvs. i aphel.

En tilsvarende endring i rotasjonsfarten opplever vi hos en skøyteløper som gjør en piruett. Han mister fart, når han åpner armene. Når armene er nærmest kroppen roterer han raskest.

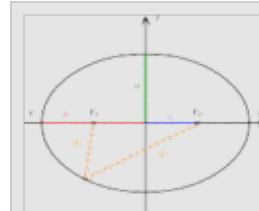
Keplers 3. lov

**Kvadratet av omløpstidene til to planeter forholder seg til hverandre som tredje potens av middelavstandene fra sola.**

Det betyr at forholdet mellom kvadratet til omløpstiden og tredje potens av middelavstandene er den samme for alle planeter.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad \Rightarrow \quad \frac{T^2}{a^3} = \text{konstant}$$

T: omløpstid til en planet eller satellitt rundt sola, a: middelavstand for en planet fra sola (= den store halvakse i planetens ellipsebane). Indeks 1 og 2 refererer til to ulike planeter. Kepler formulerte sine lover for planeter i bane rundt sola, men de gjelder også f.eks. for satellittbaner rundt jorda. Ordene aphel og perihel kommer av at avstandene refererer seg til sola, helios. For satellittbaner er tilsvarende uttrykk apogeeum og perigeum fordi avstandene her refereres til jorda, geos.



F1 og Matematiske sammenhenger i ellipsen.

Opphavsmann: [Narom](#)

A = aphel,

P = perihel,

a = stor halvakse = middelavstand sol–planet,

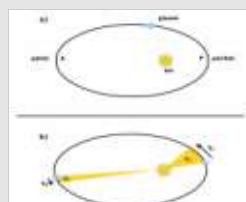
b = liten halvakse,

c = avstand origo–brennpunkt,

d<sub>1</sub> og d<sub>2</sub> er avstandene fra brennpunktene til et punkt på ellipsen.

For alle punkter på ellipsen er d<sub>1</sub> + d<sub>2</sub> = 2 · a.

NAROM



a) Keplers 1. lov.  
Planetene i ellipsebaner rundt sola. b) Keplers 2.  
lov Når arealene  
Opphavsmann: [Narom](#)

Eksempel: Keplers 3. lov

Geostasjonære satellitter går i ca. 36 000 km høyde over jorda, og har en omløpstid på ca. 24 h. Månen har en omløpstid på ca. 27,3 dager rundt jorda. Hvor stor er månens middelavstand fra jordas sentrum?

Jordas radius er  $6,38 \cdot 10^6$  m.'

Svar:

$$\begin{array}{rl} \frac{T_m^2}{T_s^2} &= \frac{a_m^3}{a_s^3} \\ \Rightarrow a_m &= a_s \sqrt[3]{\frac{T_m^2}{T_s^2}} \\ &= (6,28 \cdot 10^6 + 3,6 \cdot 10^7) \text{ m} \end{array}$$

Månens middelavstand fra jorda er  $3,84 \cdot 10^8$  m.

# Newton s gravitasjonslov

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Newton s gravitasjonslov \(44933\)](#)

Isaac Newton (1642–1727) kjente Keplers lover. Ved å beregne de kreftene som må virke for å tilfredsstille lovene, fant Newton gravitasjonsloven i 1692.

Newton forklarte Keplers lover ved å anta at sola virker på hver av planetene med en tiltrekningskraft. Denne kraften måtte være:

- proporsjonal med massen av sola,
- proporsjonal med massen av planetene, og
- omvendt proporsjonal med kvadratet av avstanden fra sola til planetene.

Newton s gravitasjonslov sier:

**To punktformede eller kuleformede legemer med massene  $M$  og  $m$  i innbyrdes avstand  $r$  mellom massesentrene tiltrekker hverandre med kraften  $F$  som har absoluttverdien:**

$$F = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}$$

der gravitasjonskonstanten  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 =$

$$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2.$$

Etter å ha brukt loven på planetene, gikk Newton et fundamentalt skritt videre. Han konkluderte at alle gjenstander tiltrekker hverandre med gravitasjonskrefter. Det er det vi i dag kaller den universelle gravitasjonsloven. Dette betyr at gravitasjonsloven kan brukes overalt i verdensrommet. Newton beregnet månens bane rundt jorda, og omløpstiden for Halleys komet. Han er grunnleggeren for mye av det som kalles klassisk fysikk.

Gravitasjonsloven førte til den første storhetstid for fysikken. Man kunne beregne planet og kometbaner som stemte med observasjonene. Newton forklarte ikke bare himmellegemenes

bevegelse med gravitasjonsloven, men også havvannets veksling mellom flo og fjære. Akkurat som for månen, som er jordas naturlige satellitt, kan Newtons gravitasjonslov også brukes til beregninger av baner til kunstige satellitter.



Astronaut som satellitt  
Opphavsmann: [NASA](#)

## Eksempel: Hubble

Regn ut hastigheten til romteleskopet Hubble som går i en bane 598 km over jorda.

Svar: Banen til Hubble må bestemmes i forhold til jordas sentrum. Jordradien settes til

$$6,38 \cdot 10^6 \text{ m}. Jordas masse  $M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}.$$$

$$\begin{array}{l} F = \gamma \frac{Mm}{r^2} \\ \Rightarrow m \frac{v^2}{r} = \gamma \frac{Mm}{r^2} \\ \Rightarrow v^2 = \gamma \frac{Mr}{r^2} = \gamma \frac{M}{r} \\ \Rightarrow v = \sqrt{\gamma \frac{M}{r}} \end{array}$$

Newton s gravitasjonslov gir også muligheten for beregning av tyngdekraften og tyngdeakselerasjonen i alle høyder.

$$F = m \frac{v^2}{r} = m \cdot g_r$$

Legg merke til at tyngdekraften avtar med kvadratet av avstandene mellom massene.

Kraften virker langs den rette linjen mellom legemene. På en måte kan man si at Keplers verdensbilde ble erstattet av Newtons univers. I prinsipp er det mulig fra Newtons lover å forutsi planetenes nøyaktige posisjon flere hundre år i forveien.

Ved satellittbevegelser er det tyngdekraften som er sentripetal-kraften og tyngdeakselerasjonen som er sentripetal-akselerasjonen. Dette kan vi utnytte til f.eks. å beregne banefarten  $v$  til en satellitt i avstand  $r$  fra himmellegemets sentrum.

$$\begin{aligned} \gamma \frac{M \cdot m}{r^2} &= m \cdot v^2 / r \\ v &= \sqrt{\gamma \frac{M}{r}} \end{aligned}$$

Den siste likning viser at hastigheten til en sattellitt er omvendt proposjonal med radien i baneplanet.

#### Eksempel: Tyngdekraftens arbeid

Hvor stor arbeid utfører tyngdekraften på en satellitt?

Svar: Arbeid er per definisjon kraft i bevegelsesretning ganger forflytning:  $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$

Det virker en konstant kraft på en satellitt i sirkelbane, og satellitten forflytter seg hele tiden. Men fartsretningen er tangential til sirkelen, mens kraften virker langs radius inn mot sentrum. Vinkelen mellom kraft og bevegelse er dermed  $90^\circ$ .  $W = F \cdot s \cdot \cos 90^\circ = 0$ .

# Frigjøringsarbeid

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Frigjøringsarbeid \(44947\)](#)

Siden nullnivået for potensiell energi er valgt uendelig langt borte, vil den totale energien til et objekt som er bundet til tyngdefeltet alltid være negativ. Arbeidet som må utføres på objektet for å fjerne det fra tyngdefeltet til et himmellegeme, kalles frigjøringsarbeid.

Siden nullnivået for potensiell energi er valgt uendelig langt borte, vil den totale energien til et objekt som er bundet til tyngdefeltet alltid være negativ. Arbeidet som må utføres på objektet for å fjerne det fra tyngdefeltet til et himmellegeme, kalles frigjøringsarbeid. Frigjøringsarbeidet  $W$  tilsvarer energien vi må tilføre objektet for å "løfte" det til nullnivået for potensiell energi. Det betyr at summen av den totale energien  $E_t$  og det tilførte arbeidet må være  $\geq 0$  for at objektet kan forlate tyngdefeltet.

$$W + E_t = 0 \Rightarrow W = -E_t$$

Frigjøringsarbeidet har den samme tallverdien som den totale energien til objektet, men det er positivt. Et objektet en satellitt er frigjøringsarbeidet:

$$W = \gamma \frac{M}{r} \cdot m$$

$W$  = frigjøringsarbeid for en satellitt, og  $E_t$  = satellittens totale energi.

Frigjøringsarbeid på makronivå har en analog i ioniseringsenergien på mikronivået, dvs. i forbindelse med atomer og molekyler. (For atomer velges nullnivået der hvor tiltrekningskraften fra kjernen på et elektron er null. Tallverdien for energien til et elektron i bane rundt atomkjernen gir oss energien vi trenger for å fjerne det. Denne energien kalles ioniseringsenergien.)

Vil vi beregne arbeidet som må utføres på en rakett slik at den forlater tyngdefeltet, kan vi ikke bruke den forrige formelen fordi den forutsetter at objektet har den kinetiske energien som en satellitt har. Ved oppskyting av raketter er det kun jordrotasjonen som bidrar til den kinetiske energien. Generelt gjelder:

$$W = \gamma \frac{M}{r} \cdot m \cdot v^2$$

$W$  = frigjøringsarbeid,  $E_t$  = objektets totale energi, og  $v$  = farten til objektet (ved oppskyting fra jordoverflaten: dvs. farten pga. jordrotasjonen).

# Unnslipningshastighet

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Unnslipningshastighet \(44996\)](#)

Minimum hastighet et objekt må ha for å forlate gravitasjonsfeltet til et himmellegeme, kalles unnslipningshastighet.

Det betyr at totalenergi må være  $\geq 0$ . Dette fører oss til følgende formel:

$$E_t = E_p + E_k = -\gamma \frac{M \cdot m}{r} + \frac{1}{2} m \cdot v^2 = 0$$

Når vi løser likningen med hensyn på  $v$  får vi

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma M}{r}}$$

der  $v$  = unnslipningshastighet,  $g = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  (gravitasjonskonstant),  $M$  = massen til himmellegemet,  $m$  = massen til objektet og  $r$  = avstand fra objektet til himmellegemets massesentrums.

Om objektet har denne minimumshastigheten vil det forlate tyngdefeltet til himmellegemet. Vi har sett bort fra luftmotstand.

## Eksempel: Jordas unnslipningshastighet

Hvor stor er jordas unnslipningshastighet?

Svar: Vi bruker likning for unnslipningshastighet og setter inn: jordas masse  $M_j = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ , jordas radius

$R_j = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ , Newtons gravitasjonskonstant

$g = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ ,

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma M_j R_j}{R_j^2}} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,97 \cdot 10^{24} \cdot 6,37 \cdot 10^6}{(6,37 \cdot 10^6)^2}} = 11,2 \text{ km/s}$$

Et objekt som skytes rett opp fra jordoverflaten må minimum en en fart på 11,2 km/s for å kunne forlate jordas tyngdefelt. Den videre bevegelsen til romfartøyet vil bestemmes av sola.

Romsonden NEAR Shoemaker landet på asteroiden Eros den 12.2.2001. Denne asteroiden har en unnslipningsfart på ca. 35 km/h. Den er så lav at en sprettende champagnekork ville gå i bane rundt asteroiden.

For en satellitt i bane kan vi utlede en annen formel for unnslipningshastighet. Her tar vi utgangspunkt i likningen for satellittenes banefart.

$$v_b = \sqrt{\frac{\gamma M}{r}}$$

Vi setter uttrykket for banefarten inn i likningen for unnslipningshastigheten.

$\$v = \sqrt{\frac{2}{\gamma} \cdot M} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{M}} = \sqrt{2} \cdot v_b$   
Skal en satellitt forlate jordas tyngdefelt må den ha en rakettmotor som gir satellitten en fart på minst  $\sqrt{2}$  ganger banefarten.

### Eksempel: Unnslipningsfart for en satellitt

Hvilken fart må en geostasjonær satellitt minst ha for å unnslippe jordas tyngdefelt?

Svar: Vi har tidligere beregnet banefarten til en geostasjonær satellitt til  $3,08 \cdot 10^3$  m/s.

Unnslipningshastigheten er dermed

$$v = \sqrt{2} \cdot v_b = \sqrt{2} \cdot 3,08 \cdot 10^3 \text{ m/s} = 4,4 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

Unnslipningsfarten for en geostasjonær satellitt er 4,4 km/s.

Under "Energiformer" har vi lært at molekyler fra ulike gasser ved den samme temperaturen har den samme gjennomsnittlige kinetiske energien. Dette fører til at lette molekyler beveger seg raskere enn tyngre. For planeter med liten masse kan lette molekyler ha en fart som er større enn unnslipningshastighet. Slike grunnstoffer vil vi derfor ikke finne i atmosfæren til denne planeten, (hvis de ikke dannes eller tilføres kontinuerlig). I en gass finnes det alltid noen molekyler som har høyere fart enn gjennomsnittsfarten. Er denne farten høyere enn unnslipningshastigheten vil disse molekyler forlate planetens tyngdefelt. Unnslipningshastigheten har derfor stor betydning for atmosfæresammensetningen til en planet.

Mens frigjøringsarbeid er avhengig av massen til objektet som skal fraktes ut av tyngdefeltet er unnslipningshastigheten uavhengig av massen.

# Fritt fall, vektløshet, mikrogravitasjon

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Fritt fall, vektløshet, mikrogravitasjon \(45003\)](#)

En person står i en heis – som er i ro, på en vekt som viser 80 kg. Vekten er egentlig en kraftmåler. Kraft og masse på jordoverflaten er proporsjonale. Tyngdeakselerasjonen er proporsjonalitets-faktoren. Personen utøver en kraft  $F = 80 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 780 \text{ N}$  som er tyngdekraften. Paradoksal nok er det ikke tyngdekraften som gjør at vi føler oss tunge. Det er normalkraften som virker på oss. Settes heisen i bevegelse nedover føler vi oss lettere, selv om tyngdekraften er uforandret. Men normalkraften fra underlaget er mindre. Kappes heisevaieren er vi i fritt fall. Badevekten vil ikke vise noe utslag fordi vi ikke utøver noen kraft på den. Dermed har vekten heller ingen motkraft på oss. Da er det bare én kraft som virker på oss, og det er tyngdekraften. Når vi er i fritt fall er vi vektløse. Generelt kan vi si at ved vektløshet er det kun tyngde-kraften som virker. Det er vanskelig å realisere at ingen andre krefter er tilstede. Tilstanden med tilnærmet vektløshet kalles mikrogravitasjon. Selve ordet skulle tilsi at kretene gir akselerasjoner i størrelsesorden  $10^{-6}g$ , men uttrykket brukes også når forstyrrelsene fører til akselerasjoner med opptil  $10^{-3}g$  (altså egentlig "milligravitasjon").



Illustrasjon fra Jules Vernes roman "Fra jorda til månen". Passasjerene i romfartøyet opplever vektløshet for første gang, noe som var ren science fiction da romanen ble skrevet i 1865.

## g-forstyrrelser i en romferge

Kilde	Størrelsesorden
Oppskytingen	2 – 3 g
Banekorreksjoner	10–3g til 0, 5g
Vibrasjoner i skroget (kjøleskap, centrifuger) og bevegelse til astronautene, f.eks. trening,	10–2g
Kraftig pusting, hosting	2 · 10–3g
Nedbremsing pga. friksjon i atmosfæren (øker jo nærmere jorda romferga kretser og øker med størrelsen på overflaten til romferga som vendes i baneretningen)	ca. 10–5 g i ca. 200 km høyde ca. 10–10g i 1000 km høyde



Vektløshet under parabelflyvning.  
Opphavsmann: [NASA](#)



Vektløshet i Spacelab.  
Opphavsmann: [NASA](#)

## Hvordan kan man skape vektløshet?

Man kan bruke falltårn hvor luften i en sylinder pumpes ut. Eksperimentkapselen er i fritt fall i ca. 4,5 s, når fallhøyden i tårnet er 100 m. Etter ombygging i 2004 har man fordoblet tiden i falltårnet ved Universitetet i Bremen uten å endre tårnhøyden. Istedentfor å slippe eksperimentkapselen fra toppen starter man i bunnen av tårnet hvor en katapult gir kapselen starthastigheten som trenges for å nå toppen. Etter at kapselen har fått starfarten er det kun tyngdekraften som virker til den lander igjen. Den er altså i "fritt fall" både på vei opp og på vei ned.

En annen måte å oppnå tilnærmet vektløshet på er såkalte parabelflyvninger. Et fly akselererer bratt oppover før motorene slås av. Flyet følger en parabelbane. Så lenge motorene er slått av, er det kun tyngdekraften som virker på flyet, når vi ser bort fra forstyrrelsene fra luftmotstanden. Perioden med tilnærmet vektløshet varer i ca. 20 – 25 sekunder og opptil ett minutt hvor eksperimentene kan utføres. Så slås motoren på igjen for å fange opp fallet og begynne på en ny parabel. Ofte flys det omtrent 25 parabler på en flytur.

I rakter oppnås det vektløshet, når motoren slutter å brenne. Også raketten beskriver en parabelbane. Varigheten for perioden med fritt fall er avhengig av hvor høyt raketten skytes opp. Her har man ca. 15 – 20 minutter til å gjennomføre mikrogravitasjons-eksperimenter.

Satellitter og dermed også romstasjoner og romfartøy i sirkelbane rundt jorda er kun påvirket av tyngdekraften. De er i fritt fall. Det betyr at det hersker konstant vektløshet.

[Fordypning: Fysiske prosesser som forutsetter gravitasjonskraft.](#)

**Eksempel: Tyngdekraft ved vektløshet**

En astronaut på 70 kg befinner seg om bord i romfergen som kretser i 250 km høyde rundt jorda.

- Hvor stor er tyngdeakselerasjonen i denne høyden?
- Hvilken tyngdekraft virker på astronauten?

**Svar**

- Vi bruker Newtons gravitasjonslov: 
$$\frac{F}{m} = \frac{GM\gamma}{r^2}$$
 der  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ,  $M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ,  $\gamma = 9,81 \text{ m/s}^2$  og  $r = 6,37 \cdot 10^6 + 2,50 \cdot 10^5 \text{ m}$ .  
$$F = m \cdot g = 70 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 686,7 \text{ N}$$
. Men han kjenner ingen akselerasjon. Han får inntrykk av å være i ro.
  - $G = m \cdot g = 70 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 686,7 \text{ N}$
- Tyngdekraften på astronauten er 686,7 N. Men fordi alt omkring ham faller med den samme fartens opplever han vektløshet. Han er i fritt fall. Tyngdekraften er den eneste kraften som virker på ham. Normalkraften mangler.

# Sammendrag: Mekanikk

Forfatter: Alv Egeland, Narom

[Sammendrag: Mekanikk \(45034\)](#)

Skalare størrelser er fullstendig beskrevet med måltall og måleenhet, vektorer trenger i tillegg angivelsen av retningen.

## Fart

Gjennomsnittsfart er forflytning per tidsenhet:

$$\text{Gjennomsnittsfart} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

ved momentanfart går  $\Delta t \rightarrow 0$ . Farten er gitt ved stigningen i  $s-t$ -grafen.

## Akselerasjon

Gjennomsnittsakselerasjon er fartsendring per tidsenhet.

$$\text{Gjennomsnittsakselerasjon} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

ved momentanakselerasjon går  $\Delta t \rightarrow 0$  Akselerasjonen er gitt ved stigningen i  $v-t$ -grafen.

## Bevegelsesligningene ved konstant akselerasjon

$$\begin{aligned} v &= v_0 + a \cdot t \\ s &= \frac{v_0 + v}{2} \cdot t \\ s &= \frac{1}{2} (v_0 + v) \cdot t = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \\ v^2 - v_0^2 &= 2as \end{aligned}$$

## Newtons lover

Newton 1. lov: Når summen av kreftene på et legeme er null, er legemet i ro eller beveger seg rettlinjet med konstant fart:

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{v} = \text{konstant}$$

Newton 2. lov: Når summen av kreftene ikke er null, er legemet akselerert:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Newton 3. lov: Når et legeme A virker med en kraft på legeme B, så virker legeme B tilbake på legeme A med en like stor og motsatt rettet kraft:

$$\vec{F}_A = -\vec{F}_B$$

Impulsloven:

$$\left( \sum \vec{F} \right) \cdot t = m \cdot (v - v_0)$$

## Masse og tyngde

Massen er avhengig av mengden materie som er uavhengig av oppholdsstedet. Tyngde er kraft som bestemmes av tyngdeakselerasjonen på stedet og massen til legemet. Tyngden er avhengig av stedet objektet befinner seg på.

Tyngdekraft:

$$G = m \cdot g$$

Vektløshet, mikrogravitasjon, fritt fall

Ved vektløshet er det kun tyngdekraften som virker. Da befinner legemet seg i fritt fall. Ved vektløshet finnes det verken oppdrift, sedimentasjon eller konveksjon. Mikrogravitasjon er en tilstand av tilnærmet vektløshet.

## Arbeid

Arbeid er produktet av kraften i forflytningsretningen og forflytningen:

$$\text{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} = F \cdot s \cos \alpha$$

Arbeid mot tyngdekraften:

$$W = G \cdot m \cdot g \cdot h$$

## Effekt

Effekt er arbeid per tidsenhet:

$$P = \frac{W}{t}$$

## Mekanisk energi

Kinetisk energi og potensiell energi er formene formekanisk energi. Også andre energiformer kan føres tilbake til disse to formene for energi.

Kinetisk energi:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Gjennomsnittlig kinetisk energi i gassmolekyler:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$$

Potensiell energi:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

## Keplers lover

Keplers 1. lov: Planetene går i ellipsebaner med sola i det ene brennpunktet.

Keplers 2. lov: Linjen mellom sola og planeten beveger seg over like store flater i like lange tidsrom.

Keplers 3. lov: Kvadratet av omløpstidene til to planeter forholder seg til hverandre som tredje potens av middelavstandene fra sola:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad \Rightarrow \quad \frac{T^2}{a^3} = \text{konstant}$$

## Sirkelbevegelse

Ved sirkelbevegelse virker det en kraft som er rettet inn mot sirkelmidten. Denne kraften kalles sentripetalkraft. Akselerasjonen som den forårsaker er sentripetalakselerasjonen.

Sentripetalakselerasjon:

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

## Newton gravitasjonslov

To punktformede eller kuleformede legemer med massene  $M$  og  $m$  i innbyrdes avstand  $r$  mellom massesentrene tiltrekker hverandre med kraften  $F$  som har absoluttverdien :

$$F = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}$$

### Satellittenes totale energi

Nullnivået for potensiell energi velger vi som uendelig langt borte. Satellittenes totale energi er summen av potensiell energi og kinetisk energi. Den kinetiske energien ganget med  $-2$  gir den potensielle energien. Den kinetiske energien ganget med  $-1$  gir den totale energien. Et objekt som har negativ totalenergi vil ikke kunne forlate jordas tyngdefelt.

Satellittenes potensielle energi:

$$E_p = -\gamma \cdot \frac{M \cdot m}{r}$$

Satellittenes kinetiske energi:

$$E_k = \gamma \cdot \frac{M \cdot m}{2r}$$

Satellittenes totale energi:

$$E_t = -\gamma \cdot \frac{M \cdot m}{2r}$$

### Unnslipningshastighet

Den farten et legeme minst må ha for å unnslippe tyngdefeltet til et himmellegeme kalles unnslipningshastighet.

Unnslipningshastigheten for et objekt fra overflaten til et himmellegeme:

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma M}{r}}$$

Unnslipningshastighet for en satellitt:

$$v = \sqrt{2} v_b$$

# Atom- og kjernefysikk

## Innledning

Forfatter: Alv Egeland

[Innledning \(55074\)](#)

Atomfysikk handler om oppbygging av atomer og prosesser som skjer i og mellom atomer. Utsendelse (emisjon) og opptak (absorpsjon) av lys skyldes endringer i elektronenes energi, altså prosesser som skjer rundt kjernen.

I kjernefysikken studerer vi oppbygningen av atomkjernen og endringer i kjernen. Dette skjer f.eks. ved utsendelse av radioaktiv stråling og ved fisjon og fusjon. Det er en vesentlig forskjell mellom kjernreaksjoner og reaksjoner som kun involverer elektronene. I kjernereaksjoner kan det dannes atomer av andre grunnstoffer. Vi skal i denne læringsressursen nøye oss med en enkel atommodell og bare streife kvantemekanikken og Einsteins formel om masse-energi-ekvivalens. Ioniserende stråling både på jorda og i verdensrommet vil bli omtalt.

# Materiens oppbygging

Forfatter: Narom

[Materiens oppbygging \(57927\)](#)

## Historikk

Gjennom historien har det vært mange forskjellige forestillinger om materiens oppbygning. De gamle grekerne mente at materien er bygd opp av fire grunnelementer, nemlig: jord, vann, luft og ild. Leukipp fra Milet og hans elev Demokrit fra Abdera (460 – 370 f.Kr.) mente at det fantes små byggesteiner som ikke kunne deles videre. Det er fra den tiden ordet atom har sin opprinnelse. Det greske "atomos" betyr udelelig. Fram til ca. 1900 trodde man at grunnstoffene var bygd opp av udeelige atomer som var naturens minste byggesteiner.

I dag vet vi at atomer består av mindre elementærpartikler. Men betegnelsen atomer bruker vi fortsatt på de minste enhetene som har grunnstoffs kjemiske egenskaper. Man trodde lenge at protoner, nøytroner og elektroner som bygger atomer av alle grunnstoffene, er de minste enhetene. Elektroner er også etter nyere forskning udeelige. De tilhører en gruppe minstepartikler som kalles leptoner. Protoner og nøytroner består av såkalte kvarker. Jakten på materiens minste partikler fortsetter. I store akseleratorer gjør man kollisjonsekspesimenter mellom små partikler. Slik forskning foregår f.eks. ved CERN i Genève og DESY i Hamburg.

## Protoner, nøytroner, elektroner

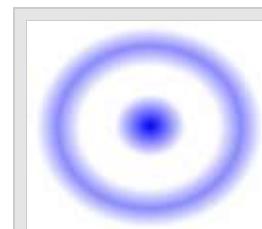
Et atom er den minste enheten som har grunnstoffenes egenskaper. Det som bestemmer hvilket grunnstoff atomet tilhører er antall protoner i kjernen. Protoner er positivt ladde partikler. Deres masse er 1 atommasseenhet (1 u). Et nøytralt atom har like mange elektroner som protoner. Elektronene har negativ ladning. De beveger seg i en såkalt elektronsky rundt kjernen, som vist i figuren til høyre. Det området hvor det er størst sannsynlig for at et elektron oppholder seg, betegnes som et elektronskall i Bohrs atommodell. For atomer med høyere atomnumre har elektronskyene ikke kuleform.



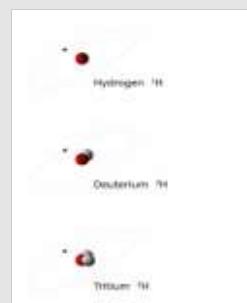
Bohrs atommodell: a) Et elektron beveger seg i en bane med en bestemt avstand fra kjernen. b) Alle mulige baner i samme avstand fra kjernen beskriver en kule som betegnes som et elektronskall.

Opphavsmann: [Narom](#)

Elektronmassen er så liten i forhold til protonets masse (ca. 1/2000) at vi i mange beregninger ikke tar hensyn til den. Nøytronene finnes i kjernen. De er elektrisk nøytrale og deres masse er omtrent 1u. Atomer av samme grunnstoff kan ha forskjellig antall nøytroner. Disse variantene kalles isotoper til et grunnstoff. Isotopene av hydrogen er vist i figuren under. Isotopene har de samme kjemiske egenskaper, men pga. av ulik masse litt forskjellige fysiske egenskaper. Noen kan også være radioaktive. Massen til et atom bestemmes av antall partikler i kjernen – nukleoner. Massetallet eller nukleontallet ( $A$ ) er summen av antall protoner ( $Z$ ) og antall nøytroner ( $N$ ): dvs.  $A=Z+N$ . Man skriver nukleontallet som en liten indeks oppan grunnstoffsymbolet.



Elektronskymodellen for Litium. Litium har 3 elektroner. De to innerste elektronene har størst sannsynlighet for å oppholde seg nær sentrum hvor skyen er tegnet tettest (tilsvarer K-skallet i Bohrs modell). Det ytre elektronet vil befinner seg innenfor den ytre elektronskallen (tilsvarer L-skallet). Vi kan ikke forutsi elektronenes nøyaktige posisjon i skallet.  
Opphavsmann: [Narom](#)



De tre isotopene av hydrogen. Vanlig hydrogen ( ${}_1^1\text{H}$ ), som utgjør 99,985 % av hydrogen i naturen, har

Protontallet skrives som liten indeks nede foran symbolet eller utelates.  ${}^A_Z X$ . Massetallet til et grunnstoff, som angis i periodesystemet, er en gjennomsnittsverdi for atommassen til de naturlig forekommende isotoper. Denne verdien behøver ikke være et helt tall.

### Eksempel: Atommasse

Bor består av hovedsakelig to isotoper: 18,8%  ${}^{10}B$  med massen 10,0 u og 81,2%  ${}^{11}B$  med massen 11,0 u. Beregn atommassen til bor.

Svar:

$$\frac{18.8}{100} \cdot 10.0 + \frac{81.2}{100} \cdot 11.0u = 10.8u$$

Et atom med et bestemt antall protoner og nøytroner kalles en nuklide.  ${}^1_1 H$  er en nuklide,  ${}^2_1 H$  er en annen nuklide. Den er en isotop av hydrogen.

### Thomsons atommodell

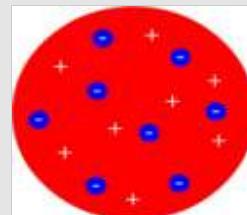
Joseph John Thomson (1856 – 1940) har fått æren for å ha oppdaget elektronet. I 1898 visste han at elektroner har negativ ladning og at atomet som helhet var elektrisk nøytralt. Protonet var ennå ikke oppdaget. Hans modell gikk ut på at elektronene var jevnt fordelt i en homogen grunnmasse med positiv ladning. Elektronene var som rosiner i en bolle. Populært kalles derfor modellen hans rosinbollemodellen.

### Rutherford's atommodell

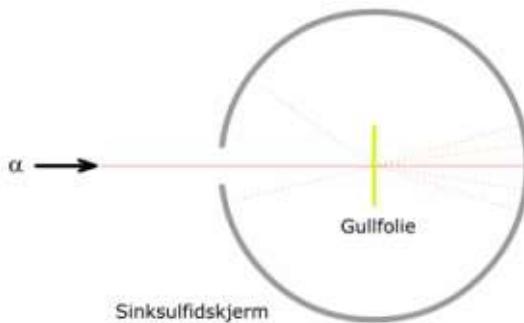
Med utgangspunkt i Thomsons atommodell gjennomførte Ernest Rutherford (1871 – 1937) forsøk for å studere atomenes indre struktur, se figur 3.4. Han bestrålte tynne folier av gull og aluminium med energirike alfapartikler fra en radioaktiv kilde. En detektor plassert i en ring rundt folien viste hvor strålingen traff. Det meste av strålingen gikk upåvirket gjennom folien. Noen få partikler ble avbøyd og et veldig lite antall spratt tilbake. "Det var like utrolig som å skyte med en granat mot silkepapir og granaten kommer tilbake og treffer deg," uttalte han. Avbøyningen måtte skyldes støt mot massive deler av atomet og frastøting fra dem. Det var klart at Thomsons modell ikke kunne forklare observasjonene.

kun ett proton i kjernen.  
Hydrogenisotopen som kalles deuterium ( ${}^2_1 H$ ) har ett proton og ett nøytron.  
Tritium ( ${}^3_1 H$ ) er den tyngste av hydrogenisotopene. Den har ett proton og to nøytroner i kjernen.  
Tritium er radioaktiv.  
Opphavsmann: [Narom](#)

**NAROM**



Thomsons atommodell (rosinbollemodellen). De negative elektronene er som rosiner i en homogen grunnmasse med positiv ladning.  
Opphavsmann: [Narom](#)



Rutherford's forsøk: Alfapartikler sendes mot en gullfolie. En skjerm av sinksulfid viser ved et lysglint hvor strålingen treffer. De fleste partiklene går rett gjennom folien. Noen avbøyes svakt. Noen få partikler, nemlig de som treffer den lille positive kjernen som inneholder nesten all masse, reflekteres tilbake.

Opphavsmann: [Narom](#)

Rutherford trakk følgende konklusjoner, som var grunnlaget for hans atommodell (1911):

1. Nesten hele atomets masse er samlet i kjernen, som er positivt ladd.
2. Negative elektroner beveger seg rundt kjernen -- omrent som planetene rundt sola. Atomet er elektrisk nøytralt. Derfor er antallet elektroner bestemt av kjernens ladning.
3. Atomet har mellom  $10^4$  og  $10^5$  ganger større diameter enn kjernens dimensjon. Det meste av atomets volum er tomrom.

Elektroner som beveger seg rundt atomkjernen, endrer retning hele tiden. Det betyr, ifølge Newtons 2. lov, at de er akselererte. Akselererte elektroner sender ut elektronmagnetiske bølger. Man skulle derfor forvente at elektronene i sine baner rundt atomkjernen sendte ut stråling. Men det igjen ville bety at elektronene mistet energi og fart og ville til slutt forsvinne i atomkjernen. Derfor ville et atom etter Rutherford's modell ikke være stabilt, som var hovedproblemet med modellen.

# Emisjons- og absorpsjonsspektre

Forfatter: Narom

[Emisjons- og absorpsjonsspektre \(58663\)](#)

## Linjespektere og Bohrs atommodell

Det var kjent at lysende gasser sender ut stråling med bestemte bølgelengder, som er karakteristiske for grunnstoffet. Rutherford-modellen kunne ikke forklare denne karakteristiske strålingen. Forklaringen på dette fenomenet har den danske fysikeren Niels Bohr (1885 – 1962). Han satte fram to postulater i 1913. (Et postulat er en teori som ikke kan bevises, men som likevel antas å være riktig.). Postulatene forklarte både at gassene sender ut karakteristisk lys og at atomene og molekylene ikke bryter sammen, når de sender ut lys.

1. Hvert atom har en rekke stabile tilstander. I hver slik tilstand har det en fast energi og elektronene beveger seg da i helt spesielle baner. Det laveste energinivået i et atom kalles grunntilstanden. Andre tilstander kalles eksiterte tilstander.
2. Emisjoner fra atomene oppstår når elektronene hopper fra en bane til en annen bane nærmere kjernen som har et lavere energinivå. Hele energiforskjellen i dette hoppet – kvantespranget, sendes ut som et foton - også kalt et lyskvant.

Vi skal som Bohr bruke hydrogen, som består av atomer med kun ett elektron, til å forklare hvordan linjespektere oppstår, se figuren under. For hydrogen atomer i grunntilstanden kretser elektronet i bane  $n = 1$ . (Nummer på banen betegnes også som energikvantetallet.) Hvis elektronet tilføres energi hopper det til en banemed høyere energi (lengre ute). Vi sier da at atomet er eksert. Når det så hopper tilbake til en bane nærmere kjernen vil energiforskjellen sendes ut som lys. Hver elektronbane har bestemte energinivåer. Derfor vil energiforskjellen også ha helt bestemte verdier. Disse energiforskjellene som sendes ut i form av elektromagnetisk stråling, kalles energikvanter eller fotoner. En bestemt energiforskjell tilsvarer en bestemt bølgelengde og frekvens for lyset. Sammenhengen er følgende:

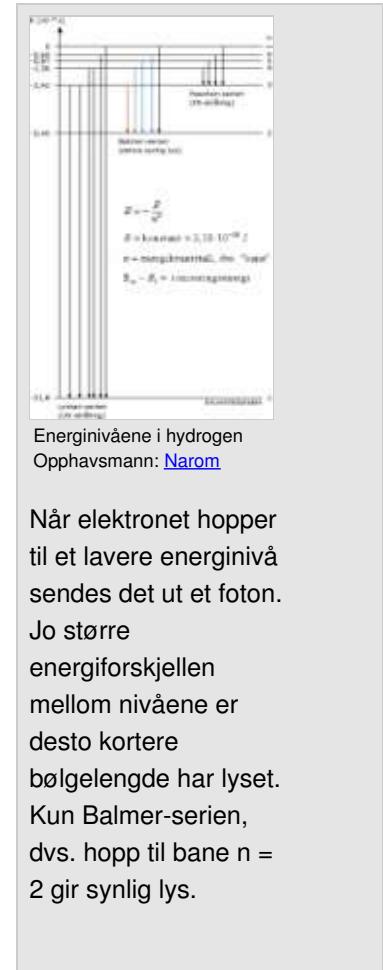
$$\Delta E = h \cdot c \cdot \frac{1}{\lambda}$$

der  $\Delta E$  er energiforskjellen,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js (Plancks konstant),  $c$  er lyshastigheten og  $\lambda$  er bølgelengden. Om energien øker, så øker også frekvensen, men bølgelengden avtar.

Bohr fant en formel til å beregne energinivåene i hydrogen. Denne formelen er en variant av den empiriske formelen som sveitseren Balmer hadde funnet tidligere:

$$E_n = -\frac{B}{n^2}$$

der  $E_n$  er n-te energinivå,  $n$  energikvantetall (dvs. nummer på elektronbane),  $B = 2,18 \cdot 10^{-18}$  J = 13,61 eV (Bohrs konstant).



### Eksempel: Sammenhengen mellom bølgelengde og energi

Hvilken bølgelengde har lyset som sendes ut ved hopp fra bane  $n = 2$  til  $n = 1$ ?

Svar: Vi regner først ut energiforskjellen:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -\frac{B}{2^2} - \left( -\frac{B}{1^2} \right) = \frac{3}{4} B = \frac{3}{4} \cdot 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 1,64 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Vi bruker formelen  $\Delta E = h \cdot c / \lambda$  til å beregne bølgelengden:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,64 \cdot 10^{-18} \text{ J}} = 1,21 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 121 \text{ nm}$$

Fotonene som sendes ut har en bølgelengde på 121 nm, dvs. UV-stråling.

Av figuren over ser vi at avstanden mellom energinivåene blir mindre jo høyere energikvantetallet er. Alle hopp til bane  $n = 1$  gir UV-lys. Denne serien betegnes som Lyman-serien. Elektronhopp fra høyere baner til bane  $n = 2$  først saker linjene i den synlige delen av spekteret. Disse betegnes som Balmer-serien. Det er disse emisjonene som gir hydrogenlinjene  $H_\alpha$  og  $H_\beta$  i nordlyset. Elektronene som hopper tilbake til bane  $n = 3$  sender ut fotoner med bølgelengder i det infrarøde området i spekteret. Disse utgjør Paschen-serien.

Et spektrum som oppstår når lys sendes ut, kalles et emisjonsspektrum. Et godt eksempel på et emisjonsspektrum er nordlys.

Linjespektre med tydelige atskilte linjer sendes ut av lysende, én-atomære gasser med lav tetthet, som f.eks. helium (He) og atomært oksygen (O). Gasser som består av fler-atomære molekyler har bredere emisjonslinjer, ofte i grupper. Slike spektere kalles båndspektre molekylspektre, eller bare bånd. Energinivåene til elektronene i fler-atomære molekyler ligger tettere, fordi atomene påvirker hverandre.

I faste stoffer og væsker, men også gasser med høy tetthet, påvirker nabatomene hverandre så mye at energinivåene i eksitert tilstand ligger veldig tett. Slike lysende stoffer sender ut lys av alle bølgelengder. Vi ser et kontinuerlig spektrum med jevn overgang mellom alle farger – som i for eksempel regnbuen. Det er slikt det kontinuerlige spektrum både fra sola og fra glødelamper oppstår.

## Laserstråling

Laserstråling har en rekke anvendelser. I forbindelsen med romfysikken er laserstråling viktig til atmosfæreanalyse, som f.eks. bestemmelse av ozoninnholdet.

Laserlys er karakterisert ved følgende egenskaper:

1. Det er monokromatisk, dvs at lyset har nøyaktig en bølgelengde.
2. Det er koherent, dvs. at lysbølgene svinger i fase.
3. Det stråler i en retning, dvs. at lysbølgene er helt parallele.
4. Det kan fokuseres veldig skarpt. En intensitet på  $10^{17}$  W/cm er lett å oppnå (mot ca.  $10^3$  W/cm for annet lys).

Laser er et akronym som står for Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, som betyr lysforsterkning ved stimulert utstråling.

Prinsippet for hvordan laserlys oppstår er vist i figuren under.

Treffer dette fotonet på et eksitert atom stimuleres det eksiterte atomet til å sende ut et foton som har like egenskaper som det stimulerende foton, som forblir uforandret. Dette er den grunnleggende prosessen for å skape laserlys.

### Prinsippet for laserstråling

Prinsippet for laserstråling.  
Opphavsmann: [NAROM](#)

Prinsippet for laserstråling. Et atom i grunntilstanden ( $E_0$ ) absorberer et foton ( $E_x - E_0 = h\cdot\lambda$ ) og går over til en eksitert tilstand ( $E_x$ ). Det eksiterte atomet sender ut et foton og går tilbake til grunntilstanden.

Figuren viser et foton med energiforskjellen mellom energinivået til den eksitere tilstanden og grunntilstanden (eller en eksiter tilstand med lavere energi) stimulerer et eksiter atom til å sende ut et foton. Det stimulerende og det emitterte fotonet har samme energi, fase og retning. Hvert eksiter atom som treffes av et foton stimuleres til å sende ut et foton. For hvert treff fordobles antall fotoner. Vi får en kjedreaksjon. Det er slikt laserlys oppstår. Men for at denne prosessen fungerer må det finnes nok eksiterede atomer. Først når det finnes flere atomer i den eksiterede tilstanden kan vi få laserlys. Hvordan man teknisk kan oppnå dette skal vi ikke gå inn på her.

### Absorpsjonsspektre

Lys med alle bølgelengder danner et kontinuerlig spektrum. Når vi sender et kontinuerlig spektrum gjennom en gass, ser vi mørke linjer i spekteret. Linjene ligger på de samme bølgelengdene som utgjør emisjonsspekteret til gassen. Forklaringen er at gassen absorberer fotoner med den samme bølgelengden som eksiterede atomer sender ut. Spekteret kalles derfor et absorpsjonsspektrum. I likhet med emisjonsspekteret kan også dette brukes til å identifisere stoffer. Det gir muligheten til å finne ut hvilke gasser som finnes i atmosfæren til f.eks. sola og fjerne stjerner.

Mørke Fraunhofer linjer ble observert i solspekteret. Noen av dem skyldtes absorpsjon fra en gass som ikke var kjent på jorda og som fikk navnet helium (avledet av "helios", gresk for sol). Først senere fant man dette grunnstoffet også på jorda.



### Ionisering

Hvis energien som et atom mottar er stor nok, kan elektronet fjernes helt. Da blir atomet ionisert.

#### Eksempel: Ioniseringsenergi

Beregn ioniseringsenergien til hydrogen.

Svar: Energien som må tilføres tilsvarer energiforskjellen mellom elektronet i grunntilstanden  $n=1$  og elektronet på nivå  $n=\infty$ .

$$\Delta E = E_{\infty} - E_1 = 0 - \left( -\frac{B}{1^2} \right) = B = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Ioniseringsenergien til hydrogen er  $2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$  og er dermed lik Bohrs konstant.

Ioniseringsenergi for et atom er analogt til frigjøringsarbeid som trenges for å fjerne et legeme fra gravitasjonsfeltet.

Emisjons- og absorpsjonsspektere kan gi opplysninger ikke bare om hvilke stoffer som finnes, men også deres mengde, temperatur, tetthet, magnetfeltstyrken og fart for legemer av ulik størrelse - fra gasspartikler til galakser. (Disse fartsbestemmelser gjøres ved hjelp av dopplereffekten.)

# Kvantefysikk

Forfatter: Narom

[Kvantefysikk \(59340\)](#)

## Innledning til kvantefysikken

Rutherford og Bohrs teorier var et viktig steg på veien til en målbar beskrivelse av atomets fysikk. I perioden fra 1913 til ca. 1935 ble nye teorier for atomenes egenskaper utviklet.

Et av hovedspørsmålene var om elektronet er en partikkel eller en bølge. Det var store problemer med å kartlegge elektronets nøyaktige posisjon. Man kunne beskrive hvordan elektronet oppførte seg i bestemte forsøk, men man klarte ikke å bestemme posisjonen nøyaktig. I klassisk mekanikk kan banen til et legeme beskrives nøyaktig fra Newtons lover. I moderne atomfysikk kan vi bare beregne sannsynligheten for hvor elektronet befinner seg. Elektronet har både bølgeegenskaper og partikkelegenskaper. Denne materiens dobbeltnatur vil bli omtalt flere steder i dette kurset i forbindelse med stråling.

I 1890-årene var det flere fysikere som påpekta at den klassiske fysikken ikke kunne forklare strålingskurvene fra solen og andre legemer. Det var den kjente tyske fysikeren Max Planck (1858–1947) som i år 1900 fant et matematisk uttrykk som beskrev strålingen. Hva fysikken bakom uttrykket var, ble ikke diskutert. Først senere ble det helt klart at Plancks likning og hypoteser førte til et dramatisk brudd med den klassiske fysikken. Konklusjonen var at flere størrelser i fysikken ikke hadde kontinuerlige, sammenhengende verdier. De forandret seg alltid steg- eller sprangvis. Vi fikk et nytt ord i fysikken, et kvant.

Begynnelsen på det vi i dag kaller kvantefysikken er det Max Planck som har æren for.

Det første kvantet som ble innført var et lyskvant. Det var Albert Einstein (1879–1955) – med utgangspunktet i Plancks teori – som sa at den minste enheten en kan dele opp lyset i er et lyskvant. Einstein kalte denne lille partikkelen for et foton.

Etter Bohr kom den franske fysikeren Louis de Broglie (1887–1961). I 1925 la han fram sin teori om at det var elektronets bølgeegenskaper som ga stabile elektronbaner. De Broglies teori om materiens bølgenatur har hatt stor betydning for utviklingen av den moderne kvantefysikk. Den nye teorien for fysikken til atomene ble kalt kvantemekanikken. Hovedbidragene til denne nye teorien kommer fra tyskeren Werner Heisenberg (1901–1976), østerrikeren Erwin Schrödinger (1887–1961) og briten Paul Dirac (1902–1984). Teorien er bygd på antakelser om at mange egenskaper ved atomet er kvantisert – dvs. de kan bare ha bestemte verdier eller visse egenskaper. Disse verdiene blir gitt ved kvantetall. Dette betyr igjen at atomene bare kan være i bestemte kvantetilstander. Fra kvantemekanikken kan vi bare regne ut sannsynligheten for at elektronet er på et bestemt sted på et gitt tidspunkt. Dessverre er konsekvensen av kvantemekanikken – som bygger på kompliserte matematiske formler at Bohrs enkle atommodell er mangelfullt. Elektronene er ikke små partikler som sirkler rundt kjernen i helt bestemte baner. Vi bruker likevel i dette kurset Bohrs modell med faste elektronbaner fordi denne modellen er oversiktlig og bygger på erfaringer, som vi lett kan forestille oss i den verden vi lever i.

## Fotoelektrisk effekt

I 1887 observerte Heinrich Hertz (1857 – 1894) at lys som treffer et metall kan slå løs elektroner. Dette fenomenet kalles fotoelektrisk effekt. Om vi sender grønt lys mot en sinkplate, skjer det ingenting. Uansett hvor mye vi øker intensiteten på lysstyrken så blir ingen elektroner løsrevet. Om vi bytter lyskilden til UV-stråling, observerer vi den fotoelektriske effekten. Elektroner fjernes fra metalloverflaten. Dette skjer selv ved lav strålingsintensitet.

Konklusjon: Den fotoelektriske effekten er avhengig av lysets frekvens/energi. Når frekvensen/energien til strålingen er lavere enn en viss grensefrekvens – som varierer fra metall til metall, vil det ikke skje noe, selv om vi øker intensitet kraftig. Er lysets frekvens/energi større enn grenseverdien, vil selv et svakt lys løsrive elektroner. (se figuren under)

Dette fenomenet kan ikke forklares med klassisk fysikk. Den fotoelektriske effekten støtter Einsteins konsept om at lys er kvantisert. Etter denne modellen kan fotoner slå løs elektroner. I støtet avgir fotonet hele sin energi.

Fotonet må utføre et arbeid for å løsrive et elektron fra atomet/molekylet. Har fotonet ikke tilstrekkelig energi, dvs. høy nok frekvens eller kort nok bølgelengde, vil det ikke skje noe. Har fotonet mer energi enn løsrivningsarbeidet som kreves, får vi et fritt elektron. Energien som overstiger løsrivningsarbeidet gir elektronet kinetisk energi. For de fleste metaller ligger grensebølgelengden i UV-området, dvs at  $\lambda < 400$  nm.



#### Fotoelektrisk effekt / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/58689>

Fotoner av kortbølget lys har nok energi til å slå løs elektroner og metallplaten får positiv ladning.

Vanligvis snakker man bare om den fotoelektriske effekten kun i forbindelse med metaller. Men et liknende fenomen opplever man også i romfysikken. I den øvre atmosfære kan f.eks. stråling fra sola slå løs elektroner i atmosfæregassene. Luften blir ionisert. For at det skal skje må strålingen ha en minimumsenergi som er større enn ionisasjonsenergien til gassen. Det er også andre prosesser som kan skje med et atom eller molekyl som treffes av elektromagnetisk stråling. Som vi har sett tidligere kan atomer og molekyler eksiteres, når de blir truffet av UV-lys. Er energien i den elektromagnetiske strålingen høy nok kan molekyler spaltes (dissosieres) til atomer.

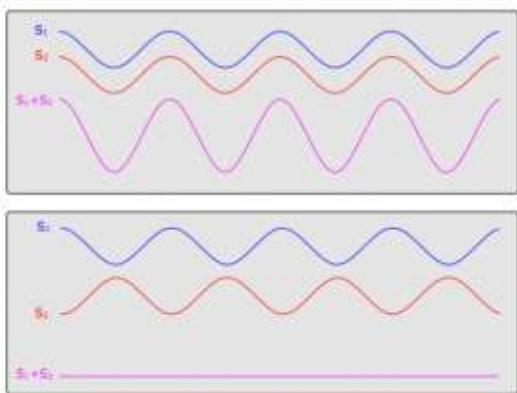
Prosesser som skjer med atomer eller molekyler i atmosfæren blir truffet av elektromagnetisk stråling fra sola kan skjematiseres på følgende måte: (X = et atom eller molekyl, et eksitert atom eller molekyl, h · f = fotonenergien som bestemmes av frekvensen f, og e<sup>-</sup> = et elektron.)

1. Ionisering:  
$$X + h \cdot f \rightarrow X^+ + e^-$$
2. Eksitasjon:  
$$X + h \cdot f \rightarrow X^*$$
3. Spalting:  
$$X_2 + h \cdot f \rightarrow X + X$$
4. Økning i bevegelsesenergi → oppvarming.

## Elektromagnetisk stråling: bølger eller partikler?

Svaret er: Begge deler. I noen sammenhenger oppfører elektromagnetisk stråling seg som partikler. Den fotoelektriske effekten er et eksempel på det. Strålingen betraktes da som små energipakker som vi kaller fotoner eller lyskværter.

Interferens er et eksempel på at elektromagnetisk stråling oppfører seg som bølger. Med interferens menes overlagring av koherente bølger. Resultant bølgen er summen av bølgene. Treffer bølgetoppene fra to bølger sammen får vi maksimal forsterkning, noe som for lys betyr økt lysstyrke. Møtes bølgetopp på bølgebunn får vi utslokning, dvs. det blir mørkt. Dette fenomenet kan bare forklares med lyset som bølger; se figuren under.



Interferens. S1 og S2 er to koherente bølgekilder. Bølgene fra de to kildene overlagres. De røde og blå linjene viser bølgene helt uten overlagring, fiolett linje viser overlagret bølge. a)

Faseforskjellen mellom de to bølgene er et helt antall bølgelengder. Dette gir maksimal forsterkning. b) Overlagring av bølger med en faseforskjell på  $\frac{1}{2}$  bølgelengde (eller  $1\frac{1}{2}$ ,  $2\frac{1}{2}$  osv. bølgelengder) gir utslokning.

Ophavsmann: [Narom](#)

Også ved lysspredning, må vi bruke bølgemodellen. Mye av det innfallende sollyset blir spredt i atmosfæren og sendt ut i alle retninger. Om luften er tørr (dvs. lite vanndamp) og ren (dvs. lite forurensing), vil intensiteten av det spredte lyset være omvendt proporsjonal til lysets bølgelengde ( $\lambda$ ) i fjerde potens, dvs.  $\lambda^4$ . Denne loven kalles Rayleighs spredningslov. Som kjent består sollyset av en rekke forskjellige farger fra fiolett ( $\lambda=400$  nm) til mørkt rødt ( $\lambda=700$  nm). Spredningen vil derfor variere som  $(1/400^4)$  til  $(1/700^4)$ . Av dette fremgår det at det blå lyset, pga. den korte bølgelengden, spredes mye mer effektivt enn det røde, - ja enn alle andre farger. Det er derfor himmelen, sett fra bakken, er blå, selv om selve himmelrommet er helt svart (bortsett fra de lysende objektene).

Om det er mye vanndamp og forurensninger (ofte kalt aerosoler eller støv) i luften, dvs. partikler med mye større dimensjoner enn molekyler, vil spredningen av lyset være proporsjonalt med  $1/\lambda$ . Dette betyr at spredningen varierer relativt lite fra blått til rødt, mindre enn en faktor to. Derfor vil himmelen se grå ut. Alle lysets farger bidrar til en grå himmel. Spredning av lys i atmosfæren vil bli mer detaljert diskutert senere.

Refleksjon og lysbrytning kan man forklare med både partikkell- og bølgemodellen.

# Ioniserende stråling

Forfatter: Narom

[Ioniserende stråling \(58705\)](#)

Ioniserende stråling er energirik stråling som slår løs elektroner i atomer eller molekyler strålingen treffer på. Hvis slik stråling treffer levende celler kan disse skades eller ødelegges. Som en senvirkning, kan kreft utvikles og i neste generasjon kan mutasjoner komme fram. Ioniserende stråling påvirker også atmosfæren. Den blir ionisert og/eller molekylene spaltes til atomer, når de blir truffet av energirike stråling fra sola. Ioniserende stråling kan også forårsake skade på elektronisk utstyr i satellitter. Det finnes også nyttige anvendelser til ioniserende stråling, som f.eks. til kreftbehandling.

## Ulike typer ioniserende stråling

Vi skal omtale følgende typer av ioniserende stråling:

- Radioaktiv stråling
- Røntgenstråling
- Energirik UV-stråling

I fysikken er det vanlig å definere elektromagnetisk stråling med energi > 10 eV, dvs bølgelengde < 124 nm, som ioniserende. Det betyr at den mest energirike UV-strålingen regnes som ioniserende. Den ioniserer f.eks atomer og molekyler i atmosfæren. Men fordi denne strålingen i liten grad har ioniserende virkning på celler i kroppen, betegnes ofte UV-stråling som ikke-ioniserende i forbindelse med strålevern (f.eks i arbeidsmiljøet).

## Radioaktiv stråling

Den franske fysikeren Henri Becquerel (1852–1908) oppdaget våren 1896 den radioaktive strålingen. Historien er følgende: Becquerel hadde fotografiske plater og uransalter liggende i samme skuff. Han ante ikke at uranet sendte ut stråling. Til sin store forbauselse fant han at de fotografiske platene var blitt eksponert – som om de var utsatt for lys, selv om de lå godt innpakket i svart papir. Becquerel forstod da at uranet hadde sendt ut intens stråling, som gikk gjennom tykt papir. Den naturlige radioaktive strålingen var oppdaget. Marie Curie (1867–1934) og hennes mann Pierre Curie (1859–1906) gjorde pionerarbeid knyttet til radioaktiviteten.



Fysikeren Rutherford viste omkring 1900 at det fantes tre hovedtyper av radioaktiv stråling, nemlig alfa-, beta- og gammastråling. Strålingstypene kan skilles i elektriske og magnetiske felt. De elektrisk ladde partiklene – dvs. alfa- og betastråling, bøyes av i hver sin retning, mens gammastråling ikke blir påvirket. Figuren over viser hvordan alfa-, beta- og gammastråling fra et radiumpreparat beveger seg i et magnetfelt som står vinkelrett på bevegelsesretningen. De positivt alfafartiklene avbøyes svakt i den ene retningen, mens de lette negativt ladde betapartiklene avbøyes kraftig i motsatt retning. Størrelsen på avbøyningen er også avhengig av farten. Kreftene på ladde partikler i elektriske og magnetiske felt blir omtalt senere.

Den radioactive strålingen kommer fra ustabile atomkjerner. Når de sender ut alfa- eller betastråling blir en kjerne av et annet grunnstoff dannet. Denne kjernen kan også være radioaktiv. Slik oppstår såkalte radioactive serier. De fleste radioactive nuklimer med atomnummer større enn 82 vil i slutten av serien danne stabilt bly, som illustrert i figuren under.

## Alfastråling

Alfastråling ( $\alpha$ -stråling) består av heliumkjerner,  ${}_{2}^{4}\text{He}^{2+} = {}_{2}^{4}\alpha$ . En atomkjerne som sender ut  $\alpha$ -stråling

mister 2 protoner og 4 nøytroner. Det nye grunnstoffet som dannes har et atomnummer som er 2 lavere enn "startnummeret". Nukleontallet minker med 4. I alle kjernreaksjoner blir nukleontallet og ladningstallet bevart.

$$\text{---}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y$$

### Eksempel: Alfastråling

Hvilken nuklide dannes når  ${}_{84}^{218}\text{Po}$  (polonium) sender ut  $\alpha$ -stråling?

Svar:

$$\text{---}_{84}^{218}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{214}\alpha + {}_{82}^{214}\text{Pb}$$

### Betastråling

Betastråling ( $\beta$ -stråling) består av energirike elektroner (kalles da  $\beta^-$ ) eller positroner ( $\beta^+$ ) som sendes ut fra ustabile atomkjerner. Elektroner finnes i ulike baner rundt atomkjernen, men ikke i selve kjernen. At noen kjerner sender ut elektroner må bety at disse dannes, når kjernen desintegrerer, dvs. nedbrytes. Man observerer at den nye nukliden har det samme nukleontallet som den ustabile nukliden, men at atomnummeret stiger med 1. Vi forklarer dette ved at et nøytron går over til et proton og et elektron ( $\beta$ -partikkel) sendes ut. Det dannes samtidig et antinøytrino,  $\bar{\nu}$ .  ${}_0^1n \rightarrow {}_{-1}^0\beta^- + {}_1^1p + \bar{\nu}$

Atomnummeret avtar med 1 når en nuklide sender ut et positron. Dette kan man forklare ved at et proton går over til et nøyton, og et positron frigjøres.

$${}_1^1p \rightarrow {}_{-1}^0\beta^- + {}_0^1n$$

Vi ser at i begge tilfellene er nukleontallet og ladningstallet er bevart.

Energien i alfapartikklene er karakteristisk for nukliden som sender den ut. Det samme gjelder ikke for betapartikler. Energiene for  $\beta$ -partikklene varierte fra null til en maksimumsverdi. Det var denne maksimumsverdien man hadde regnet med alle betapartikler ville ha. Den sveitsiske fysikeren Wolfgang Pauli forklarte i 1930 den manglende energien med at det ble dannet en partikkel til – som han kalte nøytrino ( $\nu$ ), som "stjal" energien fra betapartikkelen. Først 26 år senere klarte man å påvise denne partikkelen. Nøytrinoer er meget vanskelig å påvise fordi de vekselvirker så lite med sine omgivelser. Fremdeles er det ingen enighet om at nøytrinoet har masse. Reaksjonslikningen for en nuklide X som sender ut en betapartikkel og et nøytrino blir da:

$$\text{---}_Z^A X \rightarrow {}_{-1}^0\beta^- + {}_{Z+1}^A Y + \nu$$

Energien i betapartikler er betydelig lavere enn for alfapartikler. En betapartikkel med 1 MeV har ca. 5 mm rekkevidde i vev. Den stoppes selv av tynne klesplagg.

### Eksempel: Betastråling

Hvilken nuklide dannes når  ${}_{82}^{214}\text{Pb}$  sender ut  $\beta$ -stråling? Svar:  ${}_{82}^{214}\text{Pb} \rightarrow {}_{-1}^0\beta^- + {}_{83}^{214}\text{Bi}$  Det dannes  ${}_{83}^{214}\text{Bi}$  (vismut).

Også denne nukliden er en  $\beta$ -stråler, slik at nedbrytingen fortsetter.

### Gammastråling

I motsetning til alfa- og betastråling er gammastråling ( $\gamma$ -stråling) ikke partikkelstråling, men elektromagnetisk stråling.  $\gamma$ -fotonene har større energi, men kortere bølgelengde enn fotonene i røntgen- og UV stråling. Etter at en nuklide har sendt ut  $\alpha$ - eller  $\beta$ -stråling går kjernen tilbake til lavere energitilstander, mot grunntilstanden, ved å sende ut energirike  $\gamma$ -fotoner. Energien til disse fotonene er karakteristisk for den radioaktive nuklidene som sender dem ut. Dette tilsvarer energiutsendelsen i et eksitert atom. Energiforskjellen sendes ut som fotoner som gir et karakteristisk spektrum for stoffet. Gammastrålingsspekteret er karakteristisk for radionukliden og brukes til å identifisere nukliden som sender ut strålingen. For Cs f.eks. er  $\gamma$ -fotoner med 662 keV karakteristiske.

### Eksempel: Bølgelengden til gammastråling

Den radioaktive nukliden  $\text{Cs}^{137}$  sender ut  $\gamma$ -fotoner med 662 keV.

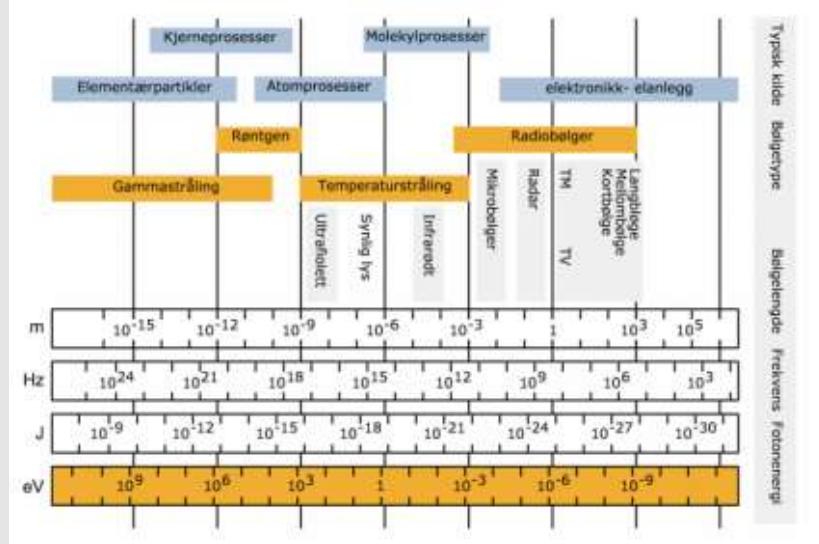
Hvilken bølgelengde har strålingen?

Svar: Vi bruker likningen  $E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$  og må regne om energien fra elektronvolt til joule.  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,62 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1,88 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Denne gammastrålingen har en bølgelengde på  $1,88 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ .

Gammastråling har stor gjennomtrengningsevne. Gammastråling på 1 MeV går lett gjennom et menneske, mens et 1 cm tykt kobberlag stopper omtrent halvparten av strålingen. Ofte brukes lag av bly eller tykke vegger av betong for beskyttelse mot strålingen. Gammastrålingen er den farligste radioaktive strålingen. Det meste av alfa- og betastrålingen stoppes av luft og klær, mens gammastrålingen trenger inn i kroppen.



Det elektromagnetiske spekteret  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Måleenheter for radioaktiv stråling

Forfatter: Narom

[Måleenheter for radioaktiv stråling \(59604\)](#)

Forskjellige måleenheter blir brukt for stråling fra radioaktive stoffer. De gir uttrykk for forskjellige egenskaper ved strålingen. Når et stoff sender ut en alfabartikkelen, en betapartikkelen eller ett gammafoton per sekund er strålingen 1 becquerel (Bq).

$$1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ utsendelse av ioniserende stråling} (\alpha, \beta, \gamma)}{\text{sekund}}$$

En tidligere måleenhet for aktivitet er curie (Ci) der  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ . Når vi kun kjenner til radioaktiviteten i becquerel vet vi ikke hvilken strålingsstype det dreier seg om og heller ikke energien i strålingen. Vi kan ikke avgjøre hvilken radioaktiv nuklide som forårsaker strålingen. For å kunne gjøre oss et bilde om langsigte farer ved strålingen burde vi også kjenne til halveringstida til kilden.

Når stråling går gjennom materie avgir den energi. Mengden av absorbert energi per masseenhett kalles stråledose, som måles i Gray (Gy). Når vi mäter 1 Gy betyr det at 1 kg av det bestrålte stoffet har absorbert 1 J stråleenergi.

## Fordypning: Doseekvivalent

De ulike strålingstypene gjør ulik skade når de treffer levende vev. Man tar hensyn til dette ved å bruke doseekvivalent med måleenheten sievert (Sv). Utgangspunktet er den absorberete strålingen målt i gray, men med en vektfaktor. For beta- og gammastråling gjelder at  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$ . Alfastråling ansees som 20 ganger farligere. Den virker sterkt ødeleggende på celler langs den korte strekningen som trenges for å stoppe den. Man setter  $1 \text{ Gy} = 20 \text{ Sv}$  for alfastråling. For nøytronstråling bruker man ofte  $1 \text{ Gy} = 10 \text{ Sv}$ . Det betyr at man vurderer nøytroner som 10 ganger farligere enn beta- og gammastråling. Risiko for skader er ulik for ulike organer. Man velger en vektfaktor som tar hensyn til dette. Den naturlige bakgrunnsstrålingen har en middelverdi på 4,25 mSv, se tabell under.

Effektiv dose	Situasjon / eksempel
1 mikrosievert ( $\mu\text{Sv}$ )	<ul style="list-style-type: none"><li>10 timer opphold utenpå</li><li>1 døgn normal stråling fra egen kropp</li></ul>
$10 \mu\text{Sv}$	<ul style="list-style-type: none"><li>alldagdose ved 8 timers flytur</li><li>årlig dose fra naturlig C-14 i egen kropp</li></ul>
$100 \mu\text{Sv}$	<ul style="list-style-type: none"><li>2–3 rentgenbilder hønsumleggen</li><li>rentgenbild av lungene</li><li>10 timers reise i supersonic fly</li></ul>
$1000 \mu\text{Sv}$ = 1 millisievert (mSv)	<ul style="list-style-type: none"><li>årlig dose fra naturlige strålkilder (radon ikke inkludert)</li><li>en nattgåttedose av rygg, bekken eller sylinder</li></ul>
$5 \text{ mSv}$	<ul style="list-style-type: none"><li>årlig dose for en gjennomsnittsperson i Norge</li></ul>
$10 \text{ mSv}$	<ul style="list-style-type: none"><li>romferd som varer 1 måned</li></ul>
$50 \text{ mSv}$	<ul style="list-style-type: none"><li>årlig dosegrense for strålingsarbeidere</li></ul>

Eksempler på doseekvivalenter vi utsettes for i ulike situasjoner

Opphavsmann: [Narom](#)

# Måling av radioaktiv stråling

Forfatter: Narom

[Måling av radioaktiv stråling \(59607\)](#)

Den radioaktive strålingen er usynlig, på samme måte som radiobølger. For målinger utnytter man strålingens evne til å vekselvirke med stoff den treffer på.

## Geiger-Müller teller

Med en Geiger-Müller (G-M) teller bestemmes aktiviteten til en radioaktiv kilde. Den skiller ikke mellom stråletyper og stråleenergier.



Geiger-Müller teller / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/58726>

Prinsipp for en Geiger-Müller teller. Den radioaktive gassen ioniserer tellegassen. Elektronene og ionene vandrer til elektrodene med motsatt ladning og utløser en strømpuls.

En G-M teller er vist skjematisk i figuren over. Den består av en sylinder som fungerer som katode (negativ elektrode). Fra den ene siden rager en anodetråd (positiv elektrode) inn i sylinderen. Den andre siden – hvor strålingen faller inn, er dekket av et tynt vindu. Sylinderen er fylt med en gassblanding ved lavt trykk. Mellom elektrodene er det høyspenning. Den innfallende radioaktive strålingen ioniserer gassatomene. Fri elektroner blir dannet. De akselereres så kraftig at de ioniserer flere gassatomer. Ionene og elektronene vandrer til hver sin elektrode. Dette gir en strømpuls. Pulsenes telles eller sendes til en høyttaler. Gammastråling trenger også gjennom veggen til G-M telleren og ioniserer gassen.

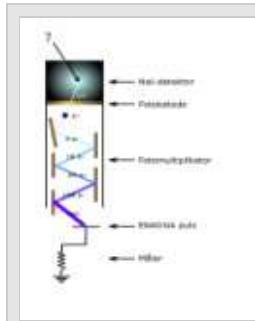
## Scintillasjonsteller

Det er viktig å vite hvilke radioaktive nukliser som er tilstede og mengde av disse. Til dette kan vi ikke bruke G-M telleren. Når en ustabil atomkjerne har sendt ut  $\alpha$ - eller  $\beta$ -stråling er kjernen ofte i en eksitert tilstand. Den går tilbake til grunntilstanden ved å sende ut  $\gamma$ -stråling. Energinivåene til de eksiterte tilstandene er spesifikk for hver enkel nuklid. Derfor er energien til den utsendte  $\gamma$ -stråling som et fingeravtrykk for nukliden. Strålingsintensiteten fra de ulike energinivåene er forskjellig, men forholdet mellom intensitetene er konstant.

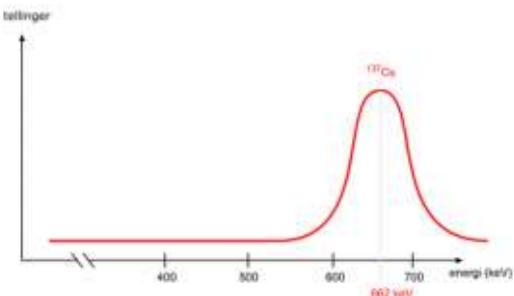
En scintillasjonsteller mäter både energien og intensiteten i  $\gamma$ -strålingen. På denne måten kan radionukliser identifiseres og deres mengde bestemmes.

Enkelte stoffer lyser opp, når de absorberer ioniserende stråling. Lysglimtets styrke er proporsjonal med energien til det absorberte  $\gamma$ -fotonet. Dette utnyttes i en scintillasjonsteller som ofte bruker en natriumjodid-krystall som detektor.

En fotomultiplikator registrerer lysglimtene i krystallen og forsterker dem med en faktor på ca.  $10^6$ . Pulshøyden er proporsjonal med  $\gamma$ -energien. I en flerkanalanalysator sorteres pulsene etter energinivå. Det telles hvor mange pulser som er registrert for de enkelte energinivåer. Ved å sammenlikne data fra prøven med kalibreringsdata kan strålingskilden i prøven både kvalitativt og kvantitativt bestemmes.



Scintillasjonsteller  
Opphavsmann: [Narom](#)



Resultat fra måling med en scintillasjonsteller. Den viser antall tellinger av lysglimt bestemt av strålingens energi. Vi ser her en topp på 662 keV som er typisk for Cs. Høyden på toppen er avhengig av mengden Cs. For å kunne angi mengden sammenligner man med en standard med kjent aktivitet.

Opphavsmann: [Narom](#)

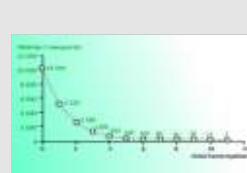
Prinsippet for en scintillasjonsteller med fotomultiplikator.  
Gammafotoner utløser lysglimt i en NaI-detektor. Lyset slår løs et elektron i en fotokatode. Elektronet treffer på en såkalt dynode i fotomultiplikatoren hvor det kan slå løs maksimalt 4 nye elektroner. En serie med dynoder sørger for stor forsterkning. Pulshøyden er proporsjonal til energien i gammafotonet.

# Halveringstid

Forfatter: Narom

[Halveringstid \(58742\)](#)

Radioaktive atomkjerner er ustabile. Etter å ha sendt ut stråling omdannes de til en kjerne av et annet grunnstoff. Tiden det tar før halvparten av det radioaktive stoffet omdannes, betegnes som halveringstid,  $T_{1/2}$ . Halveringstiden er brøkdel av sekunder for noen nuklider, mens det kan være milliarder år for andre.



Radioaktiviteten halveres for hver halveringstid.

Opphavsmann: [Narom](#)

## Eksempel: Utledning av formel for halveringstiden

Finn sammenhengen mellom antall halveringstider  $n$  og antall radioaktive kjerner som finnes.

Svar:  $N_0$  er antall kjerner ved tiden 0. For hver halveringstid halveres antallet radioaktive kjerner:

Antall halveringstider	Antall radioaktive kjerner
0	$N_0 = N_0$
1	$N_0 \cdot \frac{1}{2} = N_0 \cdot \frac{1}{2}$
2	$N_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2$
3	$N_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3$
4	$N_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^4$
$\dots$	$\dots = \dots$
$n$	$= N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$

Halveringstid

Opphavsmann: [Narom](#)

## Fordypning: Halveringstid

Vi kan uttrykke tiden ( $t$ ) som antall ( $n$ ) halveringstider, dvs.  $t = n \cdot T_{1/2} \rightarrow n = t / T_{1/2}$ . Når vi setter dette inn i formelen for halveringstid, finner vi

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$
 eller  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$

der  $N(t)$  = antall radioaktive kjerner som funksjon av tiden  $t$ ,  $N_0$  = antall radioaktive kjerner ved start,  $T_{1/2}$  = halveringstid.

Antall radioaktive atomkjerner er proporsjonal med aktiviteten  $A$ . Derfor gjelder også

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \text{ eller } A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$
 der  $A(t)$  = radioaktiviteten som funksjon av tiden  $t$  og  $A_0$  = aktiviteten ved start.

## Eksempel: Radioaktivt cesium

$^{137}\text{Cs}$  er en radioaktiv nuklide med halveringstid på 30,0 år. Den ble spredt til bl.a. Norge etter kjernereaktorulykken i Tsjernobyl i 1986, men også ved tidligere kjernefysiske prøvesprengninger. Man regner med at nedfallet etter Tsjernobylulykken har bidratt med en aktivitet på 7000 Bq/m<sup>2</sup> i Norge.

- a) Hvor mye radioaktivitet var det igjen etter 10 år?  
 b) Hvor lang tid tar det før aktiviteten har sunket til 600 Bq/m<sup>2</sup>?

Svar:

a)

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = 7000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10}{30}} = 5556 \text{ Bq}$$

Etter 10 år har  $^{137}\text{Cs}$  fra Tsjernobylulykken fortsatt bidratt med gjennomsnittlig 5560 Bq/m<sup>2</sup>.

b)

Avanserte lommekalkulatorer har en funksjon hvor hele likningen skrives inn med tall og x for den ukjente. Kalkulatoren kommer direkte med løsningen.

Man kan også løse oppgaven grafisk, som illustrert i figuren øverst på denne siden.

Ellers må man kunne regne med logaritmer for å løse oppgaven:

$$\begin{aligned} A(t) &= A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \\ \ln \left(\frac{A(t)}{A_0}\right) &= \ln \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \\ t &= T_{1/2} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A(t)}\right) \\ t &= 30 \cdot \ln \left(\frac{7000}{600}\right) = 106 \text{ år} \end{aligned}$$

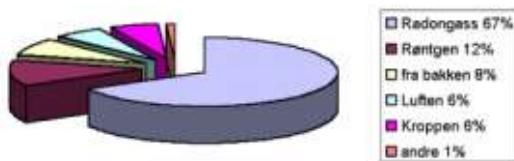
Etter ca. 106 år er aktiviteten redusert til 600 Bq/m<sup>2</sup>.

## Kilder til radioaktiv/ioniserende stråling

Naturlig forekommende, ioniserende stråling kalles bakgrunnsstråling. Omkring 75% av all stråling en gjennomsnittsnormann utsettes for, skyldes naturlige radioaktive stoffer. Radongass i huskjellere er hovedkilden til strålingen. Konsentrasjon av uran og thorium varierer sterkt mellom ulike bergarter. Derfor er også radonbelastningen i stor grad avhengig av hvor man bor. Tabellen viser både gjennomsnittsverdier for strålingsdoser og doseområder (klikk for større versjon). Tette vegger og gulv kan hindre radon i å trenge inn i husene. Man kan redusere strålingsbelastningen ved å lufte godt og ved ikke å oppholde seg lenge i utsatte rom. Stråling som skyldes kjernefysiske prøvesprengninger og reaktorulykken i Tsjernobyl i 1986 gir fremdeles et tillegg til den naturlige strålingsbelastningen. Men denne belastningen er atskillig mindre enn den vi utsettes for ved medisinske undersøkelser - jamfør figuren under. Mange og lange flyreiser i høyder hvor atmosfæren beskytter mindre enn på bakken, resulterer i en økt strålingsbelastning.

Mildestedsstråling	Normalstråling	Prøvesprengning
Ukjent aktivitet	10-20 mR/a	2-3 mR/a
Normalradon	10-20 mR/a	2-3 mR/a
Normalradioaktivitetsnivå	10-20 mR/a	2-3 mR/a
Gammabakgrunn	10-20 mR/a	1-10 mR/a
Radon i bolig og fra bakken	10-20 mR/a	1-10 mR/a
Til sammen mildestedsstråling	20-40 mR/a	2-10 mR/a
Normalradioaktivitetsnivå	10-20 mR/a	2-3 mR/a
Total mildestedsstråling	30-60 mR/a	2-10 mR/a
Total stråling fra bolig	40-80 mR/a	10-20 mR/a

Gjennomsnittlige stråledoser per individ per år i Norge. Kilde: Institutt for energiteknikk  
 Opphavsmann: [Narom](#)



Naturlig bakgrunnsstråling og normal tilleggsstråling.  
 Bakgrunnsstrålingen kan variere med en faktor 10 pga. store

## UV-stråling, røntgenstråling og nøytronstråling

For de fleste atomer og molekyler vil kun den energirike UV-strålingen slå løs elektroner. Elektromagnetisk stråling med  $\lambda < 124$  nm, som tilsvarer 10 eV, er ioniserende. Slik stråling sender sola ut, men den når ikke ned til jordoverflaten. Sola sender også ut energirik røntgenstråling. Også denne strålingen absorberes fullstendig i atmosfæren.

Når man lager røntgenstråling i et laboratorium utnytter man at denne strålingen oppstår, når elektroner med stor fart treffer på et metall. Man bruker et røntgenrør med en katode og en anode. Katoden varmes opp slik at den avgir elektroner. En høy spenning fra flere tusen til flere 100.000 V akselererer elektronene kraftig fra katoden til anoden hvor de kolliderer med stor fart. Her oppstår røntgenstråling på to måter.

- Elektronene mister sin energi, når de treffer anoden. En del av den tapte kinetiske energien blir omdannet til elektromagnetisk stråling i røntgenområdet, såkalt røntgen bremsestråling.
- Elektronene som treffer anoden eksiterer atomer i anodematerialet. Når elektronene hopper tilbake til lavere energinivåer sendes det ut karakteristisk røntgenstråling.

Fra verdensrommet kommer det gammastråling med veldig høy energi. Også denne strålingen blir absorbert, og når ikke ned til jorden. [I oktober 2002 ble satellitten INTEGRAL som studerer denne gammastrålingen skutt opp.](#)

Når atomkjerner spaltes i kjernereaktorer produseres det nøytroner. De forekommer også i den sekundære kosmiske strålingen. De kan også dannes ved kjernreaksjoner når partikler i den kosmiske strålingen kolliderer med f.eks. atomkjerner i romfartøyets byggemateriale, hovedsakelig aluminium.

# Mass-e-energi-kvivalens

Forfatter: Narom

[Mass-e-energi-kvivalens \(58834\)](#)

I klassisk mekanikk er det en forutsetning at massen ikke endrer seg i fysiske prosesser. Når vi varmer opp 1 kg vann i en lukket beholder så forutsetter vi at det er fortsatt 1 kg også ved for eksempel 80° C. Når 12 gram (g) C reagerer med 32 g O<sub>2</sub> regner vi med at det dannes 44 g CO<sub>2</sub>. I hht. Einsteins relativitetsteori er masse egentlig en form for energi.

Sammenhengen mellom masse ( $m$ ) og energi ( $E$ ) er gitt ved Einsteins berømte formel

$$E = mc^2$$

Ifølge den klassiske fysikken burde nukleoner ha den samme massen uansett i hvilket grunnstoff de inngår. Men det er ikke tilfelle. Når vi betrakter energiregnskapet i kjernreaksjoner må vi ta hensyn til masseendringer.

## Eksempel: Masseendring i en fysisk prosess

Hvor stor blir endringen i vannets masse, når vi varmer opp 1 kg vann fra 20° til 40° C (293 K til 313 K) ? 1° C = 273 K.

Svar: Vi tilfører energi. Etter Einsteins teori fører dette til en masseøkning. I fysikktabeller finner vi at den spesifikke varmekapasiteten til vann er 4180 J/(kg · K). Det betyr at vi må tilføre 4180 J for å øke temperaturen i 1 kg vann med 1 K. Når vi øker temperaturen med 20 K blir energiøkningen

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$
$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{8,36 \cdot 10^4 \text{ J}}{(3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} = 9,3 \cdot 10^{-13} \text{ kg}$$

Massøkningen er på  $9,3 \cdot 10^{-13}$  kg og dermed så liten i forhold til den opprinnelige massen at den er uten praktisk betydning. I et slikt tilfell kan vi også i framtiden bruke den klassiske mekanikkens lov om bevaring av masse ved fysiske prosesser.

## Eksempel: Masseendring i en kjemisk reaksjon

Hvor stor blir masseendringen, når 12 g C reagerer med 32 g O<sub>2</sub> til CO<sub>2</sub>? Reaksjonen er eksoterm og frigir 393 kJ.

Svar: Når energien avgis til omgivelsene innebærer det etter Einsteins teori et massetap.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$
$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{3,93 \cdot 10^5 \text{ J}}{(3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} = 4,4 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$$

Vekttapet er  $4,4 \cdot 10^{-12}$  kg. Dette tilsvarer  $1,0 \cdot 10^{-8}\%$  og dermed uten praktisk betydning.

## Eksempel: Mass-e-energi-regnskap i en kjernreaksjon

<sup>238</sup>U er en radioaktiv nuklide som sender ut α-stråling. Hvor mye energi frigjøres ved hver α-partikkel utsendelse? Gi svaret i joule og elektronvolt.

Svar: Følgende reaksjon finner sted:



I fysikktabeller finner vi nuklidemassene. Vi regner ut masseforskjellen

Massa før utsendelsen	${}_{92}^{238}\text{U}$	238,05079 u	238,05079 u
Massa etter utsendelsen	${}_{90}^{234}\text{Th}$	234,04359 u	-
	${}_{2}^{4}\text{He}$	4,00260 u	-238,04619 u
Massetap	0,00460 u		

Tabell -- Masseforskjell i en kjernereaksjon

Ophavsmann: [Narom](#)

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

$$= 0,00460 \text{ u} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\cdot (3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= 6,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

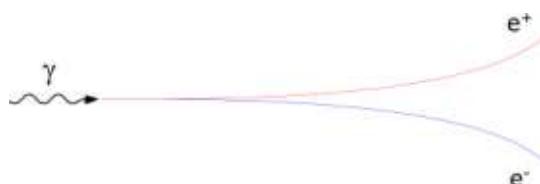
$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Delta E = \frac{6,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 4,3 \cdot 10^6 \text{ eV} = 4,3 \text{ MeV}$$

Det frigis  $6,9 \cdot 10^{-13} \text{ J}$  eller 4,3 MeV. Den desidert største delen av denne energien (4,2 MeV) går til kinetisk energi til  $\alpha$ -partikkelen.

## Pardannelse og annihilering

Et fenomen som kalles pardannelse illustrerer veldig godt ekvivalensen mellom masse og energi. Når et gammafoton passerer i nærheten av en atomkjerne kan fotonet bli til et elektron ( $e^-$ ) og et positron ( $e^+$ ). Den motsatte prosessen til pardannelse er annihilering der et elektron og et positron blir til to gammafotoner.



Pardannelse. Et elektron-positron-par blir dannet av et gammafoton. Et magnetfelt påvirker ikke gammafotonet, men bøyer positivt og negativt ladde partikler i hver sin retning.

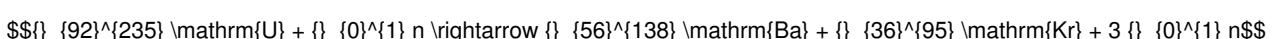
Ophavsmann: [Narom](#)

## Fisjon og fusjon

Fusjon er sammensmelting av to lette atomkjerner til en tyngre atomkjerner. Et eksempel på fusjon er dannelse av heliumkjerner ved sammensmelting av hydrogenkjerner. Denne fusjonsreakjonen er solas energikilde.

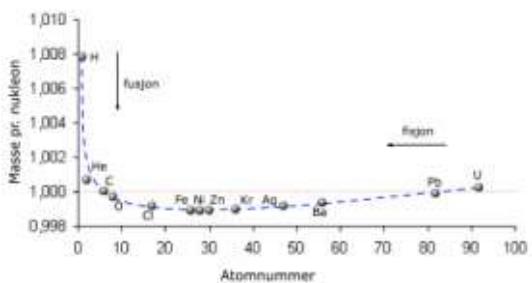
Ved fisjon kløyves en tyngre atomkjerner i to lettere atomkjerner. Denne prosessen skjer i kjernekraftverk hvor en utnytter energien som frigjøres.

Når f.eks.  ${}_{92}^{235}\text{U}$  treffes av langsomme nøytroner spaltes kjernen. Spaltingen kan skje på forskjellige måter, vi velger ut en av dem. Først fanger kjernen til  ${}_{92}^{235}\text{U}$  inn et nøytron og danner  ${}_{92}^{236}\text{U}$ . Denne nye kjernen er ustabil og deler seg i to mindre kjerner samtidig som det sendes ut 3 nøytroner.



Disse nøytronene kan spalte nye urankjerner. I Norge utnyttes mange fossefall til å utvinne energi, men om vi ønsker å pumpe vannet opp igjen må vi også må bruke energi.

Hvordan er det mulig at to motsatte prosesser som fusjon og fisjon kan frigjøre energi? Igjen er det Einsteins erkjennelse om masse-energi-ekvivalens som gir oss svaret. Etter den klassiske mekanikken forventer vi at et proton og et nøytron har den samme massen i alle grunnstoffer. Som vi så i eksemplet, da uran sender ut alfastråling, er det ikke tilfelle. For å kunne sammenlikne ulike grunnstoffer bestemmer man masse per nukleon for de ulike nuklidene. Man bestemmer nuklidemassen og deler med antall nukleoner. Resultatene er vist i figuren under. Når hydrogenatomer danner helium ved fusjon innebærer det et betydelig (7 promille) massetap. Dette massetapet blir til energi. Så lenge reaksjonsproduktene har lavere masse per nukleon enn utgangsstoffene frigir reaksjonen energi. For lette atomkjerner gir fusjon et massetap, mens for tunge atomkjerner innebærer fisjon et massetap. Spaltungsproduktene til uran, barium og krypton, har lavere masse per nukleon enn uran. Dette massetapet blir til energi som utnyttes i kjernekraftverk.



Massa per nukleon som funksjon av atomnummeret. Fusjon av lette atomkjerner og fisjon av tunge kjerner gir et massetap. I begge tilfeller blir masse omgjort til energi. Massen per nukleon er beregnet for den vanligste isotopen for hvert av grunnstoffene.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Jern har den laveste massen per nuklide av alle grunnstoffer og ligger i bunnpunktet på kurven. Ved fusjon i stjerner er jern det tyngste grunnstoffet hvor energi frigjøres ved fusjon. For å danne atomkjerner med høyere masse krever reaksjonen energi. Dette skjer kun i stjerner med veldig stor masse.

Man kunne forvente at fusjonskraftverk, hvor hydrogenkjerner smelter sammen til helium, ville kunne dekke all verdens energibehov. Problemet er at man trenger en høy energi for å få reaksjonen i gang, fordi den sterke frastøtingen mellom protonene må overvinnes. I hydrogenbomber bruker man fisjon som energikilde for å få startet fusjonen.

# Elektromagnetiske felt og stråling

## Innledning

Forfatter: Alv Egeland

[Innledning \(51915\)](#)

Vi skal nå diskutere sammenhengen mellom elektrisitet og magnetisme, samt se på hvordan ladde partikler beveger seg i et elektrisk felt og et magnetfelt. Dette er viktig for å forstå prosesser knyttet til bevegelsen av ladde partikler i romfysikken. Vi skal innføre en del begrep og matematiske sammenhenger som vi trenger for å beskrive elektromagnetisk stråling.

Dette skal gi en bedre forståelse av fysiske prosesser i vårt nære verdensrom. Tabellene under gir deg en oversikt over navn på størrelser, formelsymbol og måleenheter vi kommer til å bruke, samt noen fysiske konstanter som er relevante for dette emnet.

Symbol	Størrelse	Måle-enhet	SI-enhet
$i$	elektrisk strøm	ampere	A
$r$	avstand	meter	m
$l$	lengde	meter	m
$m$	masse	kilogram	kg
$t$	tid	sekund	s
$v$	fart	—	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$a$	akselerasjon	—	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$e, Q$	elektrisk ladning	Coulomb	$\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$
$F$	kraft	newton	$\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$E_p$	elektrisk potensiell energi	joule	J
$f$	frekvens	hertz	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$
$\omega$	irkollifrekvens = gyrofrekvens	hertz	$\text{Hz} = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
$U$	elektrisk spennin	Volt	$\text{V} = \text{J} \cdot \text{C}^{-1}$
$P$	effekt	Watt	$\text{W} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
$E$	elektrisk felt	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	
$H$	magnetisk feltstyrke	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	
$B$	magnetisk fluksintensitet eller magnetisk intensitet	Tesla	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$
$\Phi$	magnetisk fluks	Weber	$\text{Wb} = \text{V} \cdot \text{s}$
$\mu_0$	magnetisk permeabilitet	—	1

Størrelser og måleenheter

Opphavsmann: [Narom](#)

Symbol	Betegnelse	Verdi
$k_e$	Coulombkonstanten	$8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$
$e$	elementærladning	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
$m_e$	elektronmasse	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
$m_\mu$	muonmasse	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
$\mu_0$	magnetisk feltkonstant = magnetisk permeabilitet i vakuums	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} =$ $1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \cdot \text{A}^{-1}$
TeV	Indring i elektronvolt	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Noen fysiske konstanter

Opphavsmann: [Narom](#)

## **Elektrisitet**

Forfatter: Alv Egeland

[Elektrisitet \(51920\)](#)

Et moderne samfunn uten elektrisitet er ikke tenkelig, men elektrisitet er ikke noe som menneskene har oppfunnet.

# Elektrisk strøm, elektriske felt og krefter

Forfatter: Alv Egeland

[Elektrisk strøm, elektriske felt og krefter \(51922\)](#)

Et moderne samfunn uten elektrisitet er ikke tenkelig, men elektrisitet er ikke noe som menneskene har oppfunnet. Det finnes overalt i naturen, men er ofte ikke synlig for oss. Vi kan se lyn, og vi kan kjenne når vi får støt, f.eks. når vi tar på metall etter å ha gått på et syntetisk gulvteppe. Men vi ser ikke at det i alle atomer og molekyler går negative ladninger i bane rundt en positivt ladd kjerne. Vi ser heller ikke at molekyler holdes sammen av elektriske krefter. Også i verdensrommet er elektriske felt og strømmer meget viktige.

Følgende fakta innen elektrisitetslæren er viktige. Elektrisitet er knyttet til elektriske ladninger – i ro eller i bevegelse. I romfysikken skal vi hovedsakelig konsentrere oss om ladninger i bevegelse. Elektroner og/eller ioner i bevegelse genererer en elektrisk strøm. Elektronene er negativ ladet, mens ioner kan være positive eller negative. Elektrisk ladning er alltid knyttet til partikler. For at det skal oppstå en elektrisk strøm, må det finnes lettbevegelig ladning – i metaller er det elektroner. I verdensrommet finnes det store mengder frie elektroner og positive ioner. Hvis elektronene og ionene beveger seg med samme fart og i samme retning, som f.eks. pga vinder i den øvre atmosfære – får vi ingen strøm. Elektrisk strøm ( $I$ ) er ladning ( $q$ ) pr tidsenhet ( $t$ ) som strømmer gjennom et tverrsnitt:  $I=q/t$ . Vi måler strømmen i ampere ( $A$ ), ladningen i coulomb ( $C$ ) og tiden i sekunder ( $s$ ). Av dette følger at  $1 C = 1 A \cdot s$ . Vi bruker  $q$  som symbol for ladning. Et negativt ladningstall setter vi inn den negative verdien for  $q$ .

Den minste ladningen vi kan måle er ladningen til et elektron og et proton. Vi kaller den elementærladningen. Elementærladningen som elektronet har skriver vi  $-e$ , den positive ladningen til protonet  $+e$ . Verdien er lik for begge, nemlig  $1,60 \cdot 10^{-19} C$  (coulomb), men fortegnet er forskjellig. Ladning er alltid et helt antall elementærladninger. Her har vi igjen et eksempel på et naturfenomen som er kvantisert – slik vi har sett det for lys som opptrer som lyskvantede.

## Eksempel: Strøm i en kopplerleder

Strømmen i en kopplerleder er 1 A. Hvor mange elektroner strømmer da gjennom kabelen på 1 sekund?

Svar:  $I \cdot t = C$ ; dvs.  $1A \cdot 1 s = 1C$ . Antall elektroner er  $x$ ; dvs.

$$x = \frac{C}{e} = \frac{1C}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18}$$

NB: Fordi elektronene er negative, har den elektriske strømmen motsatt retning av elektronene.

# Coulombs lov

Forfatter: Narom

[Coulombs lov \(51940\)](#)

Det har lenge vært kjent at like type ladninger frastøter hverandre, mens ladninger av ulik polaritet tiltrekker hverandre, som illustrert i figuren på siden. Først i 1780-årene satte franskmannen Charles Coulomb (1736–1806) denne kunnskapen i system.

Coulomb oppdaget at kraftene mellom to ladninger  $-q$  og  $Q$ , ledet ham til det vi i dag kaller Coulombs lov:

$$F = k_c \frac{Q \cdot q}{r^2}$$

Måleenhetene for elektriske krefter er

$$1 \text{ N} = 1 \text{ C}^2 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1}{\text{m}^2}$$

$F$  er den elektriske kraften mellom to ladningene som har en innbyrdes avstand  $r$ .  $k_c$  er coulombkonstanten som er avhengig av mediet ladningene befinner seg i. I vakuum er verdien til coulombkonstanten  $k_c = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 / \text{C}^2$ .

Coulombs lov er i sin form analog til Newtons gravitasjonslov. Men en viktig forskjell er at kraften mellom ladninger kan være tiltrekkende eller frastøtende, mens gravitasjonskraften alltid er tiltrekkende.

Coulombs lov  
Opphavsmann: [Alv Egeland](#)  
NAROM  
Like ladninger  
frastøter hverandre,  
ulike ladninger  
tiltrekker hverandre. I  
alle tilfeller vil

## Eksempel: Elektrisk kraft og gravitasjonskraft mellom 2 protoner

- Hvor stor er den elektriske kraften mellom to protoner med innbyrdes avstand  $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ?
- Hvor stor er gravitasjonskraften mellom to protoner med innbyrdes avstand  $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ?

Svar:

- Elementærladningen er  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$F = k_c \frac{Q \cdot q}{r^2} = k_c \frac{e \cdot e}{r^2} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19})^2}{(1,0 \cdot 10^{-10})^2} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Den elektriske kraften mellom protonene er  $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$  og virker frastøtende.

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$F = \frac{G \cdot m_p \cdot m_p}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{29} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(1,0 \cdot 10^{-10})^2} = 1,9 \cdot 10^{-44} \text{ N}$$

Gravitasjonskraften mellom protonene er  $1,9 \cdot 10^{-44} \text{ N}$ . Den er ca. 1036 ganger svakere enn den elektriske kraften.

# Elektrisk feltstyrke

Forfatter: Narom

[Elektrisk feltstyrke \(51945\)](#)

Rundt elektriske ladninger har vi alltid elektriske felt. Dette er illustrert i figuren til høyre. Den elektriske feltstyrken  $E$  i et punkt er definert som forholdet mellom kraften  $F$  og ladningen  $q$ .

$$E = \frac{F}{q}$$

Måleenhetene for elektrisk felt er  $1 \text{ N/C} = 1 \text{ N} / (\text{C} \cdot \text{m}) = 1 \text{ V/m}$

Retningen på kraften avhenger av om  $q$  er positiv eller negativ. Hvis vi bruker Coulombs lov for kraften ser vi at det elektriskefeltet er gitt som

$$E = k_c \cdot \frac{Q}{r^2}$$

## Eksempel: Elektrisk feltstyrke

Et elektron i et elektrisk felt blir påvirket av en elektrisk kraft på  $1,0 \cdot 10^{-15} \text{ N}$ . Bestem størrelse og retning til den elektriske feltstyrken.

Svar: Vi bruker likningen  $E = F/q$ . Ladningen til et elektron er  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1,0 \cdot 10^{-15} \text{ N}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6,2 \cdot 10^3 \text{ V/m}$$

Den elektriske feltstyrken er på  $6,2 \text{ kV/m}$ . Fordi elektronet er negativt ladd vil den elektriske kraften og den elektriske feltstyrken ha motsatt retning.

I et elektrisk felt har ethvert punkt et bestemt elektrisk potensial – ofte bare kalt potensialet. Forbinde vi punktene med samme potensial får vi ekvipotensialflater. Potensialet i et punkt er lik spenningen mellom punktet og et valgt nullnivå – dvs. vanligvis jord. Den potensielle elektriske energi er per definisjon

$$E_p = q \cdot U$$

## Eksempel: Metallkule med ladning

En metallkule har ladning  $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ . Finn det elektriske feltet 7 cm fra sentrum av kula.

Fra kombinasjonen av feltstyrke og Coulombs lov over får vi:

$$E = k_c \cdot \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{5,6 \cdot 10^{-8} \text{ C}}{(0,07 \text{ m})^2} = 1 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

## Bevegelse av elektroner og ioner i et elektrisk felt

Forfatter: Narom

[Bevegelse av elektroner og ioner i et elektrisk felt \(52529\)](#)

En viktig oppgave i romfysikken er å forklare bevegelsen av elektroner og ioner i det nære verdensrom hvor det er elektriske felt av varierende intensitet. Krefter er vektorer, de har retning. Retningen til elektriske krefter avhenger av sammensetningen av ladningene. Fra likningen for elektriske felt får vi at

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Dette uttrykket er analogt til Newtons 2. lov  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ .  $\vec{E}$  og  $\vec{F}$  er alltid parallelle. Om  $q$  er positiv ser vi at  $\vec{E}$  og  $\vec{F}$  har samme retning. Er  $q$  negativ har  $\vec{E}$  og  $\vec{F}$  motsatt retning. En elektrisk ladd partikkel i et  $E$ -felt er alltid utsatt for en elektrisk kraft enten partikkelen ligger i ro eller beveger seg.

Den elektriske kraften  $F$  akselererer den ladde partikkelen, slik at

$$m \cdot \vec{a} = q \cdot \vec{E} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}$$

Elektroner og ioner beveger seg i rette linjer parallelt med det elektriske feltet. Dette kan sammenlignes med å kaste en ball vertikalt i tyngdefeltet. Tyngdefeltet akselererer ballen, når aksele-rasjonen og bevegelsen har samme retning, dvs. på vei ned. Ballen bremses når bevegelse og akselerasjon har motsatt retning, dvs. på vei opp. Et elektrisk felt akselererer en positiv ladning, når bevegelsesretningen og det elektriske feltet har samme retning. Et bevegelse og det elektriske felt motsatt rettet bremses ladningen. For en negativ ladning vil forholdene være motsatt. Slik aksele-rasjon og nedbremsing av ladde partikler i elektriske felt er viktig i forbindelse med f.eks. nordlyspartikler, som er hovedsakelig protoner og elektroner fra sola. Elektriske felt er derfor en viktig parameter i forbindelse med nordlys.

Om bevegelsen av en ladd partikkel er på tvers av  $E$ -feltet får vi en krum bane, fordi aksele-rasjonen alltid skjer langs feltet. Om feltet er normal på bevegelses-retningen får vi en bane som ligner på et horisontalt kast i tyngde-feltet. Partikkelen beholder sin farts-komponent i den opprinnelige bevegelsesretningen, jf. Newtons 1. lov. Men samtidig akselereres den i retningen til det elektriske felt. Dette er illustrert i animasjonen ved siden av. Konklusjonen er at vi kan styre elektriske partikler med et  $E$ -felt. Avbøyningen er direkte proporsjonal med styrken på feltet. Elektroner og positive ioner vil avbøyes i motsatt retning.



Partikkelbevegelse i elektrisk felt / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/52531>

**Eksempel: Elektronfart**

En "elektronkanon" på 4000 V ble sendt opp i en rakett fra Oksebåsen i 1985 for å generere nordlys. Et meget svakt nordlys – langt under øyets terskelverdi – ble observert. Hvor stor fart hadde elektronene ut fra raketten?

Svar: Den potensielle elektriske energien går over til kinetisk energi.

$$\text{ $$ E_p = q \cdot U = E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 $$ }$$

Her er  $q$  = elementærladningen  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  C og  $m$  = elektronmassen  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg.

$$\text{ $$ \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 3,75 \cdot 10^7 \text{ m/s} $$ }$$

Elektronfarten er  $3,75 \cdot 10^7$  m/s, dvs. 12,5% av lysfarten, men nordlyspartiklene kan ha enda større fart.

(Når farten overstiger ca. 10% av lysfarten burde vi regne relativistisk, dvs. anvende relativitetsteorien. Men relativitetsteorien inngår ikke i dette kurset. Regnet relativistisk er resultatet i eksempelet oppgaven  $3,73 \cdot 10^7$  m/s. Hadde spenningen i elektronkanonen vært 2 MV ville den ikke-relativistiske beregningsmåten gitt et resultat på 105% av lysfart, og det er ikke mulig. Regnet relativistisk blir resultatet 98% av lysfarten.)

### **Eksempel: Strømmen i en kalkulator**

Den elektriske strømmen i en lommekalkulator, som har et 3 V batteri, er 0,17 mA (1 mA = 1/1000 A). Beregn ladningen for en times (3600 s) bruk.

Svar:

$$\text{ $$ Q = I \cdot t = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 0,61 \text{ A} \cdot \text{s} = 0,61 \text{ C} $$ }$$

Hvor mye energi bruker kalkulatoren på dette arbeidet?

Svar:

$$\text{ $$ \text{Energi} = Q \cdot V = 0,61 \text{ C} \cdot 3 \text{ V} = 1,8 \text{ J} $$ }$$

## Magnetisme

Forfatter: Narom

[Magnetisme \(52535\)](#)

Siden 500 e.Kr. har det vært kjent at noen metaller trekker til seg jernholdige gjenstander. Magnet og magnetisme har fått sine navn fra Magnesia i Lilleasia. Videre kan magnetnålen – f.eks. et kompass, brukes som veiviser, selv i mørke og dårlig vær. I år 1600 konkluderte engelsmannen William Gilbert (1544–1603) at jorda selv er en stor magnet. Kompasset viser retningen til jordas magnetpoler.

Den danske fysikeren H. C. Ørsted (1777–1851), franskmannen André Ampère (1775–1836) og spesielt briten M. Faraday (1791–1867) gjorde grunnleggende studier av elektrisitet og magnetisme. Ørsted oppdaget at elektrisk strøm skaper et magnetfelt. Han demonstrerte hvordan elektrisk strøm påvirker en magnetnål. Det ble vist at strømførende spoler virker som magneter, og at magnetfeltet kunne forsterkes med å gi spolene en jernkjerne. Slike elektromagneter kan lages kraftigere enn permanente magneter.

# Magnetiske krefter og magnetiske felt

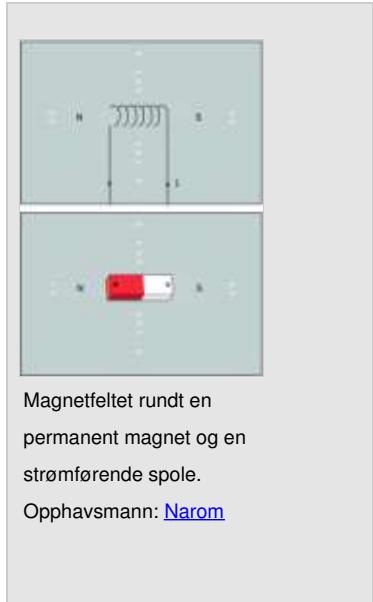
Forfatter: Narom

[Magnetiske krefter og magnetiske felt \(52536\)](#)

Alle magneter har to poler – en nordpol og en sørpol. Selv om vi deler magnetnålen opp i meget små enheter, vil alle ha to poler. Konklusjonen er at det ikke er mulig å isolere en nordpol fra en sørpol.

Hvert enkelt elektron i et molekyl eller atom er ekvivalent til en strømkrets (dvs. en sluttet elektrisk ledningskrets) og følgelig en liten magnet. Derfor kan vi ha meget store eller knøttsmå magneter, makro- og mikromagneter. Uavhengig av størrelsen er fysikken bak magnetisme elektriske strømmer i materialet.

Magnetfeltet kan, på samme måte som et elektrisk felt, illustreres med feltlinjer. Rundt enhver magnet går det alltid lukkede magnetiske feltlinjer. Feltlinjene rundt forskjellige magneter er skissert i figuren over. Alle magneter er omgitt av felt som går ut fra nordpolen og samles i sørpolen. Magnetfeltet beskrives som en vektor som har retningen til magnetfeltlinjene.



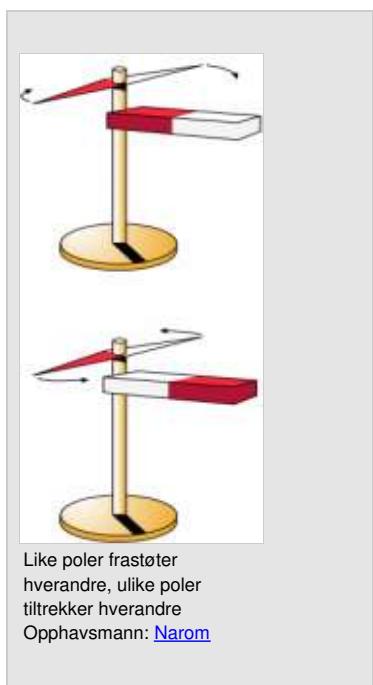
Magnetfeltet rundt en permanent magnet og en strømførende spole.

Opphavsmann: [Narom](#)

Tidlig i studiet av magnetismen ble det kjent at like magnetpoler frastøter hverandre, mens ulike poler tiltrekker hverandre. Dette er illustrert i figuren til høyre. Her er det vist at nordpol frastøter nordpol og sørpol frastøter sørpol, mens ulike poler tiltrekker hverandre.

Den aller viktigste oppdagelsen gjorde Faraday da han klarte å fremstille elektrisk strøm ved å bevege en magnet og en elektrisk spole i forhold til hverandre. Et amperemeter eller en lyspære var koblet til de to endene av spolen slik at det ble en lukket krets. Amperemeteret ga utslag og lyspæren lyste uten å være koblet til et batteri eller lysnettet. Det er dette fenomenet som kalles magnetisk induksjon. Konklusjonen var at magnetisme er et elektrisk fenomen. Med magnetisk induksjon var elektromagnetismen oppdaget.

Elektriske felt oppstår når det finnes elektriske ladninger – i ro eller i bevegelse. Et magnetfelt oppstår derimot bare om de elektriske ladningene beveger seg. Magnetfeltet har derfor sin årsak i elektriske strømmer. En permanent magnet og en strømførende spole er likeverdige. I romfysikken er forholdet mellom elektriske strømmer og magnetfelt et viktig tema. Fra målinger av jordas magnetfelt på jordoverflaten kan vi også beregne strømmen i ionosfæren.



Like poler frastøter hverandre, ulike poler tiltrekker hverandre

Opphavsmann: [Narom](#)



Magnetisk induksjon / flashnode  
<http://ndla.no/nb/node/52555>

En magnet som beveges i en spole, skaper en elektrisk strøm i spolen. Strømretningen bestemmes av bevegelsesretningen.

(Høyreklikk på bildet og velg "Play" for å se animasjonen.)

## Magnetisk kraft og magnetisk fluksstetthet

Når vi fører en ledet med lengden  $l$  og strømmen  $I$  i et magnetfelt blir ledet påvirket av en kraft  $F$ . Kraften er avhengig av styrken til magnetfeltet. Kraftretningen er alltid vinkelrett på både magnetfeltretningen og retningen til ledet – se figur om høyrehåndsregelen. Dersom ledet står vinkelrett på feltlinjene i magnetfeltet er kraften

$F = I \cdot l \cdot B$  betegnes som magnetisk fluksstetthet eller magnetisk intensitet og er et mål for styrken til magnetfeltet. Måleenheten for magnetisk fluksstetthet er tesla (T). Fra ligningen over får vi at  $F = q \cdot l \cdot B$

Dette leder oss til et annet uttrykk for fluksstettheten.

$$B = \frac{F}{q \cdot l}$$

Måleenheten for fluksstetthet er  $1 \text{ T} = 1 \frac{\text{tesla}}{\text{Ampere} \cdot \text{meter}} = 1 \frac{\text{tesla}}{\text{ampere} \cdot \text{meter}} = 1 \frac{\text{tesla}}{\text{ampere} \cdot \text{meter}} = 1 \frac{\text{tesla}}{\text{ampere} \cdot \text{meter}}$

Dette betyr at 1 T er den magnetfeltstyrken partikkelen opplever når den beveger seg vinkelrett på et magnetfelt med en fart på 1 m/s og utsettes for en kraft på 1 N.

Når vi tar hensyn til at flere av størrelsene er vektorer kan Lorentz-kraften skrives:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

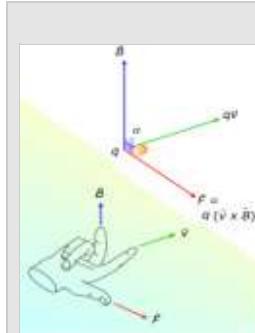
Denne likningen er et såkalt vektorprodukt eller kryssprodukt. Ved hvert vektorprodukt står resultantkraften vinkelrett på vektorene som multipliseres. Derfor kan man lese av likningen at den magnetiske kraftretningen står vinkelrett på både bevegelsesretningen og magnetfeltretningen. Vær oppmerksom på at rekkefølgen av vektorene og ikke er valgfritt, kommutativloven gjelder ikke. For å finne ut retninger i vektorprodukter bruker vi den såkalte høyrehåndsregelen. Når den strake pekefingeren viser i fartretningen og den bøyde langfingeren i magnetfeltretningen, så vil tommelen peke i kraftretningen, som i figuren til høyre. Dette gjelder for en positiv ladning  $q$ . For en negativ ladning velger vi den samme framgangsmåten, men da er retningen til kraften motsatt til pekeretningen for tommelen.

Likningen for Lorentz-kraften gjelder for alle vinkler mellom  $\vec{v}$  og  $\vec{B}$ . Betegner vi vinkelen mellom vektorene som  $\alpha$  kan vi beregne absoluttverdien til den magnetiske kraften som  $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$

Helt tilsvarende kan vi anvende høyrehåndsregelen for likningen  $F = I \cdot l \cdot B$ , som vi også kan skrive som vektorprodukt

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \cdot \vec{B}$$

Også absoluttverdiene beregnes på samme måte som isted.



Høyrehåndsregelen  
Opphavsmann: [Narom](#)

Høyrehåndsregelen for å bestemme retningen til den magnetiske kraften som påvirker en positivt ladd partikkelen i et magnetfelt. Partikkelen, med ladning  $q$ , kommer med hastighet  $v$  i pekefingerens retning. Magnetfeltet er langs langfingeren. Kraften,  $F$ , som virker på partikkelen har retning langs tommelfingeren. For en negativ ladning har kraften motsatt retning.

### Eksempel: Kraften på et proton

Hastigheten til et proton er  $5 \cdot 10^6$  m/s. Det beveger seg i en retning på  $30^\circ$  i et magnetfelt på 0,4 T. Beregn kraften som påvirker partikkelen.

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ m/s} \cdot 0,4 \text{ T} \cdot \sin 30^\circ \\ &= 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ N} \end{aligned}$$

Hvilken retning har  $F$ ? Regn ut akselerasjonen til protonet.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ N}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 9,6 \cdot 10^{17} \text{ m/s}^2$$

### Bevegelse av en ladd partikkelen i et magnetfelt

Fordi kraften på en ladd partikkelen i et magnetfelt alltid står vinkelrett på farten, vil fartretningen endres kontinuerlig. Endringen i fartretningen endrer i sin tur kraftretningen. Beveger partikkelen seg vinkelrett på magnetfeltet vil kraftvektoren peke mot sentrum av en sirkel. Dermed blir partikkelen tvunget i en sirkelbane som i animasjonen nedenfor. Vi har tidligere sett at tyngdekraften er rettet mot sentrum og holder en satellitt i bane. I magnetfeltet er det den magnetiske kraften som virker som sentripetalkraft.

$$F = q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r_g} \Rightarrow r_g = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

der  $F$  – den magnetiske kraften = sentripetalkraften og  $r_g$  = sirkelbanens radius som også kalles gyro- eller syklotronradius.

Legg merke til at  $r_g$  er proporsjonal med massen til partikkelen, men omvendt proporsjonal med intensiteten av  $B$ -feltet, til forskjell fra radien i en satellittbane, som er uavhengig av satellittens masse.



## Ladd partikkel i magnetfelt / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/52704>

En ladd partikkel som beveger seg vinkelrett på magnetfeltet, påvirkes av en magnetisk kraft som er rettet mot sentrum av en sirkel, og tvinger partikkelen i en sirkelbane. Magnetfeltet har retning inn i tegneplanet. Partikkelenes rotasjonsretning er motsatt for negative og positive ladninger.

Vinkelfarten til den ladde partikkelen uttrykt i radianer per sekund kalles gyrofrekvensen eller syklotronfrekvensen  $\omega_g$ .

$$\omega_g = \frac{v}{r} \frac{qB}{m}$$

der måleenheten er  $1 \text{ rad/s} = 1 \text{ C T/kg}$ .

Gyrofrekvensen  $\omega_g$  er proporsjonal med den magnetiske fluksstettheten  $B$  og partikkelenes ladning  $q$ , men omvendt proporsjonal med massen  $m$  til partikkelen.

### Fordypning: Magnetisk fluks

Den magnetiske fluksen  $\Phi$  gjennom en flate vinkelrett på feltlinjene er definert som produktet av fluksstettheten  $B$  og arealet  $A$ .

Måleenheten for magnetisk fluks er weber (Wb).  $\Phi = B \cdot A$ ,

med måleenheten  $1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ Wb}$ .

De magnetiske feltlinjene ligger tett der den magnetiske fluksen er høy på et lite areal.

### Fordypning: Magnetisk feltstyrke

Den magnetiske feltstyrke  $H$  er proporsjonal med den magnetiske fluksstettheten  $B$  i vakuum. Magnetisk feltstyrke og fluksstetthet har alltid den samme retningen. Proporsjonalitetskonstanten er  $\mu_0$ , den magnetiske feltkonstanten, også kalt magnetisk permeabilitet for vakuum.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

$$\text{der } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Den magnetiske fluksstettheten endres når magnetfeltet fylles med materie. Såkalte ferromagnetiske stoffer, som jern, øker fluksstettheten betraktelig. Forholdstallet som angir hvor mye sterkere magnetfeltet blir når det fylles med materie (gass, væske eller faststoff), kalles permeabilitetstall  $\mu_r$ . Dette tallet varierer både fra stoff til stoff, men varierer i tillegg med den magnetiske feltstyrken.  $\mu$  er et uttrykk for de magnetiske egenskapene til et medium.  $\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$

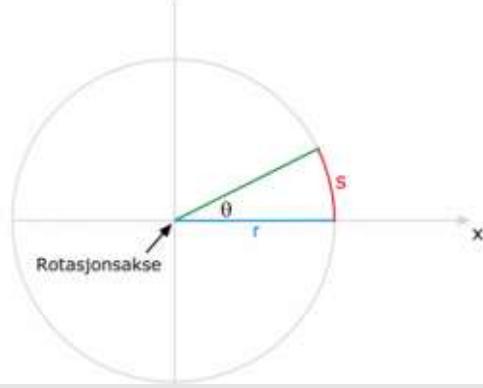
I atmosfæren kan vi ved god tilnærming anta at den magnetiske permeabiliteten er som i vakuum ( $\mu = \mu_0$ ).

### Fordypning: Utledning av likningen for gyrofrekvensen $\omega_g$

Vinkel  $\theta$  i radianer er definert som  $\theta = s/r$ , se figuren nedenfor. Vinkelfarten betegnes som  $\omega$ .

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{s}{r \cdot t} = \frac{v \cdot r}{r \cdot t} = \frac{v}{r} \quad \text{Vi bruker likning } F = q \cdot v \cdot B$$

og setter inn for  $r$ :  $\omega_g = \frac{v}{r} = \frac{v}{m \cdot \frac{qB}{m}} = \frac{v}{qB}$



Gyrofrekvens  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Elektroner og ioner i et krysset elektrisk og ..

Forfatter: Narom

[Elektroner og ioner i et krysset elektrisk og magnetisk felt \(52900\)](#)

Ladde partikler i verdensrommet påvirkes av både elektriske og magnetiske felt, og blir derfor utsatt for elektromagnetiske krefter.

Som vi har sett tidligere er de elektriske og magnetiske kraftene gitt ved henholdsvis

$$\vec{F}_E = q \cdot \vec{E} \quad \text{og} \quad \vec{F}_B = q (\vec{v} \times \vec{B})$$

med den skalare verdien  $F_B = q \cdot v \cdot B \sin \alpha$ .

Likningene viser at en elektrisk partikkel blir påvirket av en elektrisk kraft – uavhengig av om den ligger i ro eller beveger seg. Her ligger det en vesentlig forskjell mellom elektrisitet og magnetisme. Den magnetiske kraften på en elektrisk ladd partikkel er null når den ligger i ro. Kraften er også null dersom fartsgrensen er parallel med magnetfeltet, når  $\alpha = 0 \rightarrow F_B = 0$ . Kun ved bevegelser som danner en vinkel til magnetfeltet vil partikkelen bli påvirket av en magnetisk kraft. Det er også en annen viktig forskjell. En ladd partikkel i et elektrisk felt blir påvirket av en kraft som akselererer i retningen til det elektriske feltet. En ladd partikkel i et magnetfelt påvirkes av en kraft som står vinkelrett på både magnetfeltretningen og fartsgrensen.

Den generelle bevegelseslikningen for ladde partikler i et E- og B-felt – hvor det ikke er tidsvariasjoner – er gitt ved vektorsummen av den elektriske og magnetiske kraften.

$$\Sigma \vec{F} = q \cdot \vec{E} + q (\vec{v} \times \vec{B})$$

Denne likningen er komplisert å løse generelt. Vi skal i det følgende anta at  $\vec{E}$  og  $\vec{B}$  står vinkelrett på hverandre og på partikkelbanen. Vi regulerer feltene slik at summen av den elektriske og magnetiske kraften er null. Ifølge Newtons 1. lov beveger den laddede partikkelen seg rettlinjet og med konstant fart som i figuren nedenfor. Da har vi at

$$q \cdot \vec{E} = q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B}$$

Farten til elektronet eller ionet er lik forholdet mellom den elektriske feltstyrken og den magnetiske fluksdichten. I et laboratoriet hvor feltene kan reguleres gir dette forholdet oss en mulighet for å bestemme farten til elektrisk ladde partikler.



En ladd partikkel i krysset elektrisk og magnetisk felt / flashnode  
<http://ndla.no/nb/node/52903>

Magnetfeltet har retning inn i tegneplanet. Når summen av den elektriske og magnetiske kraften på en ladd partikkel er null beveger partikkelen seg rett fram. Vi antar her at  $q$  er positiv. For et elektron ville den elektriske og magnetiske kraften ha motsatt retning. Summen av disse kraftene ville fortsatt vært null.

# Det elektromagnetiske spektrum

Forfatter: Narom

[Det elektromagnetiske spektrum \(53360\)](#)

Det elektromagnetiske spektrum dekker et meget bredt frekvens- og bølgelengdeområde.

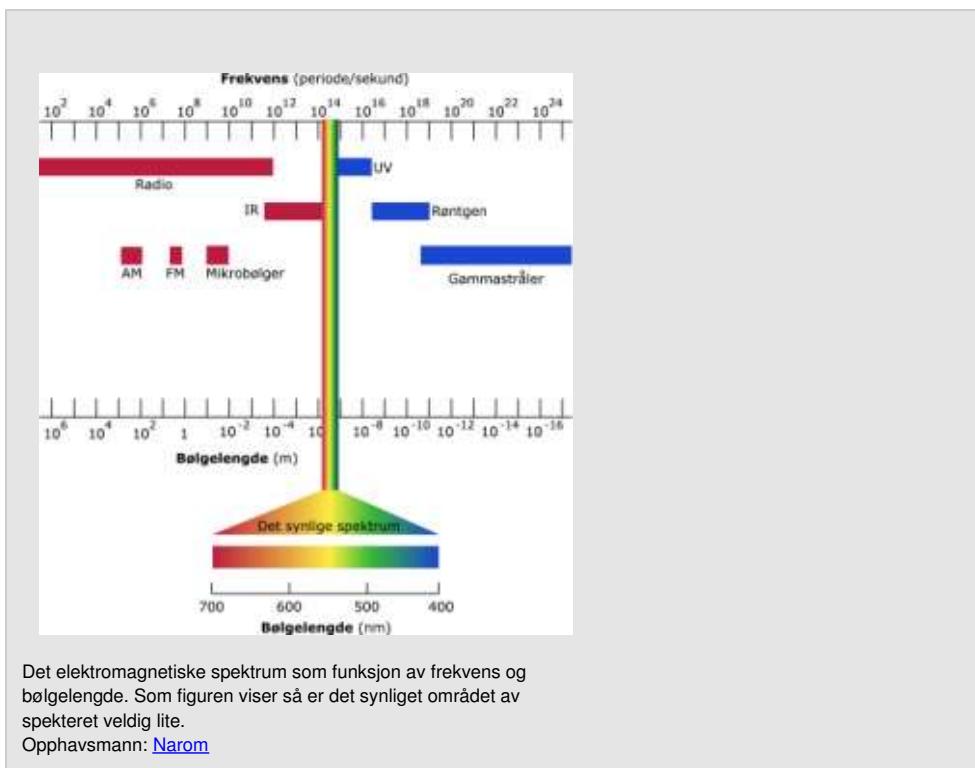
For alle e-m-bølger gjelder formelen

$$\lambda \cdot f = c$$

I vakuum og luft er  $\lambda \cdot f = c$ .

Både i tomt rom, men også i atmosfæren og verdensrommet, forplanter lyset seg med lysfarten  $c$ . Lyset bruker ca. 500 sekunder på veien fra sola til jorda. Derfor kan vi si at sola ligger 500 lyssekunder borte. Både lyset og andre e-m-bølger har heldigvis med seg informasjon om både kilden og mediet de har gått gjennom, informasjon vi kan tolke ved å studere strålingen nøyne.

Det synlige lyset og radiobølgene er bare en liten del av det brede båndet som kalles det elektromagnetiske spektrum. Dette spektret, som funksjon av frekvens og bølgelengde, er vist her:



Det elektromagnetiske spektrum som funksjon av frekvens og bølgelengde. Som figuren viser så er det synliget området av spekteret veldig lite.

Opphavsmann: [Narom](#)

Som vi ser strekker det seg fra gammastråling ( $\gamma$ ), hvor  $\lambda$  er  $10^{-16}$  meter, via røntgenstråling (X), ultrafiolett stråling (UV), synlig lys, infrarød stråling (IR), mikrobølger, radar- og radiobølger til magnetiske mikropulsasjoner med bølgelengder som kan være mer enn  $10^4$  km. Hvordan vi deler radiobølgene i forskjellige bånd er vist i følgende tabell:

Betegnelse	Forkortelse	Frekvens ( $f$ )	Bølgelengde ( $\lambda$ )
Ekstrem lange bølger	ELF	0,3 – 3 kHz	1000 – 100 km
Meget lange bølger	VLF	3 – 30 kHz	100 – 10 km
Langbølger	LF	30 – 300 kHz	10 – 1 km
Mellombølger	MF	0,3 – 3 MHz	1 – 0,1 km
Kortbølger	HF	3 – 30 MHz	100 – 10 m
Meget korte bølger	VHF	30 – 300 MHz	10 – 1 m
Ultrakorte bølger	UHF	0,3 – 3 GHz	1 – 0,1 m
"Superkorte" bølger	SHF	3 – 30 GHz	10 – 1 cm

Oversikt over den delen av det elektromagnetiske spektrum som kalles radiobølger

Det elektromagnetiske spektrum strekker seg altså fra meget energirik gammastråling til meget langbølget stråling med liten energi.

Praktisk talt all solstråling med  $\lambda < \text{ca. } 300 \text{ nm}$  blir absorbert i atmosfæren. Også radiobølger med  $\lambda > 10 \text{ m}$  ( $f < 30 \text{ MHz}$ ) blir absorbert i ionosfæren. Radiobølger i områdene VLF, LF, MF og HF reflekteres fra ionosfæren.

### Karakteristiske bølgestørrelser og enheter

For å kunne beskrive egenskapene til den e-m-strålingen er det nødvendig å kjenne energien, bølgelengden og/eller frekvensen, typen av stråling og mediet bølgene går gjennom. Bølgelengden  $\lambda_0$  er avstanden mellom to bølgetopper, bølgens maksimale utslag kalles amplitude  $A_0$  og bølgens periode er  $T$ . Bølgens frekvens  $f$  måles i hertz ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ). Sammenhengen mellom perioden og frekvensen er gitt ved at  $f=1/T$ .

For alle e-m-bølger er farten til bølgene gitt ved

$$\$v=\frac{c}{\lambda}\$$$

hvor  $v = \text{bølgehastigheten}$  (i vakuum er  $v=c$ ).

Den vanlige SI-enheten for energi er joule. Dette er en forholdsvis stor enhet, derfor brukes ofte elektronvolt (eV). 1 eV er den kinetiske energien partikkelen får når den akselereres i en spenning på 1 V.  $1 \text{ eV} = 1 \text{ J}$  (joule). 1 eV er en liten enhet, derfor brukes ofte 1 keV for 1000 eV og 1 MeV for  $10^6 \text{ eV}$ . Energien av strålingen er også gitt ved

$$\$E = h \cdot c \cdot \lambda\$$$

hvor  $h$  (Plancks konstant) =  $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  og  $\lambda$  er bølgelengden (vær oppmerksom på at i eldre litteratur brukes ofte  $\nu$  for frekvens).

I tabellen under har vi regnet ut energien til fotonene for en del bølgelengder.

Strålingstype	Bølgelengde i nm	Fotonenergi i eV
Røntgen	10	124
UV	100	12,4
overgang UV – synlig	400	3,1
overgang synlig – IR	800	$\approx 0,4$
IR	8000	$\approx 0,04$

Forholdet mellom bølgelengde og energi for forskjellige bølgelengder i spekteret

# Sammendrag

Forfatter: Narom

[Sammendrag: Elektromagnetisme \(53363\)](#)

## Elektriske felt

- Like ladninger frastøter hverandre, mens ulike ladninger tiltrekker hverandre
- Ladninger i bevegelse fører til en elektrisk strøm
- Den elektriske kraften  $F$  mellom elektriske ladninger  $Q$  og  $q$  i innbyrdes avstand  $r$  er gitt ved Coulombs lov:  
$$F = k_c \frac{Q \cdot q}{r^2}$$
- Elektrisk feltstyrke er kraft per ladning – dvs.  $E = f/q$ . Dette betyr igjen at  $F = q \cdot E$ .
- For en positiv ladning har kraft og elektrisk feltstyrke samme retning. Vi beskriver et elektrisk felt ved hjelp av feltlinjer.
- Av Coulombs lov følger at den elektriske feltstyrken rundt en kule er  
$$E = \frac{F}{q} = k_c \frac{Q}{r^2}$$
- Elektrisk potensial er potensiell energi per ladning – dvs.  
$$U = \frac{E_p}{q}$$

Potensialet måles i forhold til jord (null  $U$ ) – eller et annet valgt referansennivå. Elektrisk spenning ( $U$ ) er potensialforskjellen mellom to punkter i et elektrisk felt  $U = U_2 - U_1$ .

I alle formelene har vi forutsatt at de ladde partiklene ikke kolliderer med andre partikler.

## Magnetiske felt

- Et magnetfelt oppstår når elektriske ladninger beveger seg. Magnetismen er derfor nært knyttet til elektriske strømmer. Vi lager bilder av magnetfelt ved å tegne feltlinjer.
- Alle magneter – både permanente og strømførende spoler og sløyfer – har en nordpol og en sørpol. Separate magnetpoler, monopoler, eksisterer ikke.
- Magnetisk fluksstetthet  $B$  angir styrken av feltet. Absoluttverdien av  $B = F / (I \cdot l)$ , der  $F$  er den elektriske kraften,  $I$  strømstyrken og  $l$  lengden på lederen. Måleenheten til magnetisk fluksstetthet er tesla (T).
- I vakuum er den magnetiske feltstyrken  $H$  proporsjonal til den magnetiske fluksstettheten  $B$ .  
$$B = \mu_0 \cdot H$$
der  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m. Når magnetfeltet er fylt med materie er  
$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$
der  $\mu_r$  er permeabilitetstallet (uten måleenhet) som er stor for ferromagnetiske stoffer som f.eks. jern.
- Den magnetiske kraften på en strømleder, med lengde  $l$ , som står vinkelrett på  $B$  er gitt ved  
$$F = I \cdot l \cdot B$$
hvor  $I$  er strømmen i lederen. Kraften står vinkelrett på både  $B$  og strømlederen, og retningen er gitt ved høyrehåndsregelen.
- Den magnetiske kraft på en partikkell med ladning  $q$  – som har en fart  $v$  – vinkelrett på magnetfeltet med fluksstettheten  $B$  er gitt ved  
$$F = q \cdot v \cdot B$$
Kraften er vinkelrett på både magnetfeltet og farten.
- Elektrisk ladde partikler med masse  $m$  og ladning  $q$ , som kommer vinkelrett inn i et magnetfelt, tvinges til å bevege seg i sirkelbaner rundt magnetfeltet. Radian til sirkelen – kalt gyroradien eller syklotronradien – er gitt ved  
$$r_g = \frac{mv}{qB}$$
mens gyrofrekvensen  
$$\omega_g = \frac{qB}{m}$$
Ved andre vinkler blir det spiralbevegelse. Skjer bevegelsen i retningen til magnetfeltet vil partikkelen følge magnetfeltlinjen.

## Elektromagnetiske bølger

- Elektromagnetiske bølger oppstår når elektrisk ladde partikler blir akselerert.
- Elektromagnetisk stråling er varierende elektriske og magnetiske felt som står vinkelrette på hverandre og på stråleretningen.

## Elektromagnetisk stråling og partikkelstråling..

Forfatter: Narom

[Elektromagnetisk stråling og partikkelstråling fra sola \(58845\)](#)

Studiene av sola var lenge begrenset til det en kunne se med det blotte øye og med bakkebaserte instrumenter. Bare en meget liten del av den mangfoldige strålingen sola sender ut når ned til jorda. I dag studeres solstrålingen med avanserte instrumenter fra satellitter og romsonder utenfor jordas atmosfære. Vi har fått ny kunnskap om sola - spesielt innen bølgelengdeområder som ikke slipper gjennom jordas atmosfære.

Fra romsondene Solar Maximum Mission, Hubble, SOHO og Ulysses har vi fått veldig interessante data. Oppløsningen i disse er omkring 200 km på solas overflate. Med romsonden Ulysses - som ble skutt opp i 1992, har vi for første gang fått observasjoner fra solas polområder. Bare egenskaper og parametre ved sola som har direkte eller indirekte betydning for faget romfysikk vil bli omtalt her. Vi skal derfor hovedsakelig konsentrere oss om den elektromagnetiske strålingen og partikkelstrålingen fra sola.



Viktige romlaboratorier  
som har blitt brukt til  
studier av sola og  
verdensrommet.  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Karakteristiske størrelser, avstander og regio..

Forfatter: Narom

[Karakteristiske størrelser, avstander og regioner \(58849\)](#)

Sola kan betraktes som en gasskule med radius,  $R_S = 6,96 \cdot 10^8$  m, eller tilnærmet  $10^9$  jordradier ( $R_J$ ). Den består stort sett av hydrogen (~75%) og helium (~25%). Avstanden mellom sola og jorda varierer litt med årstiden som illustrert i figur (Error: Reference source not found). Sola er nærmest jorda om vinteren. Den midlere avstand er ca.  $1,496 \cdot 10^{11}$  m, eller nesten 150 millioner km. Denne avstanden kalles en astronomisk enhet (forkortes AU). 1 AU er dermed tilnærmet  $215 R_S$ .

$$\$ \$ 1 \mathbf{\text{mathrm{AU}}} \mathbf{\text{equiv}} 500 \mathbf{\text{mathrm{s}}} \mathbf{\text{cdot}} 3 \mathbf{\text{cdot}} 10^8 \mathbf{\text{mathrm{m/s}}} = 150 \mathbf{\text{cdot}} 10^9 \$ \$$$

Lysets hastighet ( $c$ ) er  $3 \cdot 10^8$  m/s. Derfor tar det ca. 500 sekunder (s) før det når fra sola til jorda. Avstanden mellom jorda og månen er omrent  $60 R_J$ . Lyset bruker ca. ett sekund på å tilbakelegge denne avstanden.

## Fordypning: Juliansk og gregoriansk kalender

Det er viktig å være oppmerksom på at datoer før år 1700 er gitt i forhold til den julianske kalenderen som ble innført av Julius Cæsar i år 45 f. Kr. I den kalenderen var hvert fjerde år et skuddår.

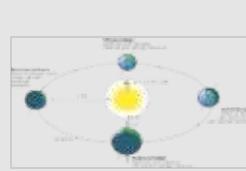
Tiden mellom vårjevndøgn et år til neste vårjevndøgn er 365,2422 dager. Av praktiske grunner må hvert år være et helt antall dager. I den julianske kalenderen var hvert fjerde år 366 dager. dette medførte at middellengden av hvert år var 365,25 dager. Resultatet var derfor at i tiden etter år 45 f.Kr. ble årene etter hvert forskjøvet i forhold til årstidene, de kom tidligere og tidligere.

Først omkring år 1550 foreslo pave Gregorius XIII at dette måtte rettes opp. I hver periode på 400 år minsket han antall skuddår med tre. Bare de hele hundreårstall som kan deles med 400 er skuddår. Dvs. at år 1700, 1800 og 1900 ikke er skuddår, mens 1600 og 2000 er skuddår. På denne måten ble middellengden av et år 365,24225 dager.

Den gregorianske kalenderen ble innført i Norge i år 1700. Det ble gjort ved at man den 17. februar hoppet over 14 dager. Dagen etter den 17. februar 1700 ble derfor den 1. mars. På denne måten rettet man opp den forskyvning i årstidene som hadde funnet sted ved bruken av den julianske kalenderen. Den nye kalenderen, som vi bruker i dag, startet altså i 1700 i vårt land, men den ble innført i de fleste land i Europa i 1582. Selv om heller ikke vår nåværende kalender nøyaktig dekker middellengden av et år, er forskyvningen ubetydelig.

Sett fra jorda er solas rotasjonsperiode ca. 27 døgn, og dens rotasjonshastighet  $13,4^\circ$  pr døgn. Omdreiningstiden varierer fra solas ekvator til dens polområder fordi de ulike gasslagene kan bevege seg i forhold til hverandre. Jordas hastighet rundt sola er tilnærmet 30 km/s.

Effekten av den elektromagnetiske strålingen fra sola er  $3,86 \cdot 10^{26}$  W, et nesten ufattelig stort tall. Solenergien som jorda mottar hvert sekund på hver kvadratmeter i jordbanen ved atmosfærens yttergrense, normalt på stråleretningen, er ca.  $1370 \text{ W/m}^2$ . Det er denne størrelsen som kalles solarkonstanten,  $S_S$ . Energien,  $E_S$ , som jorda mottar fra sola er gitt ved



Sol-jord-systemet. Jorda beveger seg rundt sola med en hastighet på 30 km/s  
Opphavsmann: [Narom](#)

$$E_S = \pi R_J^2 (1-A) S_S$$

hvor A er den delen av solstrålingen som reflekteres og/eller absorberes i atmosfæren; dvs. ca. 32 %. Denne størrelsen kalles jordas albedo. Setter vi verdier inn i denne likningen, ser vi at jorda hele tiden varmes opp med ca.  $1,8 \cdot 10^{17}$  W. I tillegg til dette kommer partikkelstrålingen. Sola er derfor uten sammenligning jordas viktigste energikilde.

### Solas oppbygging

Sola er en enorm stor kule fylt med gass. Både tettheten og temperaturen øker fra overflaten mot sentrum. En meget stor del av massen er samlet i kjernen, se figuren under. Innenfor  $0,25 R_S$  – som bare utgjør 1,5 % av volumet – ligger halvparten av solmassen. Omkring 75 % av denne er hydrogen. Gasser tyngre enn helium bidrar med ca. 1 %. Temperaturen i kjernen er omkring  $15 \cdot 10^6$  K. Denne høye temperaturen er viktig for energiproduksjonen. Utenfor kjernen, til en avstand av  $0,85 R_S$ , ligger strålingssonen. Over den har vi konveksjonssonen. Det er i området mellom strålingssonen og konveksjonssonen at solas magnetfelt genereres.

Energien bruker om lag 10 millioner år på å forplante seg fra kjernen til solas overflaten. Det sollyset vi har i dag ble derfor generert for svært lenge siden.

### Solas atmosfære

Solas atmosfære, som er transparent over et bredt frekvensområde, deles opp i tre regioner:

#### Fotosfæren (0-1000 km)

Fra fotosfæren utsendes hoveddelen av det synlige lyset. Fotosfæren er ikke jevnt belyst, men viser betydelige strukturer (granuler). Temperaturen i fotosfæren er ca. 6000 K. Temperaturen synker utover til minimum ca. 4300 K ved fotosfærrens ytterkant.

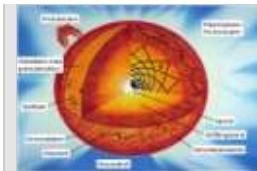
#### Kromosfæren (1000-20.000 km)

Den nederste delen av kromosfæren (opp til 10.000 km) kalles nå ofte omvendingslaget. Kromosfære betyr fargekule. Navnet har den fått på grunn av rødfargen. Temperaturen øker med høyden. I dette området dannes de tre mørke Fraunhoferske (de har fått navnet etter han som først oppdaget de) absorpsjonslinjene i et kontinuerlig spektrum. De er linjer og ikke brede bånd fordi de kommer fra atomer i den forholdsvis kalde solatmosfæren. Absorpsjonslinjene i den synlige delen av solspekteret er skarpe og mørke. De skyldes at lys med bestemte bølgelengder blir sterkt absorbert i kromosfæren. Fra frekvensmålinger av de Fraunhoferske absorpsjonslinjene kan man få informasjon om atmosfærrens sammensetning.

#### Koronaen, solas ytterste lag (20.000 km til $< 5 RS$ )

Koronaen er meget varm med temperaturer opptil en million () grader. Koronaen og kromosfæren slipper gjennom det synlige og det infrarøde lyset fra fotosfæren uten nevneverdig påvirkning. Området er meget dynamisk med intense eksplosjonene. Hovedparten av røntgen, X- og ultrafiolett, UV-stråling fra sola kommer fra koronaen. I tillegg er koronaen hovedkilden for solvinden som er meget viktig for fysikken i jordas øvre atmosfære, spesielt i polarområdene. Som vi ser fra figuren under er koronaen ikke kulesymmetrisk, men meget strukturert og variabel.

Det er ikke noe skarpt skille mellom de tre lagene. Hovedparten av det synlige lyset kommer fra fotosfæren. Fotosfæren er omgitt av en lysende solatmosfære.



Skjematisk framstilling av solas oppbygging.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Solas korona

Solas korona i a) en rolig periode og b) en aktiv periode.  
*NAROM*

# Den elektromagnetiske strålingen fra sola

Forfatter: Narom

[Den elektromagnetiske strålingen fra sola \(58888\)](#)

Tidligere var et av de store spørsmålene i fysikken om lys var en form for bølge eller om det vare partikler. I dag vet vi at lyset har egenskaper som fører til at vi ofte kan bruke bølgebeskrivelsen, mens andre ganger må vi se på lyset som partikler. Dette er spesielt viktig når vi skal forklare vekselvirkningen mellom sollyset og atmosfæren.

Et legeme som absorberer all stråling som faller på det, kalles et svart legeme. Strålingen fra et svart legeme bestemmes helt av legemets temperatur. I praktisk talt alle diskusjoner om solas elektromagnetiske stråling brukes en temperatur på 6000 eller 5800 K.

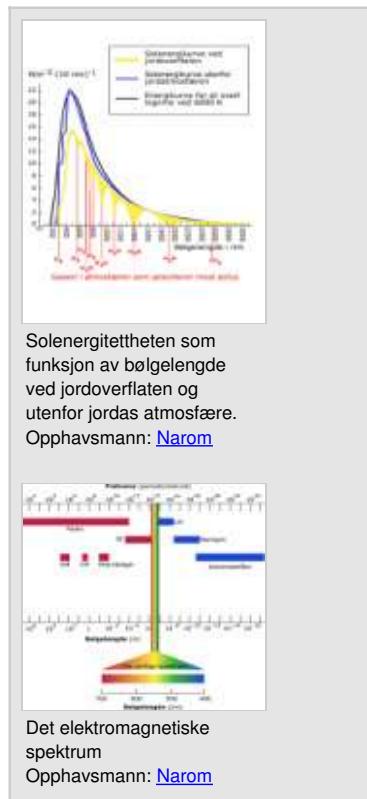
Figuren til viser solenergi både ved jordoverflaten og utenfor Jordas atmosfære. De gassene i atmosfæren som absorberer mest sollys, er også oppgitt. Den blå kurven viser solas elektromagnetiske spektrum utenfor atmosfæren, mens den svarte kurven er stråling fra et svart legeme ved en temperatur på 6000 K. Også spekteret ved havoverflaten er tegnet opp.

Praktisk talt all stråling med bølgelengde mindre enn 290 nm stoppes av atmosfæren.

Solas elektromagnetiske spektrum strekker seg fra hard røntgenstråling ( $\lambda < 0,01$  nm) til radiobølger med  $\lambda \geq 1000$  km (hydromagnetiske bølger, mikropulsasjoner). Omkring 45 % av energien finnes innenfor det synlige området, 400 – 750 nm, mens bare 10 % finnes innenfor UV- og røntgen-områdene; det vil si  $\lambda < 400$  nm. Oppdelingen av det elektromagnetiske spektret i frekvens og bølgelengde er vist nederst til høre på siden.

Som figuren øverst viser, observerer vi på Jordas overflate bare en liten del av den mangfoldige strålingen som sola sender ut. Atmosfærens vindu strekker seg fra ca. 290 til 1300 nm med maksimum stråling nær 500 nm. Absorpsjonen av sollyset i vår atmosfære er viktig for forståelsen av fysikken i lufthavet omkring oss.

Som det fremgår av figuren øverst, har sola et markert maksimum mellom 400 og 700 nm. De viktigste gassene i vår atmosfære som absorberer sollyset er markert i figuren. Den lavere atmosfære, spesielt ozonlaget, er en viktig buffer for den farlige solstrålingen i røntgen- og UV-området. Absorpsjonen i det infrarøde området skyldes hovedsakelig gassene  $H_2O$  og  $CO_2$ . I UV-området er det noen sterke emisjonslinjer fra hydrogen som er av den største betydning for dannelsen av ionosfæren. Disse linjene tilhører Lymanserien som oppstår når et elektron i et eksitert hydrogenatom faller tilbake til grunntilstanden. Ly  $\alpha$  oppstår ved hopp fra energinivå  $n=2$  til  $n=1$ . Ly  $\beta$  sendes ut ved et hopp fra bane  $n=3$  til  $n=1$ .



Solenergitettheten som funksjon av bølgelengde ved jordoverflaten og utenfor Jordas atmosfære.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Det elektromagnetiske spektrum  
Opphavsmann: [Narom](#)

Selv om energifluksen i bølgelengdeområdet  $\lambda < 400$  nm bare er  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup> under rolige forhold på sola, er denne strålingen viktigst for ionosfæren. Solarkonstanten,  $S_S$  angir energien per flateenhett normalt på stråleretningen utenfor jordas atmosfære. I dag måles solarkonstanten nøyaktig ved hjelp av satellitter. Selv om  $S_S$  kalles en konstant, kan den variere litt (opptil 0,5 %) med aktiviteten på sola. Solarkonstanten er derfor ikke noen absolutt konstant. Den verdi som ofte brukes omkring år 2000 er 1370 W/m. Det er kjernefysiske prosesser (fusjon) i solas indre som produserer denne energien.

# Strålingslovene

Forfatter: Narom

[Strålingslovene \(58892\)](#)

Solstrålingen vekselvirker med det nære verdensrom og med vår atmosfære. Denne vekselvirkningen er meget viktig. Også jorda, ja alle legemer, sender ut stråling. Det er derfor viktig at vi kjenner strålingslovene.

## Stefan-Boltzmanns lov

I forrige århundre fant to tyske fysikere, Josef Stefan (1835–1893) og Ludwig Boltzmann (1844–1906), at utstrålt effekt fra et legeme, over et bredt frekvensområde, var proporsjonal med temperaturen i fjerde potens. Stefan-Boltzmanns lov er gitt ved

$$\text{$$E = \sigma T^4$$}$$

hvor  $E$  = utstrålt energi per tid og areal i  $\text{W/m}^2$ , og  $\sigma$  (sigma) er Stefan-Boltzmanns konstant, som har verdi  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ . Strålingen fra stjerner følger med god tilnærming denne likningen.

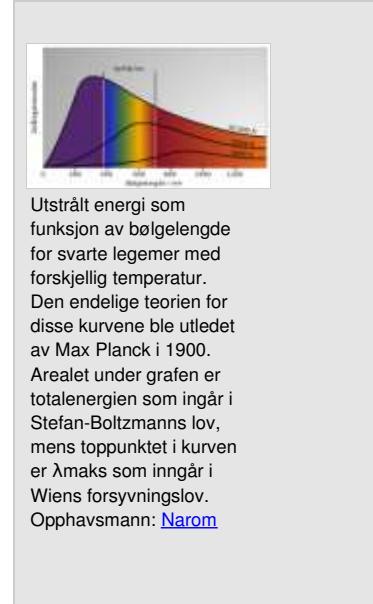
## Wiens forskyvningslov

Den tyske fysikeren Wilhelm Wien (1864–1928) fant følgende lov for sammenhengen mellom temperatur og bølgelengde:

$$\text{$$\lambda_{\text{maks}} \cdot T = \text{konstant} = a$$

Denne likningen kalles Wiens forskyvningslov. Med bølgelengden i meter, ved størst intensitet og den tilsvarende overflatetemperaturen i kelvin får konstanten  $a$  følgende verdi:  $2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$ .

Strålingen fra en stjerne har maksimal verdi ved en bestemt bølgelengde og denne flytter seg mot lavere verdier når temperaturen til stjernen øker. Derfor vil fargen på en stjerne si mye om dens temperatur. Om vi i Wiens forskyvningslov setter temperaturen til sola lik 5800 K, får vi maksimal stråling ved ca. 500 nm, dvs. i det gulgrønne området. Ved å måle bølgelengden med maksimal intensitet for fjerne stjerner og andre objekter kan vi bestemme deres overflatetemperatur.



Utstrålt energi som funksjon av bølgelengde for svarte legemer med forskjellig temperatur. Den endelige teorien for disse kurvene ble utledet av Max Planck i 1900. Arealet under grafen er totalenergien som ingår i Stefan-Boltzmanns lov, mens toppunktet i kurven er  $\lambda_{\text{maks}}$  som inngår i Wiens forskyvningslov.  
Opphavsmann: [Narom](#)

### Eksempel: Wiens forskyvningslov

Regn ut  $\lambda_m$  (bølgelengde ved maksimal utstråling) fra sola når dens overflatetemperatur er  $T_S = 5800 \text{ K}$ .

Svar: Vi bruker Wiens forskyvningslov:

$$\text{$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{a}{T} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{5800 \text{ K}} = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$$}$$

### Eksempel: Stefan-Boltzmanns lov

Beregn solas utstrålte effekt når dens temperatur,  $T_S = 5800 \text{ K}$ .

Svar: Vi må først beregne utstrålt energi per  $\text{m}^2$  ved å bruke Stefan-Boltzmanns lov:

$$\text{$$E_S = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/K}^4 \cdot 5800^4 \text{ K}^4 = 3,7 \cdot 10^{26} \text{ W/m}^2$$

$$\$= 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \$$$

Totalt utstrålt effekt: For å finne totalt utstrålt effekt må vi gange med solas overflate.

$$\begin{aligned} \$P &= E_S \cdot 4 \pi R_S^2 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \cdot 4 \pi \cdot (7,0 \cdot 10^8 \text{ m})^2 \\ \$ &= 4,0 \cdot 10^{26} \text{ W} \$ \end{aligned}$$

# Elektromagnetisk stråling fra forstyrrelser på...

Forfatter: Narom

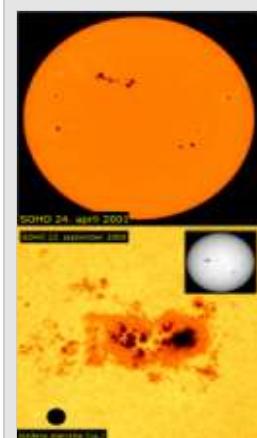
[Elektromagnetisk stråling fra forstyrrelser på sola \(58896\)](#)

Solstrålingen varierer mye. Mange forskjellige typer av forstyrrelser forekommer på sola. Som på jorda kan det være storm og uvær. Vi skal her diskutere solflekker og flares, som er intense forstyrrelser på sola. Disse er spesielt viktige for fysikken i vår atmosfære, samtidig som de angir solas generelle aktivitetsnivå meget godt.

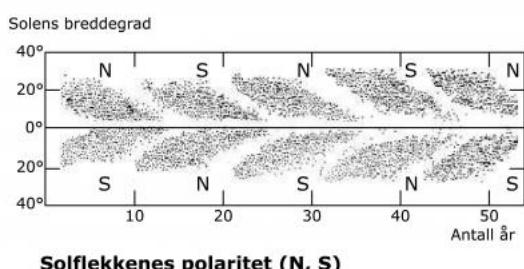
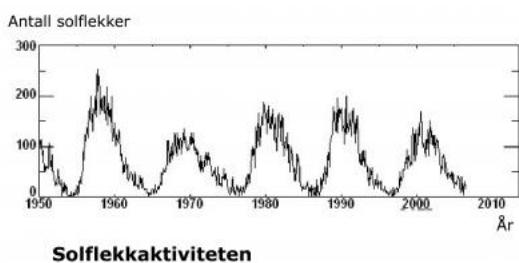
Solflekkene opptrer som mørke områder i fotosfæren. Temperaturen i sentrum av flekkene er i middel omkring 1500 K lavere enn utenfor flekkene. Solflekkene følger med sola i dens rotasjon om sin egen akse. Wolffs solflekktall ( $R$ ), er den vanlige indeks for solflekaktiviteten. Antall solflekker varierer mellom 0 og 300.

Levetiden for flekker er meget variabel, fra timer til mange dager. Ca. 50% varer mindre enn 2 dager, men noen ytterst få kan være aktive opptil 10 solrotasjoner.

Forstyrrelsene på sola varierer i fase med solflekperioden, som er tidsrommet mellom to solflekminima. Denne perioden (solsyklen) er i middel meget nær 11 år, men den kan variere fra 10 til 12 år (se øverste del av figuren under). Fordelingen av flekker over solskiven varierer mye fra solflek maksimum til minimum. Ved maksimum opptrer flekkene nærmere ekvator (mindre enn 20 breddegrader nord og sør fra ekvator) enn i perioder ved solflekminimum (opptil 40-50 breddegrader) (se nederste del av figuren under).



Øverst sees hele solskiva med flere solflekker.  
Nederst sees detaljer av en stor solflekkguppe.  
Opphavsmann: [NASA](#)



Figuren øverst viser antall solflekker pr. år i perioden 1954 til 2008. Den nedre figuren, som populært kalles sommerfugldiagrammet, illustrerer hvor på solskiven flekkene ligger som funksjon av solsyklusen. Ved høy aktivitet ligger flekkene nærmest ekvator. Det er ikke ofte en ser solflekker som ligger mer enn 40 grader fra solas ekvator.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Solflekkene opptrer magnetisk parvis, en med nordpol og en med sydpol. Innenfor en solflekperiode opptrer nordpolene og sydpolene i en bestemt rekkefølge. I neste periode er rekkefølgen omvendt. Dette innebærer at sola har en magnetisk syklus på ca. 22 år, dvs. 2 solflekperioder. Innen romfysikk er 22-årsperioden like viktig som 11-årsperioden.

Det er også viktig å være oppmerksom på at jordas rotasjon omkring sola fører til at vi ikke ser nøyaktig samme del av solskiven i løpet av året. Antall solflekker varierer mye fra en solflekkperiode til neste. I tillegg øker antall solflekker hurtigere fra minimum til maksimum (ca. 4,5 år) enn de avtar tilbake til minimum (ca. 6,5 år). Først i år 1750 begynte man å nummerere solflekkperiodene. I 1996 startet en ny syklus som i 2001 ga et meget kraftig maksimum. I år 2008 og 2009 var antall solflekker meget lav. Fra og med år 2010 kan det se ut som antallet solflekker begynner å øke igjen og det kan tyde på at vi er på vei inn i en ny syklus. Det har tidligere også vært perioder med lite aktivitet. Det mest ekstremt som er kjent er fra år 1640 til 1710. Da var antall solflekker praktisk talt null. I denne perioden var også klimaet kjølig og perioden kalles derfor Den lille istid eller Maunderminimum.

Meget intense, men kortvarige ( $< 1$  time) utbrudd forekommer i kompliserte solflekkgrupper. Disse kalles flares og er relativt små, lyssterke områder på sola, nesten som en eksplosjon. Effektene av flarene kan sees gjennom hele solatmosfæren. Flarene kan registreres effektivt innen både X-, UV- og radio-området. Fortsatt vet vi lite om genereringsmekanismen for flares.

Fotografier av sola i monokromatisk lys (for eksempel ved  $H\alpha$  - 656,3 nm) viser intense forstyrrelser i solatmosfæren. Da sendes mengder av ladde partikler med hastigheter opptil 1000 km/s ut fra sola. De har den aller største innvirkning på jordas atmosfære.

Varigheten av en flare er normalt mindre enn 1 time. Lysstyrken kan bli opp til 100 ganger bakgrunnsnivået. Man bruker klasse 1 til klasse 4 for å angi variasjonen i styrken. Klasse 3 og 4 flare er intense og fører til store forstyrrelser i den øvre, polare atmosfæren.

Sammenhengen mellom solflekktalet,  $R$ , og antall flares per dag,  $N$ , er gitt ved:

$$N = \alpha \cdot R$$

hvor  $\alpha$  er en observert konstant. Dette betyr at antall flares er proporsjonalt med solflekktalet. Selv om solarkonstanten ikke øker mye i forbindelse med flares, og synes å være uavhengig av solflekktalet, kan økningen i X- og UV-strålingen være betydelig, ja mer enn 100 ganger.

I tillegg sendes det ut enorme mengder partikler med energier fra eV til mange hundre MeV ved høy solaktivitet. Forstyrrelser på sola kan også observeres i radiobølgeområdet; over 100 MHz. Radiostøyen kan brukes som et mål for aktiviteten på sola. Da den solare radiostøyen påvirker vår atmosfære lite, skal vi her ikke gå nærmere inn på dette fenomenet.

Solstrålingen varierer mye. Prosesser på sola med varighet fra minutter til timer og dager, ja måneder er viktig for romfysikken. I tillegg har vi solrotasjonsperioden på 27 dager og årstidsvariasjonene. Den daglige variasjonen er jo meget stor fordi bare halve jorda er belyst samtidig. I tillegg varierer solas tilførsel av energi litt fordi avstanden til sola ikke er konstant. Avviket fra middelavstanden er tilnærmet  $\pm 1,7\%$ .

Hvor mye solenergi vi mottar på jorda avhenger av hvor vi bor og tiden på året. Det som er aller viktigst for temperaturen er jordas tilt, der vil si jordas hellingsvinkel. Rotasjonsaksen er ikke normal på ekliptikkplanet, men danner en vinkel på  $\pm 23,5$  grader. Denne vinkelen varierer mellom  $21,6^\circ$  til  $24,5^\circ$  med en periodisitet på 41 000 år.



# Energiproduksjon på sola

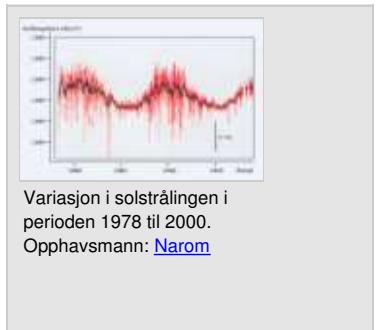
Forfatter: Narom

[Energiproduksjon på sola \(58907\)](#)

Den energien som treffer jorda fra sola, er tilnærmet  $1,8 \cdot 10^{17}$  watt. Hvilken fysisk prosess gir grunnlaget for den store energiproduksjonen på sola? For å angi effekten av solstrålingen har vi innført begrepet "solarkonstanten". En serie målinger av solarkonstanten er vist i figuren under. Middelverdien av disse er 1370 W/m. Målingene med flere satellitter i perioden 1978 til 2000 viser variasjoner i solarkonstanten på ca. 0,2 % pr. år. Solarkonstanten er litt større i år med solflekk-maksimum enn i år med minimum solaktivitet.

Grunnlaget for solas energi, og energiproduksjon på andre stjerner, er kjernefysiske prosesser, som vi her populært kaller "solovnen". Hydrogenkjerner smelter sammen og danner heliumkjerner, alfapartikler. Det blir et massetap på ca. 7 kg, når ett tonn hydrogen blir til helium ved fusjon. Denne massen omgjøres til energi, i henhold til Einsteins berømte likning

$$E = m c^2$$



Variasjon i solstrålingen i perioden 1978 til 2000.  
Opphavsmann: [Narom](#)

der  $m$  er masse og  $c$  er lyshastigheten. Sola bruker omkring 4 millioner tonn hydrogen hvert sekund. Fusjonen fører til frigjøring av enorme energimengder.

Det var den britiske astronomen Robert Atkinson og den østerrikske fysikeren Fritz Houterman som først foreslo en slik solovn. Den tyske fysiker Hans A. Bethe (1906–2005) som i 1938 utarbeidet den detaljerte teorien, fikk Nobelprisen i 1967. Innenfor området på ca. 0,25 solradier på sola er temperaturen så høy, og tettheten så stor, at fusjon kan foregå.



Energiproduksjonen på sola / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/58910>

Denne figuren viser hvordan en tenker seg energiproduksjonen. Solas indre består av en gassblanding med hydrogen- og heliumkjerner samt elektroner som beveger seg med stor hastighet. Hydrogenkjernene vil kollidere slik at de smelter sammen; vi får fusjon. Ved denne prosessen frigjøres en meget spesiell partikkel som kalles nøytrino. Den kan fare gjennom verdensrommet med stor hastighet. Den går tvers gjennom jorda uten vanskeligheter. Navnet, som på italiensk betyr "liten nøytral partikkel", har den fått av den italienske fysikeren Enrico Fermi (1901-54). Dens eksistens ble foreslått i 1931, men den ble ikke observert før 25 år senere. I kjernefysikken har vi sett at ustabile atomkjerner som sender ut en betapartikkel samtidig sender ut en nøytrino. I solas indre er det intens stråling og varme som diffunderer utover, men det tar lang tid før den når overflaten.

Vi kan med god grunn spørre hvor lenge sola vil skinne. Sola vil ikke leve evig. Den vil en gang gå tom for brennstoff. Ekspertene mener at sola er kommet omtrent halvveis i sin levetid, det vil si at den vil lyse og varme omtrent som nå i 5 milliarder år til.

## Eksempel: Solovnen

Det er proton-proton-reaksjoner som er kilden til solovnen. Vi antar at solas energi på jorda er  $1,4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ . 10 % av den totale mengden hydrogen inngår i proton-proton-reaksjoner. Regn ut

- Hvor mye lettere sola blir pr. år.
- Hydrogentapet pr. sekund.
- Solas levetid

Vi vet at:\

$$\text{solas radius } R_{\odot} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}, \\ \text{solas masse } M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg},$$

$$\text{solas utstråling pr. areal setter vi lik instrålinga pr. areal på jorda, } P_{\odot}/A = 1,4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2, \\ \text{solas overflate er } A = 4\pi R_{\odot}^2 = 2,83 \cdot 10^{23} \text{ m}^2,$$

$$\text{massen til en hydrogenkjerne } m_{\text{H}} = 1,007825 \text{ kg} \\ \text{massen til en heliumkjerne } m_{\text{He}} = 4,002603 \text{ kg}$$

a. Først må vi regne ut totalt utstrålt effekt:

$$P_{\odot} = \frac{P}{A} \cdot A = 1,4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot 2,83 \cdot 10^{23} \text{ m}^2 = 3,96 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Vi kan nå bruke Einsteins formel for masse-energi-ekvivalensen til å beregne massetapet:

$$E = mc^2 \quad \Rightarrow \quad m = \frac{E}{c^2}$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{P}{c^2} = \frac{3,96 \cdot 10^{26} \text{ W}}{(3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} = 4,40 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$$

b. Massetapet pr fusjon er:

$$\Delta m_f = 4m_{\text{H}} - m_{\text{He}} = 4 \cdot 1,007825 \text{ kg} - 4,002603 \text{ kg} \\ = 0,028697 \text{ kg} = 0,028697 \text{ kg} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 4,76 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

Antall fusjoner pr s er da:

$$f = \frac{\Delta m_f}{\Delta t} = \frac{4,40 \cdot 10^9 \text{ kg/s}}{4,76 \cdot 10^{-29} \text{ kg}} = 9,24 \cdot 10^{37} \text{ s}^{-1}$$

Ved hver fusjon tapes 4 H<sup>+</sup>. Det totalt H<sup>+</sup> tapet pr s blir da:

$$\frac{\Delta m_{\text{H}}}{\Delta t} = f \cdot 4m_{\text{H}} = 9,24 \cdot 10^{37} \text{ s}^{-1} \cdot 4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 6,17 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}$$

c. Solas levetid: 10 % av H<sup>+</sup> vil være:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{0,10 \cdot M_{\odot}}{\Delta m_{\text{H}}} = \frac{0,10 \cdot 2,00 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{6,17 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}} = 3,24 \cdot 10^{17} \text{ s} = 10 \text{ milliarder år}$$

Sola har alt levd 5 milliarder år så da er det 5 milliarder år igjen.

# Absorpsjon av solstrålingen i jordas atmosfære

Forfatter: Narom

[Absorpsjon av solstrålingen i jordas atmosfære \(59109\)](#)

Som du ser fra figuren er det flere steder dype sørk i strålingen fra sola nede på jordoverflaten. Dette skyldes absorpsjon på veien gjennom jordas atmosfære. All farlig solstråling i UV- og røntgenområdene - dvs. stråling med bølgelengde  $\leq 350$  nm blir absorbert i atmosfæren og når ikke ned til jordoverflaten. Strålingen kan beskrives som bølger, med en bestemt frekvens og bølgelengde. Vi har da følgende forbindelse mellom bølgelengde  $\lambda$  og frekvens  $f$ :

$$\lambda \cdot f = c$$

hvor  $c$  er lyshastigheten. I andre tilfeller må lys beskrives som små energipakker, kalt fotoner eller lyskvanter. Energien  $E$  til fotonene avhenger av  $f$ :

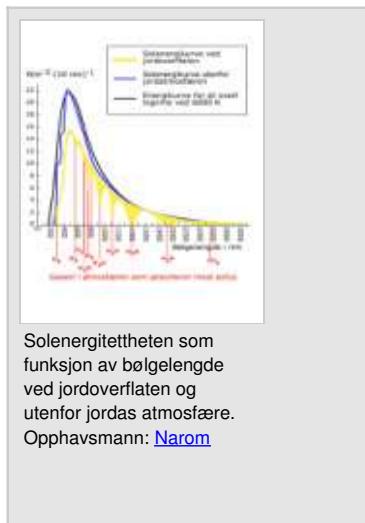
$$E = h \cdot f$$

hvor  $h$  er Plancks konstant;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js.

For å forklarer vekselvirkningen mellom solstrålingen og atmosfæren trenger vi partikkelskrivelsen. Da må vi regne ut energien til fotonene som vi finner fra den andre likningen. Vi får da, om vi bruker den første likningen og setter inn for konstantene i eV og nm,

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Setter vi inn verdier basert på SI-enheter får vi svaret i joule (J). Energien som enkeltfotoner har er liten. Da er elektronvolt (eV) en mye brukt måleenhet,  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Vi kan så beregne at synlig lys (400 – 800 nm) har en fotonenergi mellom 3,1 eV for blått og 1,5 eV for rødt lys. For UV-stråling ved  $\lambda = 124$  nm har fotonene en energi på 10 eV. Fotoner med  $\lambda < 124$  nm er enda mer energirike. Selv om bare ca. 1% av solenergien finnes innenfor dette området, er det denne strålingen som forandrer atmosfæren mest. I kapittel 3 lærte vi at all elektromagnetisk stråling med energi  $> 10$  eV, dvs. bølgelengde  $< 124$  nm, kalles ioniserende stråling.



Solenergitettheten som funksjon av bølgelengde ved jordoverflaten og utenfor jordas atmosfære.  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Solas magnetiske felt

Forfatter: Narom

[Solas magnetiske felt \(59112\)](#)

Det er viktig å kjenne solas magnetfelt fordi feltlinjene knytter forbindelsen mellom aktive, forstyrrede områder. Magnetfeltet på sola skyldes hovedsaklig elektriske strømmer mellom konveksjons- og strålingssonen og disse er fortsatt ikke godt kjent. Overlagret solas mer eller mindre permanente felt opptrer intense, magnetiske unipolare områder.

Det midlere magnetfeltet for sola er  $\geq 0,05$  T. Feltet i solflekkgruppene kan bli opptil 0,5 T. Magnetfeltet på sola er mye sterkere enn jordas magnetfelt. Solas magnetfelt er mer irregulært og meget variabel.

For mer enn hundre år siden ble magnetfelt i solflekkene oppdaget ved studier av sollyset. Spektrallinjene fra atomer i et magnetfelt er splittet opp så lyset fra solflekker stråler på to forskjellige frekvenser. Dette kalles Zeeman-effekten etter Peter Zeeman som oppdaget denne effekten i 1896. Jo større splittingen er desto sterkere er magnetfeltet. Dette utnyttes til målinger av magnetfeltet på forskjellige himmellegemer. Solflekker og koronaens form viser magnetfeltstrukturen sees i figuren.



En skisse av magnetiske unipolare områder på sola.

Opphavsmann: [Narom](#)

Lyset fra en solflekk gir informasjon om både magnetfeltet og polariteten, dvs. hvor nord- og sydpolen er. Takket være nye satellitter og romfarkoster, som f.eks. Ulysses, har vi de siste tiårene fått ny kunnskap om magnetfeltet. Jfr www om Ulysses: <http://helio.estec.esa.nl/ulysses/>

En annen link: Ulysses, satellitten som forsker på solas polområder: [http://www.esa.int/export/esaSC/120395\\_index\\_0\\_m.html](http://www.esa.int/export/esaSC/120395_index_0_m.html)

Omkring år 2000 ble det publisert nye observasjoner som viste at når magnetfeltet på sola dannet en S-form, da er solaktiviteten maksimum. Både koronasløyfene og strukturen på solflekkgrupper kan illustrere slike intense magnetfelt på sola.

# Partikkelstrålingen fra sola

Forfatter: Narom

[Partikkelstrålingen fra sola \(59121\)](#)

Fra solas korona blåser det en kontinuerlig strøm av elektroner, e, protoner, H<sup>+</sup>, og alfapartikler, He<sup>++</sup>, den såkalte solvinden. Fordi temperaturen i koronaen er så høy, er elektroner løsrevet fra atomkjernene. En hver gass hvor det er frie elektroner og ioner kalles et plasma. Det finnes ingen nøytrale partikler i solvinden.

Protonene er de helt dominerende ionene, > 95 %. For denne partikkelstrålingen er koronahullene spesielt viktige. Den akselererende kraft skyldes at trykkgradienter i plasmaet er større enn gravitasjonskraftene samt at det finnes åpne feltlinjer.

Viktige parametre og egenskaper ved solvinden finnes i tabellen under.

Partikkelhastighet (radiale)	300-900 km/s
Partikkelhastighet, v (middelverdi)	400 km/s
Elektron og ionetthet ( $n_{e,i} = F/v$ )	$\approx 7 \cdot 10^6$ partikler/m <sup>3</sup>
Elektron- og protonfluks (F)	$\approx 2,5 \cdot 10^{12}$ partikler/m <sup>2</sup> s
Tiden partiklene bruker fra sola til jordbanen	$\approx 1\text{--}5$ dager
Forholdet He <sup>++</sup> / H <sup>+</sup>	$\approx 0,04$
Kinetisk energi av et proton ( $E = \frac{1}{2}m_p v^2$ )	$8 \cdot 10^{-17}$ J (= 500 eV)
Kinetisk energi av et elektron	0,25 eV
Kinetisk energifluks ( $E_p n_p$ )	$6 \cdot 10^{-10}$ J/m <sup>2</sup>
Effekten av partiklene i solvinden ( $E_p n_p$ )	$2 \cdot 10^{-4}$ W/m <sup>2</sup>
Effekten av solstrålingen (1-350 nm)	$3 \cdot 10^{-3}$ W/m <sup>2</sup>
Interplanetær magnetfeltstyrke i ekliptikkken	$\approx 5$ (3-20) nT
Nord-sydkomponent av magnetfeltet	$\approx 0\text{--}10$ nT
Magnetisk energitetthet ( $B^2/2\mu_0$ )	$2 \cdot 10^{-12}$ J/m <sup>3</sup>

Typiske middelverdier for den rolige solvinden nær jorda, dvs. i en avstand av ca. 1 AU fra sola

Opphavsmann: [Narom](#)

Koronaplasmaet er fullstendig ionisert. Dette fører til høy elektrisk ledningsevne, konduktivitet, i solvinden. Derfor blir magnetfeltet dratt med ut i det interplanetære rommet av solvindplasmaet, nesten som metalltråder. Dette magnetfeltet kalles det interplanetære magnetfelt (IMF).

Ved forstyrrelser på sola øker energien av partiklene enormt. Som eksempel kan nevnes at ved den kraftige solstormen 23. februar 1956 ble effekten av solvinden beregnet til  $10^{21}$  W. Protoner med energi opptil GeV forekommer i utbruddene. Da det er protonene som bærer hovedparten av energien, kalles slike utbrudd på sola proton events.

I forbindelse med intense solaktivitet, vil man også registrere økningen i elektromagnetisk stråling på jordas atmosfære allerede 500 sekunder etter at forstyrrelsene opptrer på sola. De mest energirike partiklene kan nå jorda innen en time. Det mer lavenergetiske plasmaet, som forårsaker nordlys og magnetiske forstyrrelser, bruker i middel et par dager på veien fra sola til jorda.

Det varme koronaplasmaet drar med seg magnetfeltet ut i det interplanetære rommet. Den kinetiske energien av plasmaet dominerer over energien til magnetfeltet. Dette påvirker det interplanetære rommet langt mer enn den elektromagnetiske strålingen.

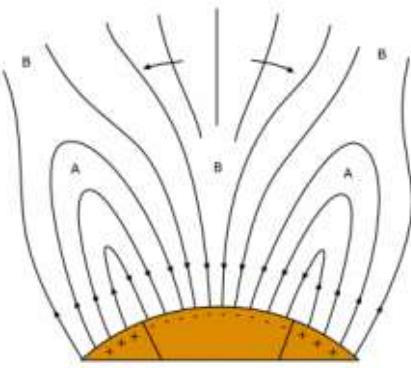


Foto: SOHO (NASA/ESA)

Koronahull

Opphavsmann: [Narom](#)

Partikler i magnetisk lukkede strukturer (områder merket A i figuren) speiles og tilføres ny energi. Vi kan ha et varmt plasma langs feltene som observeres som lysende løkker ("loops") over solranden. Trykket er høyere i de lysende områder enn i løkkenes mørke kjerne. I dette tilfellet er det magnetfeltet som bestemmer. Partikler på de åpne feltlinjene (områder merket B i figuren) vil forsvinne ut i det interplanetare rommet.

Typiske verdier for hastighet og tetthet i solvinden under rolige forhold er henholdsvis  $350 - 400 \text{ km/s}$  (dvs. solvinden er supersonisk), og  $10^7 \text{ partikler/m}^3$ , som svarer til en partikkelfluks på  $4 \cdot 10^{12} \text{ partikler/m}^2 \text{ s}$ . Da det totale antall partikler i koronaen er ca.  $10^{42}$ , betyr det at den må fylles opp på nytt i løpet av ca. en måned. Solvinden er av stor betydning for jordas øvre atmosfære, for nordlys og for magnetiske forstyrrelser som vil bli diskutert i påfølgende kapitler. Magnetfeltet i solvinden nær jorda er i middel  $10 \cdot 10^{-9} \text{ T}$ ; dvs  $10 \text{ nT}$ .

Først når solvinden er kommet ca.  $10 R_S$  fra soloverflaten, vil den kinetiske energi dominere. Da har plasmaet revet seg løs fra solas gravitasjonsfelt, og vil derfor ikke reflekteres.

# Kosmisk Stråling

Forfatter: Narom

[Kosmisk Stråling \(59126\)](#)

Stråling er transport av energi fra en strålingskilde. Kosmisk stråling er per definisjon meget energirike partikler.

Energier over  $10^{20}$  eV er påvist fra kilder utenfor jorda. Omkring 90 % av disse partiklene er protoner, mens ca. 9 % er alfapartikler, dvs. heliumkjerner, mens resten er tyngre ioner og elektroner. Den nedre energigrensen for kosmisk stråling er vanligvis satt til  $10^8$  eV. Den mest energirike kosmiske strålingen kommer fra universet, mens brorparten av partiklene i den nedre energiskalaen kommer fra sola. Fra verdensrommet kommer det en kontinuerlig strøm av partikler, men mengden av høyenergetisk kosmisk stråling er meget lav, dvs. materietetthet er bare ca.  $10^{-16}$  partikler per  $\text{m}^3$ .



En illustrasjon av hvordan man tenker seg det ser ut når kosmisk stråling treffer atmosfæren og lager partikkelskurer som av og til kan nå helt ned til bakken.

Opphavsmann: [NASA](#)

Jordas magnetfelt har evnen til å sperre inn elektriske partikler fra verdensrommet slik at intense strålingsbelter, kalt Van Allen-beltene, oppstår.

Når den kosmiske strålingen kolliderer med jordas atmosfære, genereres en rekke nye partikler (for eksempel myoner, nøytroner,  $\gamma$ -stråling, osv), som kalles sekundær kosmisk stråling. Den kosmiske strålingen varierer mye med avstanden fra jorda, og den er mest intens i polområdene fordi den påvirkes av jordas magnetfelt.

Den kosmiske strålingen er mer intens enn den elektromagnetiske strålingen fra verdensrommet.

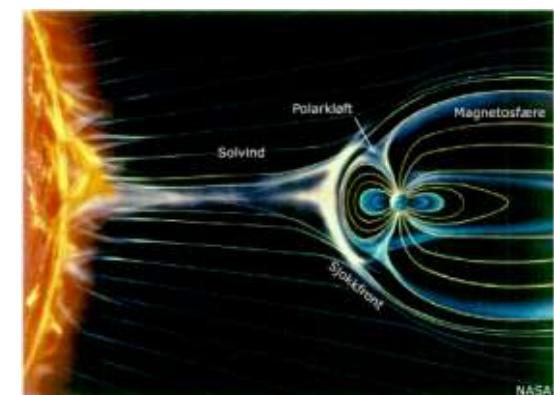
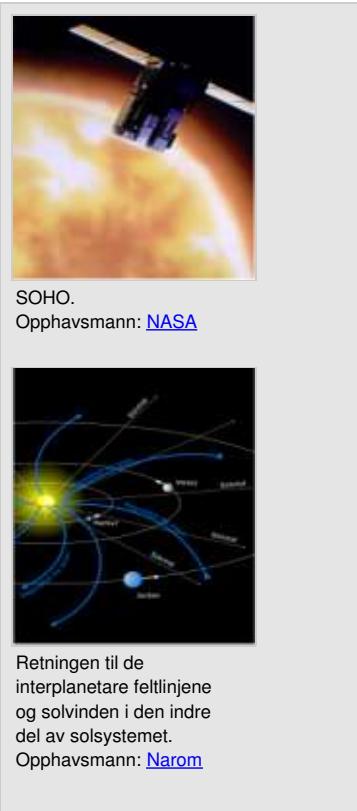
## Solvinden -- en kommunikasjonslinje mellom sol..

Forfatter: Narom

[Solvinden – en kommunikasjonslinje mellom sola og jorda \(59130\)](#)

Siden 1962 er solvinden blitt kartlagt av mange romfartøyer. Det var den amerikanske forskeren Parker som i 1965 innførte betegnelsen solvinden for dette fullstendig ioniserte plasmaet fra sola. Hele vårt solsystem ligger innesluttet i denne ekspanderende gasskyen. Oppdagelsen av solvinden fikk svært stor betydning for forståelsen av vårt nære verdensrom.

I desember 1995 ble ESA-satellitten SOHO, hvor også norske forskere har instrumenter ombord, skutt opp for å fortsette studiene av solvinden. SOHO er plassert i et av Lagrange-punktene, dvs. i et av de punktene mellom sola og jorda hvor det er gravitasjonslikevekt. SOHO ligger ca.  $1,5 \cdot 10^6$  km fra jorda og ca.  $148,5 \cdot 10^6$  km fra sola. Dette er en ypperlig plassering for studier av både solvinden og aktiviteter på sola.



Solvindens innvirkning på jordas magnetfelt. Vi ser at magnetfeltet ikke lenger er et dipolfelt, men at det er sammentrykket på dagsiden og strukket ut på nattsidén. NASA  
Opphavsmann: [Narom](#)

Fordi sola roterer om sin akse vil det interplanetare magnetfeltet (IMF) ha en spiralstruktur som vist i figuren. Ved jordas bane danner feltlinjene en vinkel på ca.  $45^\circ$  med solvinden. I de områdene på sola hvor magnetfeltet er lukket, følger plasmaet feltlinjene. Noen feltlinjer blir dratt ut mer enn 400.000 km fra soloverflaten og har bare ett fotpunkt på sola. Det er i disse områdene vi finner kildene til solvinden.

Elektronene og ionene som beveger seg langs åpne magnetfeltlinjer går tapt.

Med oppdagelsen av korona-hull fant man en sammenhengen mellom solaktiviteten og forstyrrelser i jordas atmosfære. Magnetiske stormer på jorda er nært knyttet til variasjonene i IMF. Variasjoner i den øvre atmosfæren / ionosfæren med en periode på ca. 27 dager kunne forklares. Sola roterer nemlig rundt sin egen akse med denne perioden. Derfor vil samme område på sola peke mot jorda 27, 54, 81 dager osv. senere.

Solvinden blåser tilnærmet radialt fra sola, men pga. jordas banehastighet vil det se ut som om partiklene kommer inn øst for sola. Energi-overføringen fra solvinden til jordas nære verdensrom er avhengig av solvindhastigheten og IMF-komponentene av magnetfeltet.

Solvinden kommer fra områder som kalles koronahull. Det er områder hvor partikler med høy energi transporteres bort fra sola. Koronahullene er kildeområder for solvinden og nordlyspartiklene.

# Atmosfærens sammensetning og egenskaper

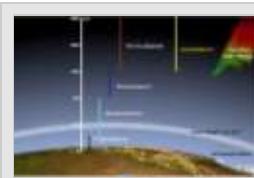
## Innledning

Forfatter: Narom  
[Innledning \(59154\)](#)

Ordet atmosfære kommer fra gresk, hvor atmos betyr damp eller gass, mens sfære er en kule. På norsk brukes også ordet luft for gassblandingene som utgjør atmosfæren. Atmosfæren er viktig og nødvendig for alt liv på jorda. Den øvre atmosfæren er grensesjiktet mot det interplanetare rommet. Takket være vinder i atmosfæren spres gassene over store områder. Atmosfæren kan i stor utstrekning rense seg selv gjennom nedbør og vinder.

Selv om vi i daglig tale omtaler gassene vi lever i for luften, skal vi i det følgende bruke det mer korrekte norske og internasjonale navnet for lufthavet, nemlig atmosfære. På grunn av ulike fysiske og kjemiske prosesser, deles atmosfæren inn i følgende tre hovedområder

- Værsenen – som har en øvre grense  $\geq 15$  km, ofte synlig markert med høye cirrusskyer
- Middelatmosfæren – som er høydeområdet mellom 15 og ca. 100 km
- Den øvre atmosfære – som er lufthavet over 100 km. Dette høydeområdet blir også kalt ionosfæren



Jordas atmosfære  
Opphavsmann: [Narom](#)

De viktigste grunnene til at vi ønsker å lære mer om atmosfæren er

- Atmosfæren er viktig og nødvendig for alt liv på jorda
- Atmosfæren absorberer den meget farlige strålingen fra verdensrommet
- Atmosfæren inneholder små ozonmengder ( $O_3$ ), karbondioksid ( $CO_2$ ), dinitrogenoksid (også kalt lystgass,  $NO$ ) og vanndamp ( $HO$ ), og disse stoffene er helt avgjørende for jordas varmebalanse og strålingsmiljø
- Takket være vinder og turbulens i atmosfæren spredes giftige gasser hurtig over store områder. Atmosfæren "renser seg selv" gjennom nedbør
- Mens atmosfæren opp til ca. 60 km er elektrisk nøytral, finnes det store mengder frie elektroner og ioner over denne høyden. Derfor kalles også den øvre atmosfæren (opp til ca. 500 km) for ionosfæren
- Den øvre atmosfæren danner overgangen, uten tydelig grense mot det interplanetare rommet
- For å forstå vekselvirkningen mellom solstrålingen og forurensing i luften

Atmosfæren er et kompleks medium som består av et stort antall forskjellige gasser. Noen av disse er meget variable både i tid og rom. Beskrivelsen som her er gitt er basert på en ren, tørr atmosfære, normalt kalt en standard atmosfære. Men aller først skal vi beskrive noen parametere og størrelser som er viktige for en detaljert diskusjon av atmosfæren.

# Fysikk i gasser - atmosfærefysikk

Forfatter: Narom

[Fysikk i gasser - atmosfærefysikk \(59170\)](#)

Atmosfærefysikk er fysikken om gasser. De brer seg utover i det volumet de får til rådighet. Gasser kan utvide seg, men også presses sammen. Luften er et godt eksempel på en gass. For å beskrive en gass er trykk, massetetthet og temperatur viktige parametere.

## Idealgass

For at ikke fysikken skal bli for komplisert, vil vi holde oss til idealiserte gasser, det vil si gasser hvor følgende sammenheng gjelder:

$$p \cdot V = k \cdot T$$

Her er  $p$  trykket,  $V$  er volumet og  $T$  er absolutt temperatur.  $p$ ,  $V$  og  $T$  beskriver tilstanden til gassen.

Denne sammenhengen mellom volumet og trykket i en avstengt gassmengde med konstant temperatur ble oppdaget av Boyle i 1662, og uavhengig av ham av Mariotte i 1683. Likningen over forteller oss at produktet av trykk og volum dividert med absolutt temperatur er konstant. Størrelsene trykk, volum og absolutt temperatur beskriver tilstanden til gassen.

Vi kan med god tilnærminge betrakte atmosfæren som en idealgass. Teoretisk tenker man seg at en idealgass består av enkeltpartikler uten utstrekning og uten tiltrekningskraft. Teorien som beskriver slike gasser, kalles den kinetiske gassteorien. Partiklene er i stadig bevegelse. Fordi antall partikler er så enormt stort, kan vi bruke statistiske middelverdier for de ulike størrelsene. Produktet av trykk og volum dividert med absolutt temperatur er konstant. Størrelsene trykk, volum og absolutt temperatur beskriver tilstanden til gassen. Ut i fra kinetisk gassteori får man ett enkelt matematisk uttrykk kalt tilstandslikningen:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

hvor  $p$  er trykket,  $N$  er antallet partikkler i gassen,  $V$  er volumet av gassen,  $T$  er temperaturen i kelvin og  $k$  er Boltzmanns konstant. Denne konstanten har samme verdi for alle gasser; dvs. den er en universalkonstant med verdi  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K. Hvis vi regner ut partikkeltettheten i gassen som  $n = N / V$  får vi:

$$p = n \cdot k \cdot T$$

## Trykk - lufttrykk

Trykk er definert som kraft ( $F$ ) per areal ( $A$ ). Trykket ( $p = F/A$ ) er en skalar størrelse som i SI-enheter måles i Newton per kvadratmeter (N/m). Denne enheten kalles pascal etter den franske fysikeren Blaise Pascal (1623 – 1662) og symboler er Pa.

En Pa er en liten enhet. Derfor bruker vi ofte kilopascal (kPa) eller megapascal (MPa =  $10^6$  Pa). En annen enhet for trykk som spesielt er mye brukt i USA er enheten bar. Bar er definert ved at 1 bar =  $1,00 \cdot 10^5$  Pa.

Tidligere har det også vært vanlig å oppgi trykk i millimeter-kvikksølv (mm-Hg). (Hg er det kjemiske tegnet for kvikksølv). Det skyldes at en av de tidligste måtene å måle trykket på var å se hvor mye kvikksølv man fikk løftet opp i et rør ved et gitt trykk. Sammenhengen mellom trykket og høyden på kvikksølvsøylen er da  $P = \rho g \Delta h$ , hvor  $\rho$  er massetettheten til kvikksølv og  $\Delta h$  er høyden på kvikksølvsøylen. Denne enheten kalles også torr etter den italienske fysikeren Evangelista Torricelli som oppfant det første barometeret. Siden gravitasjonen ikke er helt den samme overalt, og massetettheten til kvikksølv også er avhengig av temperatur er enheten torr i dag definert ut i fra Pa. Vi kan si at:

$$1 \text{ mm-Hg} \equiv 1 \text{ torr} = 1,333 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2 = 1,333 \cdot 10^2 \text{ Pa}$$

Lufttrykket ved havoverflaten angis ofte som 760 torr. Dette kalles også en standard atmosfære, som ofte forkortes til 1 atm. Målt i SI-systemet blir dette  $1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , eller 1013 hPa (hekto-Pascal). Instrumenter som måler lufttrykket, kalles som regel barometere.

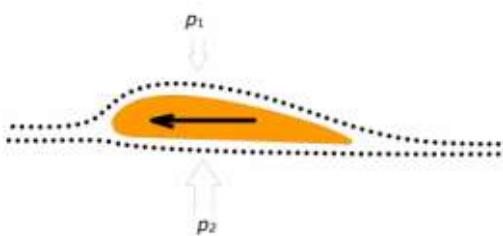
### Massetetthet

Massetettheten – med symbol  $\rho$  (gresk rho), er per definisjon masse ( $m$ ) av stoffet dividert med volumet – dvs.  $\rho = m/V$ . Hvis det ikke er fare for misforståelse, sier vi ofte bare tetthet eller densitet. SI-enheten for massetetthet er  $\text{kg/m}^3$ . Tettheten for luft ved normal trykk og null grader ( $0^\circ\text{C}$ ) er  $1,29 \text{ kg/m}^3$ . Dette er lite sammenlignet med f. eks. tettheten for en nøytronstjerne som er ca.  $10^{17} \text{ kg/m}^3$ .

### Oppdrift

Når vi holder en ballong fylt med hydrogen eller varm luft, må vi bruke en kraft nedover for at ballongen ikke skal fly til værs. Løfter vi en skoleelever må vi bruke en kraft oppover som er nesten like stor, som tyngden av eleven om han ikke skal falle til bakken. Også i atmosfæren har vi en kraft som virker oppover. Den kalles oppdrift. Oppdriften er rettet oppover, og den er lik tyngden av gassen som legemet fortrenger. Legemer med mindre tetthet enn luften stiger til værs.

Det finnes også en annen effekt som er viktig når det er store bevegelser i luften, for eksempel sterkt vind. Trykket i en gass avtar med økende hastighet av gassen. Dette kalles Bernoullis prinsipp. Dette prinsippet utnyttes i flyteknikken. Pga. formen på vingene til et fly, strømmer luften mye raskere på oversiden enn på undersiden av vingene. Trykkraften oppover på undersiden av vingene blir da større enn trykkraften nedover på oversiden. Når flyet beveger seg fort nok framover, blir forskjellen større enn tyngden av flyet. Det flyr.



Flyvingeprinsippet  
Opphavsmann: [Narom](#)

# Temperatur

Forfatter: Narom

[Temperatur \(59680\)](#)

Ved å ta på gjenstander, kjenner vi om de er varme eller kalde. Men hudfølelsen kan ikke brukes til å bestemme temperaturen på gjenstanden. Det kan bare gjøres ved å måle de fysiske årsakene til temperaturen. De første termometrene ble laget omkring 1650 i Firenze. De var fylt med alkohol. De faste punktene på skalaen var høyeste sommervarme og den kaldeste dagen i Toscana.

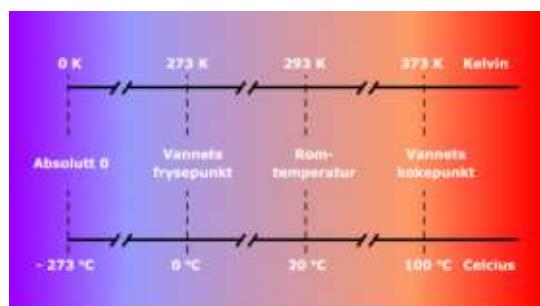
Fahrenheits termometer (fra ca. år 1700) er basert på tre faste punkter: smeltepunktet for is, temperaturen i en kuldeblanding og normaltemperaturen for et menneske. I 1730 foreslo Reamur at en skulle bruke to faste punkter – smeltepunktet for is og kokepunktet for vann. Celsius foreslo i 1742 at avstanden mellom disse to punktene skulle være 100 grader. Temperaturen bestemmes ved å måle hvordan væsker eller gasser forandrer volum når de blir varmet opp. Sammenhengen mellom Fahrenheit og Celsius grader er:

$$T^{\circ}\text{F} = T^{\circ}\text{C} \cdot \frac{9}{5} + 32$$

Temperaturen er et mål for den gjennomsnittlige kinetiske energien til atomene og/eller molekylene i legemet. I atmosfæren opp til ca. 100 km kan man med god tilnærming anta termodynamisk likevekt, dvs. alle partiklene har samme temperatur. Høyt oppe i atmosfæren er det mer komplisert. Da må vi skille mellom temperaturen til elektronene, ionene og de nøytrale partiklene. De har alle ulik kinetisk energi.

I naturvitenskap brukes ofte kelvinskalaen (K). Det absolute nullpunkt  $T_0$  – også kalt null kelvin – er den lavest tenkelige temperatur – dvs.  $0\text{ K} = -273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I dette læreverket skal vi bruke  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  for  $T_0$ . Det absolute nullpunktet oppstår når den kinetiske energien blir null. I praksis er det ikke mulig å komme helt ned til denne temperaturen. Fordi det ikke er noen øvre grense for kinetisk energi, er det heller ingen øvre grense for temperatur. Sammenhengen mellom absolutt temperatur og  $^{\circ}\text{C}$  er gitt ved

$$T^{\circ}\text{K} = 273 + T^{\circ}\text{C}$$



Sammenligning mellom kelvin og celsiusgrader

Opphavsmann: [Narom](#)

## Temperatur og indre Energi

Partiklene i atmosfæren er aldri ro. I faste stoffer kan atomene og molekylene vibrere, mens i væsker og spesielt i gasser kan partiklene bevege seg fritt. Et uttrykk for den indre kinetiske energien til et stoff er temperaturen. Økt partikelbevegelse betyr økt indre kinetisk energi.

For den kinetisk energien til en partikkel kan vi bruke likning

$$\text{E}_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Det er viktig å være oppmerksom på at i gasser og væsker har partikler forskjellig fart og deres bevegelsesretning er tilfeldig. Når partiklene støter sammen endrer de retning og overfører energi. Bruker vi likningen på gasser står  $m$  for molekylmassen,  $v$  for den gjennomsnittlige molekylfarten og  $E_k$  for middelverdien av molekylenes kinetiske energi. Fra kinetisk gasstetri finner man at den indre energien i en gass kan uttrykkes ut fra temperatur som:

$$\text{E}_k = \frac{3}{2} N k T$$

der  $N$  er antall partikler i gassen. Ved den samme temperaturen har alle stoffer den samme gjennomsnittlige indre kinetiske energi. Det betyr at lette molekyler har høyere fart enn tunge molekyler.

Når den kinetiske energien til molekylene øker, øker også temperaturen. Temperaturen er knyttet til molekylenes uordnede bevegelse. Jo høyere  $T$ , desto mer energi har partiklene. Fordi det ofte er vanskelig å avgjøre hvorfor  $T$  øker, bruker vi begrepet indre energi. Den indre energien er lik summen av kinetisk og potensiell energi.

### Fordypning: Indre energi

I kombinasjon med en annen formel for den indre kinetiske energien får vi et uttrykk som gir oss sammenhengen mellom molekylenes masse  $m$ , molekylenes gjennomsnittsfart  $v$  og temperaturen  $T$ :

$$\text{E}_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$$

$E_k$ : gjennomsnittlig kinetisk energi til et molekyl,  $m$ : molekylmasse,  $v$ : gjennomsnittlig molekylfart,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K (Boltzmannkonstanten)  $T$ : absolutt temperatur.

### Eksempel: Gjennomsnittsfart til molekyler

Hvilken gjennomsnittsfart har nitrogenmolekyler ved 20 °C? Et N<sub>2</sub>-molekyl har massen 28 u. (1u = 1,66 · 10<sup>-27</sup> kg)

Svar:  $m=28 \text{ u} = 28 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 4,65 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ ,  $T=(20+273) \text{ K}=293 \text{ K}$

$$\begin{aligned} \text{E}_k &= \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T \\ \text{v} &= \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}}{4,65 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}} \cdot 293 \text{ K} = 510 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Gjennomsnittsfarten til nitrogenmolekylene er 510 m/s. Til sammenlikning har vind med stormstyrke en fart på minst 22 m/s.

### Eksempel: Indre og ytre kinetisk energi

a) Hvor stor er den ytre kinetiske energien i 1 kg N<sub>2</sub> som beveger seg med 30 m/s?

b) Hvor stor er den indre kinetiske energien i 1 kg N<sub>2</sub> ved 20 °C? 1 kg N<sub>2</sub> inneholder  $2,15 \cdot 10^{25}$  molekyler.

Svar:

a)

$$\$ \$ E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ kg} \cdot (30 \text{ m/s})^2 = 450 \text{ J} \$ \$$$

Den ytre kinetiske energien er 450 J.

b) Når vi betegner N som antall molekyler er den indre kinetiske energien

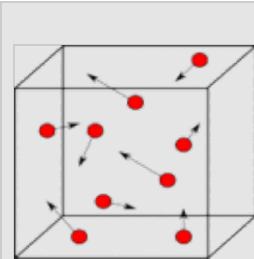
$$\$ \$ E_k = \frac{3}{2} N k T = \frac{3}{2} \cdot 2,15 \cdot 10^{25} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 293 \text{ K} \$ \$$$

$$\$ \$ = 130000 \text{ J} \$ \$$$

eller

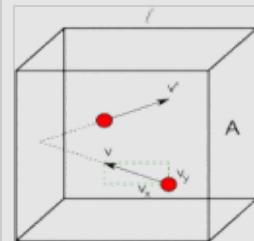
$$\$ \$ E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ kg} \cdot (510 \text{ m/s})^2 = 130000 \text{ J} \$ \$$$

Vi ser at den indre kinetiske energien her er atskillig større enn den ytre kinetiske energien, selv når det blåser med storm styrke.



Ideell gass i en kubisk boks.

Opphavsmann: [Narom](#)



Partikkelenbevegelse i boksen.

Opphavsmann: [Narom](#)

### Fordypning: Utledning av uttrykket for indre energi

Vi tenker oss at vi har en ideell gass i en kubisk boks hvor sidene har lengde  $\ell$  og arealet på sideflatene er  $A = \ell^2$ . (Se figurene.)

Hvis en partikkel treffer en av sideflatene vil den dytte med en kraft  $F$  på veggen. I henhold til Newtons 3. lov må da veggen virke tilbake på partikkelen med en motsatt rettet like stor kraft og partikkelen blir reflektert. Hastighetene som partikkelen har hatt inn mot veggen kan vi kalle  $-v_x$ . Etter kollisjonene er den endret til  $v_x$ . Endringen i bevegelsesmengde blir da:

$$\$ \$ \Delta p = \Delta (mv) = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x \$ \$$$

Tiden det tar mellom hver gang partikkelen treffer den veggen er:

$$\$ \$ \Delta t = \frac{2\ell}{v_x} \$ \$$$

Kraften på veggen fra denne ene partikkelen blir da

$$\$ \$ F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2mv_x \cdot v_x}{2\ell} = \frac{mv_x^2}{\ell} \$ \$$$

For å finne den totale kraften på sideflaten må man summere over alle partiklene i boksen. Da får man at:  
 $\sum F = \frac{m}{N} \sum v_x^2 = \frac{m}{N} \overline{v_x^2}$

hvor  $\overline{v_x^2}$  er gjennomsnittet av hastigheten i x-retning kvadrert,  
og  $N$  er antallet partikler. Partiklene kan bevege seg i tre dimensjoner, og vi kan anta at gjennomsnittshastigheten er den samme i alle  
retninger, slik at:  
 $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3 \cdot \overline{v_x^2}$

Da blir  
 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$

Og vi kan skrive uttrykket:  
 $\sum F = \frac{1}{3} N m \overline{v^2}$

Trykk er jo definert som kraft delt på areal slik at  
 $P = \frac{\sum F}{A} = \frac{1}{3} \frac{N m \overline{v^2}}{V} = \frac{1}{3} \frac{N m \overline{v^2}}{V}$

Hvis vi nå bruker den ideelle gass loven:  $PV=NkT$  får vi:  
 $\frac{1}{3} \frac{N m \overline{v^2}}{V} = NkT$

Som er et uttrykk for den totale kinetiske energien i gassen. Dette kan nå skrives om til  
 $\frac{1}{2} N m \overline{v^2} = \frac{3}{2} NkT$

Slik at vi får sammenhengen  
 $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$

# Atmosfærrens sammensetning opp til ca. 100 km

Forfatter: Narom

[Atmosfærrens sammensetning opp til ca. 100 km \(59284\)](#)

For å kunne beskrive atmosfærrens fysiske og kjemiske egenskaper må vi kjenne sammensetningen, temperaturen, trykket, tettheten eller konsentrasjonen som funksjon av høyden.

Nær jorda opptrer samtlige gasser i molekylær form. Atmosfæren inneholder en rekke forskjellige gasser hvorav nitrogen og oksygen dominerer helt. De utgjør mer enn 99 % av hele atmosfæren. Dog er det viktig å være oppmerksom på at selv gasser som bare utgjør promiller i den totale atmosfæren, er viktige for livet på jorda.



Partikkeltetthet i atmosfæren / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/59294>

De dominerende atmosfæregassene opptrer i et konstant forhold, mens flere av de små gassene (som utgjør mindre enn 0,05 % av det totale volum) er meget variable. Som eksempel kan nevnes vanndamp,  $H_2O$ , som varierer mye med både årstid og breddegrad. Ved ekvator kan vanndampen noen ganger utgjøre 4 % av alle luftmolekylene, mens den ved polene vinterstid bare er 0,00001 %. Det er også en varierende mengde skyer i atmosfæren. Det kan, som vi alle har opplevd være store, lokale variasjoner i atmosfæren. Den er jo meget dynamisk fra fint vær til kraftige stormer og uvær.

I vår beskrivelse av atmosfæren brukes en standardmodell, dvs. en ren, tørr atmosfære som en middelverdi for hele jorda. For de gassene hvor volumprosenten er  $\ll 1\%$  angis konsentrasjonen som antall molekyler pr. million, ppm (fra engelsk; "parts per million"; dvs.  $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ ) eller endog som antall pr. milliard, ppb ("parts per billion";  $1 \text{ ppb} = 10^{-9}$ ). Sammensetningen av luften i en standard atmosfære er gitt i tabellen under. Det finnes nesten 1000 små gasser i atmosfæren utover dem som er oppført tabellen, men de som er nevnt der er de viktigste.

Type gass	Kjemisk formel	Volumandel av luften	Massantenn	Skalhøyden (m)
Konsistente gasser	Nitrogen	$N_2$	78,08%	18,027
	Oksygen	$O_2$	20,99%	1674,95
	Argon	$Ar$	0,93%	74,36
	Sonne	$Ne$	0,02 ppm	$1,2 \cdot 10^{11}$
	Helium	$He$	0,2 ppm	$7,24 \cdot 10^{-6}$
	Krypsos	$Kr$	1,14 ppm	$3,3 \cdot 10^{-4}$
	Natrium	$Xe$	0,01 ppm	$5 \cdot 10^{-4}$
Variable gasser	Vanndamp	$H_2O$	0,00001 – 4%	$\approx 2,5 \cdot 10^{-2}$
	Karbonatenkild	$CO_2$	≈ 390 ppm	≈ 3,11
	Methan	$CH_4$	≈ 1,8 ppm	$1,1 \cdot 10^{-2}$
	Lysgas	$N_2O$	≈ 0,31 ppm	$0,3 \cdot 10^{-2}$
	Osos	$O_3$	≈ 0,4 ppm	$0,8 \cdot 10^{-4}$
	Karbonmonoksid	$CO$	≈ 0,69 ppm	–
	Klofase/ karbondioksid	$SO_2$	≈ 0,00002 ppm	–

\*De  $CO_2$  mängn i lufta varierar, se tabellen av  $CO_2$  mängd på sannolikhet om på innen. Konsentrasjonen øker med ca 0,4 % pr år og har økt med mer enn 40 % siden år 1990.

Atmosfærrens sammensetning  
Opphavsmann: [Narom](#)

## Hvor mye luft er der i atmosfæren?

Forfatter: Narom

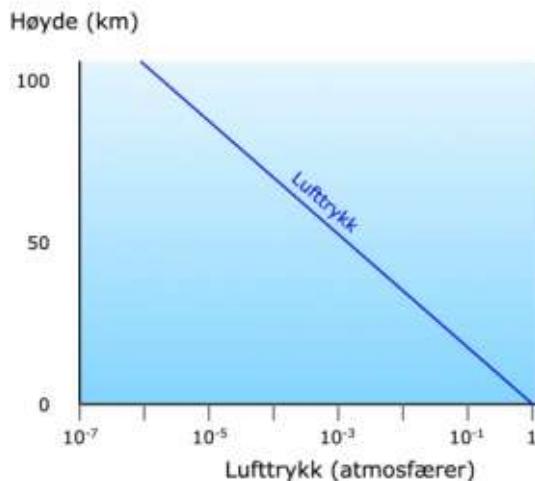
[Hvor mye luft er der i atmosfæren? \(59322\)](#)

Sett i global målestokk er atmosfæren meget tynn og begrenset. På fjell høyere enn 4000 meter merker man at det er vanskelig å puste. Over 6 km må man ha luft med seg, ofte ren oksygen. I fly 13 km over bakken har man 80 % av luften under seg. Lufttettheten avtar hurtig med høyden.

Hvis vi tenker oss hele atmosfæren presset sammen til samme trykk og temperatur som vi har ved bakken, ville høyden av hele atmosfærerlaget bare være 8 km. Med hensyn til tyngde tilsvarer dette et vannlag på  $\approx 10$  m eller et granittlag på ca. 3,5 m.

Hundre kilometer over bakken er luften ekstremt tynn fordi ca. 99,99 % av atmosfæren da er på undersiden. Derfor kan man lese mange steder at atmosfæren bare når ut til 100 km, men dette er ikke riktig. Selv om luften 100 km over bakken er meget tynn finnes det fortsatt  $10^{18}$  (et nesten uendelig stort tall) molekyler per kubikkmeter.

Massen av all luft som finnes i atmosfæren er ca.  $5 \cdot 10^{18}$  kg eller  $5 \cdot 10^{15}$  tonn.



Lufttrykket avtar tilnærmet eksponensielt med høyden.

Opphavsmann: [Narom](#)

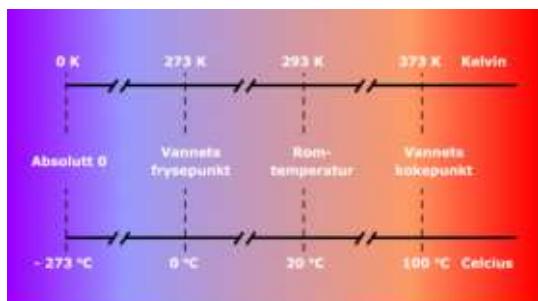
# Atmosfærens høydeinndeling basert på temperatu..

Forfatter: Narom

[Atmosfærens høydeinndeling basert på temperatur \(59327\)](#)

Temperatur er et mål på indre kinetisk energi, dvs. molekylenes bevegelsesenergi i en gass. Jo mer energi, jo høyere temperatur. Fordi vår atmosfære – selv om den består av forskjellige gasser, er praktisk talt homogen opptil ca. 100 km, kan vi bruke en middeltemperatur for atmosfæren. At atmosfæren er homogen betyr at den består av de samme gassene i samme innbyrdes volumforhold.

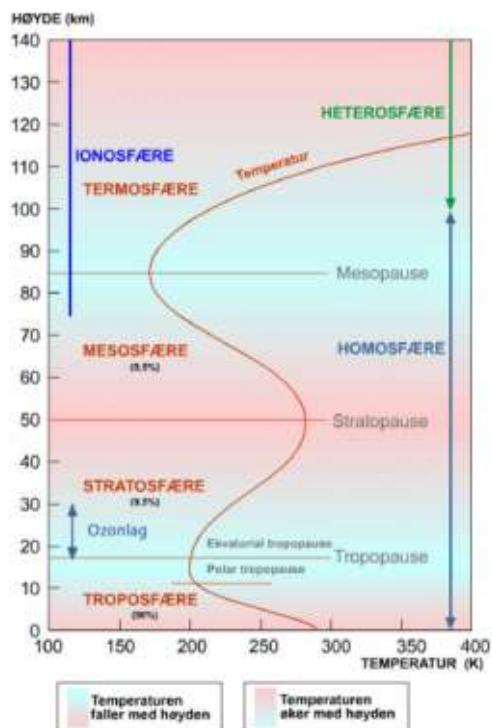
Figuren nedenfor viser en sammenligning mellom temperaturskalaene kelvin (K) og celsius (C). Forbindelsen mellom dem [har vi sett på tidligere](#).



Sammenligning mellom kelvin og celsiusgrader

Opphavsmann: [Narom](#)

Basert på temperaturen kan atmosfæren - som vist i figuren under, deles inn i tilnærmet konsentriske, sfæriske skall (høydeområder). Skallene er skilt fra hverandre ved mer eller mindre markante variasjoner i temperatur. Det bør påpekes at grensene mellom de forskjellige høydeområdene kan være temmelig flytende. Høydeintervallene mellom skallene kalles pauser. En kort omtale av de forskjellige lagene er gitt i det følgende.



Atmosfærens lagdeling basert på temperatur

Opphavsmann: [Narom](#)

Troposfæren

Troposfæren, eller værsonen, strekker seg opp til ca. 15 km. I denne sonen avtar temperaturen nesten uniformt med  $6,5^{\circ}\text{C}$  per kilometer. På grunn av vind og turbulens (konveksjon) er troposfæren i konvektiv likevekt med jorda. Via vertikale bevegelser i luften avtar temperaturen fra den varme jorda - som er blitt oppvarmet av sola. Tropopausen finnes mellom ca. 10–18 km – det avhenger litt av hvor på jorda en er. Ca. 90 % av luften finnes i troposfæren. Noen få ganger hender det at temperaturen er høyere ved, for eksempel 1000 m over havet, enn ved jordoverflaten. Dette kaller vi temperaturinversjon.

### Stratosfæren

Stratosfæren - hvor omkring 9,5 % av atmosfæreremassen finnes, strekker seg fra ca 15 til 50 km. I dette laget øker temperaturen markant med høyden. Dette skyldes at hovedparten av solas farlige UV-stråling absorberes av ozon. Ozonlaget har nemlig maksimal tetthet i stratosfæren. Fordi stratosfæren er meget stabil (strato er latin for stratified/lagdelt), kan både gasser og støvpartikler som kommer inn i dette høydeområdet oppholde seg her i mange år.

### Mesosfæren

I mesosfæren mellom ca. 50 og 90 km avtar temperaturen markert. Den laveste temperatur i atmosfæren - under minus  $130^{\circ}\text{C}$ , finner man i mesopausen. Mesosfæren inneholder mindre enn 0,5 % av den totale atmosfæreremassen. I 80 km høyde er tettheten bare 1/100.000 av tettheten ved bakken. Det er også i dette området at meteorene brenner opp, og vi ser dette som klare stjerneskudd. I mesosfæren finnes det natriumioner fra meteorspor. At temperaturen her synker med økende høyde skyldes varmetap pga. infrarød stråling som reflekteres tilbake til verdensrommet.

Høydeområdet mellom ca. 15 og 100 km er også kalt middelatmosfæren. Selv om denne delen av atmosfæren ligger nær jorda, er den lite kjent. Det er fortsatt vanskelig å få pålitelige målinger over ca. 40 km. Fordi våre kunnskaper om middelatmosfæren er så begrenset er dette høydeområdet også blitt kalt "The Ignorance sphere".

### Termosfæren

I termosfæren – over 90 km, øker temperaturen hurtig med høyden (opptil  $20^{\circ}\text{C/km}$ ) til den når en tilnærmet konstant verdi på om lag  $1500\text{--}2000\text{ K}$  nær 200 km. Også over 200 km er temperaturgradienten positiv, men økningen er mye mindre enn omkring 100 km. Fordi tettheten er så lav, skal det ikke mye energi til for å øke temperaturen. Oppvarmingen skyldes absorpsjon av solstråling – spesielt i røntgen (X) og UV-båndet ( $\lambda < 170\text{ nm}$ ). Den lave lufttettheten fører til at det ikke er termodynamisk likevekt. Temperaturen for dette høydeområdet blir dermed mer komplisert.

Luftens sammensetning og egenskaper forandres radikalt over ca. 100 km. Vi får en gradvis overgang fra molekyler til atomer. I tillegg er det nye fysiske prosesser som opptrer. Selv om mengden av luft over 100 km er prosentvis meget liten, spiller dette høydeområdet en viktig rolle.

## Barometerformelen - Hvordan varierer trykket o..

Forfatter: Narom

[Barometerformelen - Hvordan varierer trykket og tettheten i en isoterm, homogen, nøytral atmosfære? \(59330\)](#)

På grunn av vinder og turbulens er atmosfæregassene blandet i et tilnærmet konstant forhold opp til ca. 100 km. Dette høydeområdet kalles for homosfæren. Den midlere molekulære massen for atmosfæren i dette området er tilnærmet lik 29 u. Dette får man ved å ta med følgende atommassebidrag: 78/100 av [N<sub>2</sub>], 21/100 av [O<sub>2</sub>] og 1/100 av Ar. Dette betyr at i enhver luftprøve med for eksempel en million partikler, tatt mellom jordoverflaten og ≈ 90 km høyde, er antallet N, O, Ar osv. konstant. Dette er ikke tilfelle med de variable gassene, men de utgjør <0,1%.

Fordi atmosfæren opptil ca. 100 km er tilnærmet homogen, kan vi bruke likningene for en idealgass for å regne ut hvordan trykket og tettheten varierer med høyden. Trykket er en viktig parameter for å angi hvor mye atmosfære som finnes i forskjellige høyder. Fordi luften ikke faller til jorda – som et eple, må det finnes krefter som er like store og motsatt rettet vekten av luften. Lufttrykket i et hvilket som helst punkt er et mål for vekten av luften over punktet. Trykket oppover balanserer gravitasjonskraften. Om trykket var mindre ville luften bli sammentrykt. Vekten av hele atmosfæresøyle er lik vekten av et ca. 10 meter tykt vannlag. Dette betyr at atmosfæren trykker på oss mennesker. Om vi antar at vår overflate er ca. 0,5 m<sup>2</sup> – er trykket på 5 tonn. Vi merker praktisk talt ikke dette trykket fra atmosfæren fordi vår kropp har et mottrykk som er like stort.

Vi skal bruke figuren (se bildet) – som viser en enkel statisk atmosfærmodell (dvs. ingen bevegelser) – til å utlede hvordan trykket og tettheten varierer med høyden i en isoterm atmosfære med fullstendig blanding; dvs. i homosfæren.

### Skalahøyden

Vi innfører nå skalahøyden,  $H$  - som er en viktig parameter for diskusjoner av alle atmosfærer:

$$\$H = \frac{k}{\tilde{m}} T g \$$$

hvor  $\tilde{m}$  = den midlere molekulære masse og  $g$  = tyngdens akselerasjon.

Den fysikalske betydning av  $H$  er følgende. Om atmosfæren presset sammen slik at tettheten er konstant og har samme verdi som ved jordoverflaten, så angir  $H$  hvor mye luft det er i atmosfæren. Fra likningen kan vi se at om hele atmosfæren trykkes sammen til samme trykk som ved bakken, vil høyden på laget bare være ca. 8 km. Ved å summere tykkelsen av de forskjellige gassene i atmosfæren ved normalt trykk og temperatur får vi de verdiene for skalahøyden som er oppgitt i tabellen [på denne siden](#).

### Barometerformelen

Trykket som funksjon av høyden er gitt ved:

$$\$p(h) = p_0 e^{-h/H} \$$$

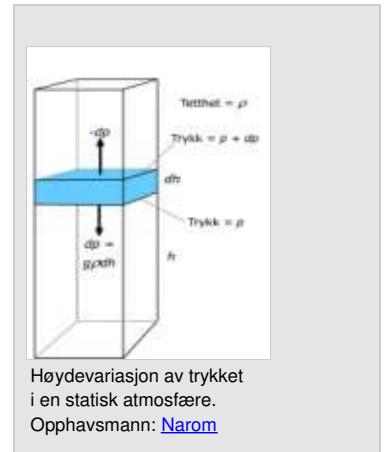
Ligningen, som også kalles barometerformelen, viser at trykket i homosfæren avtar eksponentielt med høyden opp til ca. 100 km.

Skalahøyden for tetthet er gitt ved

$$\$n = \frac{n_0}{e^{h/H}} \$$$

Fra denne likningen får vi – på samme måte som for trykket – at

$$\$n = n_0 e^{-h/H} \$$$



Fra likningene kan vi konkludere at både trykk og tettheten av partikler i atmosfæren avtar eksponentielt med høyden. Dette betyr at hver gang vi flytter oss en skalahøyde opp i atmosfæren har tettheten og trykket minsket med  $1/e$ ; dvs med  $1/2,7$ , det vil si en tilnærmet halvering hver 5. kilometer. I en isoterm atmosfære er skalahøyden for trykk lik skalahøyden for tetthet, dvs.  $H_p = H_n$ . Skalahøyden angir således den økning i høyde som er nødvendig for at trykket skal reduseres med 2,7.

Om vi setter inn for konstantene i likning får vi følgende verdi for skalahøyden:

$$\frac{H}{T} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}}{4,8 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} \approx 8000 \text{ m}$$

### Fordypning: Utledning av $1/H$

$$\frac{1}{H} = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial h} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial h} + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial h}$$

Lufttrykket avtar tilnærmet eksponentielt med høyden opp til ca. 100 km. Over 100 km avtar trykket langsommere. Trykket ved 100 km er derfor bare en ti-milliontedel av hva det er ved jordoverflaten; dvs.  $p_{100\text{km}} = 10^{-7} p_0$  eller  $1/10.000.000$  av  $p_0$ . Likevel er det omkring  $10^{18}$  molekyler per kubikkmeter i denne høyden. Ved jordoverflaten er tettheten  $10^{25}$  partikler per  $\text{m}^3$ . Det totale antall partikler i hele vår atmosfære er beregnet til ca.  $10^{44}$  (et ufattelig stort tall; dvs. ett 1-tall med 44 nuller bak). Fordi tettheten avtar så raskt med høyden kan vi ikke oppholde oss lenge over ca. 5000 m uten å ha med ekstra oksygen.

De variable gassene med liten andel som f. eks.  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  osv. varierer markert med høyde, breddegrad og årstid. Men fordi tettheten er så lav, vil de ikke vesentlig forandre den konstante molekylære massen i homosfæren.

### Fordypning: Utledning av barometerformelen

Vi betrakter et element i luftsøylen, i høyde  $h$ , med tetthet  $\rho$ . Tetthet er per definisjon massen av gassen pr. volumenhett, dvs.  $\text{kg/m}^3$ . Arealet  $A$  (dvs. tverrsnittet av luftsøylen) er  $1 \text{ m}^2$  og høyden av elementet er  $dh = \Delta h$ . I en statisk atmosfære ligger luftelementet i ro fordi trykket og tyngden er like store og motsatt rettet. Variasjonen i trykket over høyden  $\Delta h = dh$  er  $\Delta p = dp$ .

Massen ( $m$ ) av volumelementet i høyden  $h$  er

$$m = \rho \cdot A \cdot h = g \cdot n \cdot A \cdot h \quad \text{hvor } g = \text{tyngdens akselerasjon}, \quad n = \text{antall molekyler av gassen pr. } \text{m}^3, \quad \text{mens } \bar{m} \text{ er den midlere molekylære masse.}$$

Videre har vi at

$$\rho = \sum_i n_i \cdot m_i = n \cdot \bar{m}$$

hvor  $i$  refererer til de forskjellige gassene i atmosfæren. Ved likevekt har vi at

$$p = -g \cdot n \cdot \bar{m} \cdot h$$

Vi får minus fordi trykket avtar med høyden, mens  $h$  er positiv oppover. Tyngdens akselerasjon  $g$  avtar med høyden, men opptil 100 km er variasjonen så liten at vi kan bruke verdien ved jordoverflaten som er  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Om vi dividerer ligningen med  $p$  og bruker tilstandsligningen for en ideell gass,  $P = n k T$ , får vi:

$$\frac{p}{P} = e^{-gh/\bar{m}}$$

og  $h = 0$ ) og høyden  $h$ . Hvis vi setter inn skalahøyden  $H = kT\tilde{m} g$  og integrerer får vi  $\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -\frac{1}{H} \int_0^h dm$ . Fordi vi har antatt en isoterm atmosfære er skalahøyden tilnærmet konstant; dvs.  $\tilde{m}$ ,  $g$  og  $T$  er konstante. Vi får da barometerformelen:  $p(h) = p_0 e^{-h/H}$

# Atmosfæren over 100 km

Forfatter: Narom

[Atmosfæren over 100 km \(59413\)](#)

Ved ca. 100 km går et viktig skille i atmosfæren. Under denne høyden har vi et doméne der vind, bølger og turbulens sørger for en effektiv blanding av atmosfæriske gasser slik at den midlere molekylære masse varierer lite med høyden. Over 100 km vil blandingsprosessene ikke lenger være effektive. Vi får her en prosess (diffusiv likevekt) der de lette gassene flyter opp. Skillet mellom de to doméner kan være skarpt og kalles turbopausen.

I følge barometerformelen avtar trykket eksponentielt med høyden, men denne likningen kan ikke brukes over 100 km. Over denne høyden øker temperaturen raskt mens den midlere molekylære vekt avtar. Grunnen til at temperaturen øker så hurtig mellom 100 og 150 km –  $\approx 20^\circ$  pr. kilometer skyldes absorpsjon av ultrafiolett lys fra sola. Dette fører igjen til spalting av alle molekylene til atomer. Vi har reaksjoner av typen

$$\$ \$ \mathrm{X}_2 + hf \rightarrow \mathrm{X} + \mathrm{X} \$ \$$$

hvor  $\mathrm{X}_2$  kan være  $\mathrm{N}_2$ ,  $\mathrm{O}_2$ , osv. For at prosessen skal finne sted må bølgelengde av UV-lyset ( $\lambda$ ) være mindre enn ca. 250 nm. Temperaturen i en standard atmosfære øker til ca 1500–2000 K ved 200 km. En annen viktig fysisk prosess over 100 km er diffusjon. Fordi trykket i luften er så lavt vil tettheten av hver gass avta med høyden i henhold til deres masse og temperatur. De lette atomene strømmer ut i verdensrommet. Dette betyr at man finner de letteste gassene – dvs. hydrogen og helium – lengst borte fra jorda.

Noen karakteristiske egenskaper ved atmosfæren over 100 km er oppført i tabellen under. Området over homosfæren er karakterisert ved at den midlere massen av gassen avtar med høyden. Mens den fortsatt er  $\approx 29$  u ved 90 km har den avtatt til ca. 15 u ved 500 km. I heliosfæren over 1000 km er det helium som er den viktigste gassen.

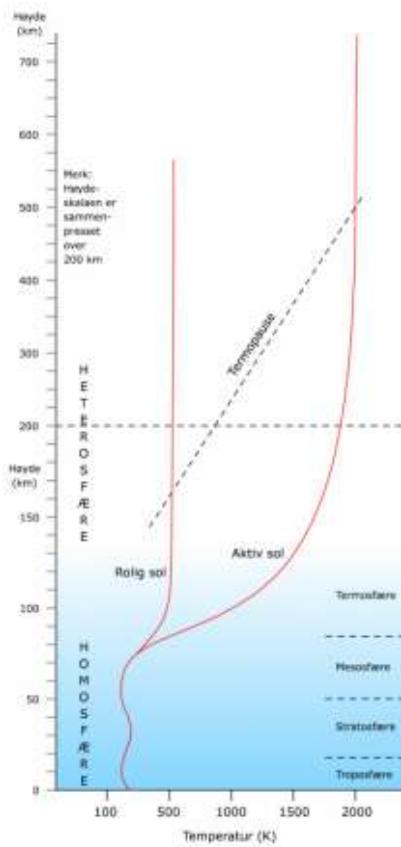


Høyde $h$ [km]	Trykk $p$ [mm Hg]	Temperatur $T$ [K]	Midlere molekylmasse i luft $\bar{m}$ [u]	Skalatydde <sup>a</sup> $H$ [km]	Tetthet $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
50	0,8	250	29,0	8	$1,1 \cdot 10^{-8}$
100	$1,0 \cdot 10^{-4}$	200	27,0	3	$3,7 \cdot 10^{-7}$
150	$4,3 \cdot 10^{-6}$	700	24,0	20	$2,0 \cdot 10^{-9}$
200	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1100	22,0	45	$3,6 \cdot 10^{-10}$
300	$1,9 \cdot 10^{-9}$	1900	18,0	60	$5,7 \cdot 10^{-11}$
500	$1,2 \cdot 10^{-9}$	1600	15,0	70	$2,2 \cdot 10^{-12}$
1000	$1,0 \cdot 10^{-9}$	1400	6,0	100	$1,0 \cdot 10^{-13}$

<sup>a</sup>Skalatydde er her rapportert ved ulike høyder over jordoverflaten.

Karakteristiske parametre for en standard atmosfære

Opphavsmann: [Narom](#)

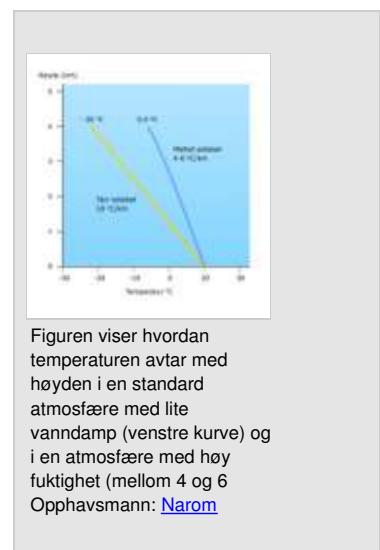


Tetthet og temperatur over 100 km varierer mye med aktiviteten på sola.

Opphavsmann: [Narom](#)

Fra rakett- og satellittmålinger har man funnet at atmosfæren under ca. 500 km inneholder lite helium (He). He produseres kontinuerlig ved jordoverflaten. Grunnen til at det finnes så lite He i den laveste del av atmosfæren kan skyldes at de lette He-atomene forlater jorda. Om He-atomene skal forlate jorda, må de ha en hastighet  $\geq 11,2$  km/s – som kalles kritisk hastighet  $v_0$  eller unnslipningsfart.

Kritisk hastighet er en fundamental størrelse i romvirksomhet. Skal en satellitt kretse rundt jorda, må sluthastigheten være mindre enn 11,2 km/s. Skal den forlate jorda må hastigheten være større enn 11,2 km/s.



Figuren viser hvordan temperaturen avtar med høyden i en standard atmosfære med lite vanndamp (venstre kurve) og i en atmosfære med høy fuktighet (mellom 4 og 6 g H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>). Opphavsmann: [Narom](#)

## Fordypning: En adiabatisk atmosfære

En adiabatisk prosess er en prosess som foregår uten varmeutveksling (dvs. uten tap eller økning av varme) med omgivelsene. Adiabatiske prosesser er viktige for å diskutere hvordan en del av luften transportereres fra et område til et annet i løpet av en kort tid, uten varmeutveksling med luften som ligger i nærheten. Da kan man ha adiabatisk utvidelse eller sammentrykning av luften.

Vi skal her konsentrere diskusjonen til Boyles lov og adiabatisk temperaturgradient (adiabatic lapse rate).

Boyles lov er gitt ved

$$p_0 V_0 = p_1 V_1$$

hvor  $V$  = gassens volum og  $p$  = trykk, mens indeksene refererer til forskjellige trykk. Loven gjelder så lenge temperaturen er konstant. Loven viser at når trykket i gassen forandrer seg så vil volumet automatisk variere slik at produktet  $p \cdot V$  = konstant.

Likningen følger direkte fra tilstandslikningen for ideelle gasser

$$p \cdot \frac{V}{T} = \text{konstant}$$

når temperaturen er konstant.

For å finne hvordan temperaturen varierer med høyden i en adiabatisk prosess i atmosfæren bruker man formelen

$$\frac{\Delta T}{\Delta h} = \frac{dT}{dh} = -\frac{g}{C_p}$$

hvor  $\Delta T/\Delta h = dT/dh$  = den vertikale temperaturgradienten,  $g$  = tyngdens akselerasjon, mens  $C_p$  = varmekapasiteten ved konstant trykk. Som tidligere nevnt er  $g$  tilnærmet konstant innenfor homosfæren. Også gassens varmekapasitet er nesten konstant i troposfæren.

Praktisk erfaring med en sykkelpumpe viser betydningen av likningen. Når vi bruker pumpen til å øke lufttrykket i sykkelslangen, kjenner vi at pumpen blir varm. Vi må øke trykket i pumpen for å få luften gjennom ventilen. Luften blir altså oppvarmet når den blir presset sammen. Det omvendte er også tilfelle. Dersom luften får utvide seg, vil den bli avkjølt.

Takket være kraftig omrøring på grunn av vinder og turbulens vil vi ha en adiabatisk gradient, et temperaturfall, i troposfæren på nær minus 10° C pr. km. Dette gjelder en tørr atmosfære. Ved økende fuktighet vil temperaturfallet bli mindre. Verdien på ca. 6,5°C per km i figuren til høyre er en middelverdi for jorda fordi det alltid er litt vanndamp i atmosfæren.

### Fordypning: Utledning av formel for lufttettheten

Den termiske energien ( $E$ ) av et molekyl er gitt ved

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$$

hvor den fysiske konstanten  $k$  = Boltzmanns konstant og  $m$  = molekylets masse. Fra denne likningen får vi

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Likningen viser at molekyler med liten masse får mye større fart enn molekyler med stor masse, når temperaturen er lik. Når temperaturen øker, vil også hastigheten øke. Ved normale temperaturer gir dette en hastighet for He-atomet på ca. 1,2 km/s, mens den for O<sub>2</sub>-molekylet er ca. 0,5 km/s. For *T*-verdier nær 2000 K vil noen få av de lette He-atomene – om vi antar en normal hastighetsfordeling – nå opp til kritiske hastigheter. En slik høy *T* forekommer ofte ved stor solaktivitet. I løpet av lange tidsrom (geologiske tidsrom) vil partikler slippe ut fra vår atmosfære til verdensrommet. Ettersom levetiden for de fleste gassene i atmosfæren er meget lang, tusenvis av år, vil de lette gassene ha en tendens til å forsvinne fra den jordnære atmosfære.

Den her skisserte forestillingen om gassmolekylenes flukt fra planetatmosfærene forklarer månens manglende atmosfære, samt de relative tette atmosfærer på de store, ytre planetene.

Realistisk informasjon om tettheten i den øvre atmosfæren, over ca. 200 km, har man fått fra satellitters baneforandringer (orbital decay). Den midlere frie veilengden, dvs. avstanden mellom kollisjoner, for de nøytrale atomene og molekylene over 200 km er mye større enn satellittdimensjonene.

De frie strømmer av atomer og molekyler bestemmer motstanden mot satellittens bevegelse og dermed retardasjonen. Lufttettheten  $\rho$  finnes fra følgende formel:

$$\$ \$ \rho = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_s \cdot D_s \cdot \sigma_s \cdot v_s \$ \$$$

hvor  $\Delta t_s$  = tidsforandringen i satellittens omløpstid pga. atmosfærrens oppbremsing,  $D_s$  = dragkoeffisienten ( $\geq 2$ ),  $\sigma_s$  = satellittens effektive tverrsnitt (cross section), og  $v_s$  = satellittens hastighet. Den dominerende gassen mellom ca. 250 og 500 km er atomert oksygen, men også atomert nitrogen er en meget viktig bestanddel.

# Tidsvariasjoner i atmosfæren

Forfatter: Narom

[Tidsvariasjoner i atmosfæren \(59424\)](#)

Både i den midlere og spesielt i den øvre atmosfære er det store forandringer som funksjon av tiden. Også i troposfæren er det betydelige variasjoner fra en varm sommerdag til en kraftig høststorm eller fra sol til uvær.

I vår atmosfære er det både vertikale og horisontale vinder. Dette er viktig for å beholde en tilnærmet homogen atmosfære. Vindene fører til at luftforurensninger fordeles over store områder. Likevel må vår atmosfære anses som tilnærmet stabil. Middeltemperaturen varierer lite fra år til år. Lufthavet blåser ikke bort. Stabiliteten er en garanti mot katastrofale forandringer. Atmosfæren er ikke konstant i tid og rom, men kan innta mange forskjellige stabile tilstander; som for eksempel høytrykk eller lavtrykk over noen dager.

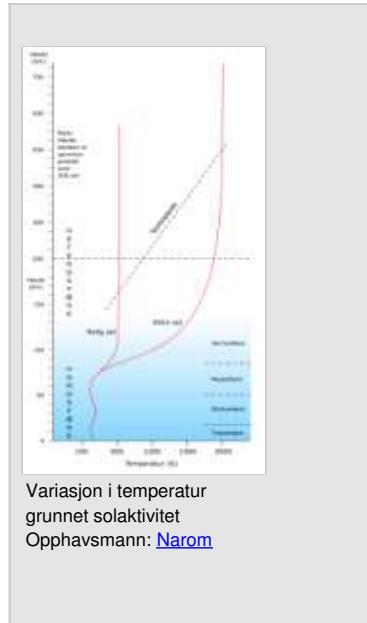
Hovedparten av solenergien går med til å varme opp landjorda og havene. Disse vil så bidra til oppvarming av atmosfæren nær jorda. Stabiliteten avhenger mye av hvor sterke de vertikale vindene er. Hvis en partikkels (molekyl, atom, aerosol) hastighet er tilstrekkelig stor, vil den kunne forlate jorda. Ettersom tettheten avtar hurtig med høyden, vil antall sammenstøt også avta jo lengre bort en kommer fra jorda. I store høyder er antall kollisjoner så liten at en partikkkel som beveger seg oppover sannsynligvis ikke vil bli støtt tilbake, men den vil fortsette utover, bare påvirket av jordas tyngdefelt.

I homosfæren er tidskonstanten for varmetap av størrelsesordenen en dag eller mer. Derfor er det ingen signifikant døgnvariasjon i temperatur eller tetthet i dette høydeområdet på lavere breddegrader. På høye bredder og spesielt i polområdene kan tidskonstantene være betydelige kortere.

Høyere opp i atmosfæren – i den øvre atmosfære – er tidskonstanten mye kortere. Ved for eksempel 200 km er tettheten i ekvatorområdet mer enn 10 % høyere på dagen enn om natten. Går vi ut til 600 km er tettheten om dagen dobbelt så stor som om natten. Den daglige variasjonen i den øvre atmosfære er et resultat av soloppvarming om dagen og nedkjøling om natten.

Den årlige variasjonen i tetthet og temperatur i den øvre atmosfære er meget stor – mer enn en faktor 10 i høydeområdet over 300 km. Det er interessant å legge merke til at temperaturen nær mesosfæren (omkring 80-90 km) er høyere på vinteren enn på sommeren, samt at man da mäter høyere temperaturer i polområdet enn ved ekvator.

Både tettheten og temperaturen viser også en 27 dagers periode. I tillegg er variasjonene i disse parametriene bra korrelert med den 11-årige solfleksyklusen. Hvordan temperaturen varierer med solaktiviteten fremgår av figuren under.



Variasjon i temperatur  
grunnet solaktivitet

Opphavsmann: [Narom](#)

# Observasjonsteknikker for studier av den midle..

Forfatter: Narom

[Observasjonsteknikker for studier av den midlere atmosfære \(59427\)](#)

I dette avsnittet skal vi konsentrere oss om den nøytrale, midlere atmosfære. Den midlere atmosfære er på mange måter vanskelig å studere fordi den er utilgjengelig for vanlige meteorologiske observasjonsmetoder. Med moderne teknikk kan man bringe instrumenter opp i ca. 40 km høyde ved hjelp av ballonger, mens satellitter kan foreta direkte målinger i selve mediet ned til ca. 250 km. I området mellom disse høyder er raketter det eneste middel til å bringe instrumenter i direkte kontakt med atmosfæren. Det finnes imidlertid en rekke metoder for fjernmåling fra bakken eller fra satellitter. Vi skal kort nevne noen av de viktigste metoder for eksperimentelle studier av den nøytrale luft.

## Radarmåling

Radar er forkortelse for "radio detecting and ranging". Radarer brukes normalt til å lokalisere gjenstander ved hjelp av radiobølger.

Prinsippet for radarmålinger av den midlere atmosfære er at radiobølger, altså elektromagnetiske bølger, spres eller reflekteres fra irregulærer eller skarpe graderinger i atmosfæren. Radiobølgene sendes mot atmosfæren. Radaren detekterer signalet som reflekteres tilbake. I troposfæren og stratosfæren skyldes de reflekterte signalene i det vesentlige forandringer i temperatur eller vanndampinnhold, mens i ionosfæren er det tettheten av frie elektroner som bestemmer intensiteten på det signalet som kommer tilbake.

Radarmålinger kan brukes til å studere dynamiske prosesser i luften. Fra målinger av dopplerforskyvningen av det reflekterte signalet får man informasjon om vindhastigheten i den lavere ionosfære under ca. 100 km, og temperaturen i mediet.

Spredning av radarbølgene kan skje ved forskjellige mekanismer. Om det er irregulærer i atmosfæren får vi et lite tilbakesprettet signal fra hver av disse. Om irregulæritetene er av størrelsesorden halve bølgelengden til de utsendte bølgene ( $0,5 \lambda$ ), vil bidragene summeres opp. Ved å variere frekvensen kan man derfor få informasjon om irregulærer av forskjellige størrelser.

## Lidarmålinger av atmosfæren

Ved å bruke en optisk radar, dvs. en radar som sender ut elektromagnetisk stråling med bølgelengder i eller nær den synlige delen av spekteret ( $\lambda < 10^{-6}$  m), kan man få informasjon om både tetthet, temperatur, og vindhastigheter i atmosfæren opp til ca. 125 km. Denne radartypen kalles lidar, som kommer fra "Light detection and ranging". I sin enkleste form består en lidar av en sender og en mottaker enten plassert på samme sted (monostatisk konfigurasjon) eller på hvert sitt sted (bistatisk konfigurasjon). Ved en monostatisk konfigurasjon måler en refleksjoner som kommer tilbake langs senderstrålen, mens ved bistatiske anlegg måler mottakeren bølger som spres ut i vinkel med senderstrålen.

Senderen i lidaren kalles en laser, mens mottakeren er en detektor (for eksempel fotomultiplikator eller fotodiode) i kombinasjon med en teleskopkonstruksjon. For å redusere signal/støyforholdet i målingene kan senderen periodevis bli dekket til av et blendersystem, ofte en roterende skive med hull i. Den vil kun slipper lys gjennom ved bestemte tidsintervaller. Laseren er da pulssynkronisert til å stemme overens med tidsintervallet. En lidar måler laserpulser spredt fra atmosfæren.



En laser (fra engelsk "light amplification by stimulated emission of radiation") kjennetegnes først og fremst ved at den er kraftig (effektfull) og monokromatisk (har bare en bølgelengde hvilket vil si at den er ensfarget).

## Lidar på Andøya – ALOMAR

Fotografiet viser ALOMAR-observatoriet. ALOMAR (forkortelse for "Arctic Lidar Observatory for Middle Atmospheric Research") er et observatorium for atmosfærstudier basert på en rekke forskjellige instrumenter, først og fremst lidarer. De første observasjonene ble utført i 1994.

En lidar sender ut lyssignaler som spres tilbake fra atomer, molekyler og partikler i atmosfæren. Antall fotoner som spres tilbake til mottakeren er proporsjonalt med spredningstverrsnittet  $\sigma$  og konsentrasjonen av de partikler som sprer lyset. Figuren under gir et skjematiske bilde av metoden. Ved å måle styrken til det tilbakespredte signal samtid med tiden det tar fra en lyspuls sendes ut til et signal kommer tilbake, kan man for eksempel måle lufttetthet som funksjon av høyden over bakken. Dersom en også klarer å måle dopplerforbredningen og dopplerforskyvningen av det mottatte signal, vil man få informasjon om henholdsvis temperaturen (til de spredende gasser) og hastigheten av partiklene langs lyssignalets bane.

De tilbakespredte signaler er meget svake, og eksperimentene kan bare utføres med kraftige lasere som lyskilder og med store speilteleskoper og følsomme detektorer på mottakersiden. Selve spredningsmekanismen avhenger av bølgelengden (dvs. fargen) på laserlyset og av om det er partikler eller molekyler/atomer som sprer lyset. De viktigste spredningsmekanismene for atmosfærstudier vil være

- Mie-spredningen fra partikler som har omrent samme størrelse som lysets bølgelengd
- Rayleigh-spredningen fra partikler som er mye mindre enn bølgelengden
- resonans-spredning fra spesielle gasser

Lidar blir tradisjonelt brukt til å måle vindretning, temperatur, tetthet, påvisning av sporstoffer i atmosfæren som natrium (Na), ozon ( $O_3$ ) og menneskeproduserte kjemikalier.

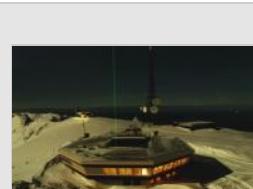
Som målesystem er lidar kompliserte konstruksjoner som krever mye tilsyn og ettersyn, samt stor energitilførsel. De er fremdeles relativt uprøvd teknologi (for eksempel i forhold til Dobsoninstrument og spektroskoper). Siden lysmengden som reflekteres tilbake i fra spredningsprosessene er svært små, er det mest hensiktsmessig å teller antall fonter som funksjon av avstanden til målevolumet.

Fordelen med en lidar er blant annet at den kan måle både dag og natt, at den kan måle atmosfæremolekyler, partikler og atomer direkte og at den har meget god oppløsning i tid og rom.

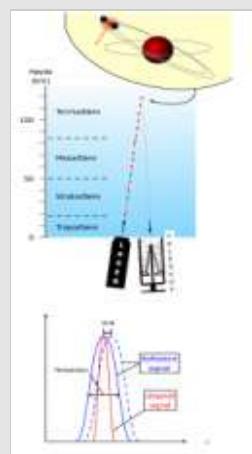
Dette siste er en fordel i forhold til Brewer- og Dobson-instrumentene, som bare gir den integrerte ozonmengden.

## Ozon-lidaren

Ozonlidaren representerer det viktigste norske bidraget til instrumenteringen av ALOMAR. Den er en "Differential Absorption Lidar" (DIAL) som opererer i det ultrafiolette området på to linjer, 308 og 353 nm, med en pulseffekt på 150 mJ. Prinsippet er at den ene linjen, 353 nm, spres fra luftmolekylene uten å absorberes vesentlig i ozonlaget, mens lyset på 308 nm både absorberes og spres. Ved å sammenligne de to mottatte signalene på de to linjene, kan man utlede ozonkonsentrasjonen som funksjon av høyden. Med et teleskop med 1 meter i diameter, får man ozonprofiler fra ca. 8 til 40 km høyde, dvs. gjennom det meste av stratosfæren.



ALOMAR-observatoriet  
på Andøya  
Opphavsmann: [Narom](#)



En skisse av et lidar-system. Laseren sender ut korte, sterke lyspulser med en bestemt frekvens (farge). Lyspulsene vil eksitere molekyler av et bestemt kjemisk stoff i atmosfæren slik at dette sender ut lys. Ved hjelp av et teleskop med følsomme detektorer registreres lys utsendt fra eksitere atomer. Man kan bestemme atmosfære-tettheten, temperatur, vindstyrke og vindretning i høydeintervallet 10-100 km.  
Opphavsmann: [Narom](#)



# Klima og miljøfysikk

## Innledning

Forfatter: Narom  
[Innledning \(59846\)](#)

Drivhuseffekten, luftforurensninger og klimavariasjoner er viktig for alt liv på jorda. Derfor er klima- og miljøfysikken viktige for vårt daglige liv. I massemediene hører man ofte om nedbrytningen av ozonlaget, økte drivhuseffekter og store luftforurensning. Takket være nye instrumenter og gode kommunikasjoner er det rimelig at det stadig settes nye rekorder. Skyldes dette den menneskelige aktiviteten eller at det finnes store, naturlige variasjoner i vær og klima. Man må ikke glemme at nedbrytningen av ozonlaget vil føre til økt UV-stråling, også kan ha positive effekter for mennesker og vegetasjon.

Jordas klimasystem er meget komplisert. Det er derfor praktisk talt umulig å lage matematiske/fysiske modeller som kan beregne alle prosesser som inngår. Gjennom sin virksomhet kan menneskene påvirke klimaet på ulike måter ved å forandre jordoverflaten, øke folketallet, hugge ned skog eller ved å slippe ut store mengder partikler og drivhusgasser. (Prognosene om verdens framtidige befolkning er meget usikre, men disse problemene vil ikke bli diskutert her.)

I dette kapitlet skal vi i første rekke diskutere klima, drivhuseffekten og luftforurensninger, samt diskutere mulige mottiltak mot klimaendringer.

Siden klimasystemet er så komplisert, er det vanskelig å tallfeste våre inngrep. For å ta vare på jordas ressurser er det nødvendig å skaffe seg bedre kunnskaper om de fundamentale fysiske prosessene i jordas atmosfære som er avgjørende for vår felles framtid. Fordi brorparten av de antropogene utslipper av gasser og støv/partikler – som forurenser miljøet, er knyttet til energiproduksjonen, er det nødvendig å omtale jordas energiressurser.

Uten den naturlige drivhuseffekten ville det ikke være mulig å leve på jorda.

En seriøs fokusering på jordas miljøproblemer krever kjennskap til forskjellige fysiske, kjemiske og biologiske prosesser, og hvordan vekselvirkningen mellom disse fungerer. Uten en naturvitenskapelig forståelse av de fundamentale prosessene vil forvaltningen av jordas ressurser og klima bli mislykket.

Miljøfysikken omhandler både været og luftkvaliteten. Vi må derfor omtale sentrale temaer knyttet til været og problemer som forurensning, drivhuseffekten og fornybare energiressurser.

# Jordas energiressurser

Forfatter: Narom

[Jordas energiressurser \(59848\)](#)

Energi regnes ofte som evnen til å utføre arbeid. Måleenheten for energi og arbeid er joule (J), der  $1\text{ J} = 1\text{ Nm}$ . Ofte brukes også enheten elektronvolt (eV) [ $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ ] når vi arbeider på atom- eller molekylnivå, og kilowatt-timer (kWh) når vi snakker om strømforbruk, hvor  $1\text{ kWh} = 3,6\text{ MJ}$  (millioner joule). (En vanlig norsk husholdning bruker ca. 25 000 kWh i elektrisk energi per år.)

Effekt ( $P$ ) er arbeid dividert på tid

$$\text{\$\$} P = \frac{W}{t} \text{\$\$}$$

der  $W$ : arbeid,  $t$ : tid.

Måleenheten for effekt er watt (W), der

$$\text{\$\$} 1\text{ W} = 1\text{ J/s} = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} \text{\$\$}$$

(En gammel måleenhet som ikke tilhører SI-systemet er hestekrefter (hk):  $1\text{ hk} = 735,5\text{ W}$ .)

Tilgangen på og forbruk av energi bestemmer vår levestandard. I det følgende vil vi skille mellom forskjellige energiformer, men bare ressurser som det er lønnsomt å utnytte vil bli omtalt. Den følgende omtale er hva vi i dag vet, basert dagens tekniskvitenskapelige nivå. Det kan fortsatt være betydelige ukjente resurser.

## Fossile energikilder

Fotosyntesen i grønne planter har ført til en meget stor opphopning av organisk karbon i jordskorpa. Bare en liten del av dette karbonet har en så høy konsentrasjon at det er utnyttbart. Dessverre fører forbrenning av organisk materiale til store utslipper av drivhusgasser og aerosoler som påvirker vårt klima. Men også forbrenning av ved, avfall, etc. gir CO<sub>2</sub> utslipper.

En vesentlig del – i dag er det omkring 80 % av verdens globale energiforbruk, blir i dag dekket fra fossilt brensel; dvs fra olje, gass og kull. Det tar millioner av år å danne fossilt brensel, noe som betyr at dette ikke er fornybare energikilder.

Fordi disse ressursene er begrenset blir det viktig å skaffe alternative energikilder. Vi har derfor laget en kort oversikt over alternative, fornybare energikilder.

## Fornybare energikilder

Prinsipielt kan vi skille mellom tre hovedtyper av fornybare energiressurser som kan utnyttes, nemlig:

1. Elektromagnetisk energi (stråling) fra sola.
2. Termisk energi fra jordas indre.
3. Gravitasjonsenergi fra månen, dvs. hovedsakelig tidevanns effekter.

Fordi den geotermiske energi er fortsatt meget begrenset i vårt land, vil den ikke bli videre diskutert her.

## Solenergi

Utenfor jordas atmosfære er solenergien  $1,74 \cdot 10^{17}$  W. Ca. 30 % av denne energien reflekteres. Midt over hele jordas overflate ( $5,1 \cdot 10^{14}$  m<sup>2</sup>), representerer dette en energitilførsel på ca. 240 W/m<sup>2</sup>. For økende geografisk bredde avtar energitilførelsen og ved Andøya, 67 grader, er det ca. 110 W/m<sup>2</sup>.

### Direkte solenergi

Solenergien brukes direkte til å varme opp boliger og til å produsere elektrisitet eller andre energibærere, som for eksempel hydrogen. På ubebodde solrike områder innenfor  $\pm 30$  grader fra ekvator kan solenergien utnyttes i stor skala. Om energien konverteres til elektrisk energi, vil dette representer en effekt av ca. 250 TW.

Et solcellepanel som mange i dag har på sine hytter vil maksimalt gi 60 W på en solrik sommerdag.

### Tidevannsenergi

Tidevannsressursene på grunn av jordas vekselvirkning med månen er anslått til 3 TW, men sannsynligvis kan bare ca. 10 % av dette brukes som potensiell energiressurs.

### Indirekte solenergi

Hittil har den indirekte utnyttelsen av solenergien til produksjon av mat og ved, vind og vannkraft dominert. Grovt regnet har man anslått solenergieffekten som tilføres jordbruksområder til ca.  $2 \cdot 10^{15}$  W. Ved en midlere virkningsgrad på ca. 0,05 % gir dette en energiutnyttelse på 1 TW.

### Biomasse

Den årlige produksjon av biomasse ved fotosyntese representerer ca. 60 TW/år. Biomasse i form av brensel (trevirke, naturgjødsel eller avfall) eller omformet til alkohol og/eller gass utnyttes til energi. (Spesielt i utviklingsland er biomasse en meget viktig energiressurs.)

### Vannkraft

Over jordas samlede landområder er den årlige nedbørsmengden ca.  $10^{14}$  m<sup>3</sup>. Den globale ressursen som kan utnyttes til elektrisk kraftproduksjon har blitt anslått til 1,7 TW. De norske vannressursene utgjør ca 1 % av dette. Mer enn 99 % av den elektriske energi som brukes i Norge kommer fra vannkraft.

### Vindenergi

Omkring 2 % av den innfallende solenergi omsettes til kinetisk energi i form av vind. En meget liten del av dette utnyttes til elektrisitetsproduksjon. Potensialet for utnyttelse av vindenergi er anslått til en effekt på omkring 6 TW.

En stor vindmølle med rotorblad på 60 meter kan maksimalt gi en årsproduksjon på et par GWh.

### Bølgeenergi

Den bølgeenergi som transporteres mot jordas kyster er beregnet å representer en energifluks av størrelsesorden 2 TW. Sannsynligvis vil det være mulig å omforme ca. halvparten av dette til elektrisk energi.

### Havstrømmer og havtermisk energi

Den kinetiske energi i jordas havstrømmer er beregnet til ca. 10 TW. I tillegg vil det i prinsipp være mulig å utnytte temperaturforskjellen mellom det varme overflatevannet og kalde havstrømmer på store dyp.

## Varmepumper

En varmepumpe er et instrument som flytter varme fra et reservoar med lav temperatur til et rom med høyere temperatur. Reservoaret man henter varme fra kan være jord eller sjø, eller uteduft. Den er derfor ingen energikilde, men fordi effektfaktoren er mellom 2 og 4, betyr det at man sparer energi til oppvarmingen av boligen.

## Sammendrag:

Fornybare energikilder bidrar med ca. 20 % av det totale energiforbruk i verden. Viktigst er biobrensel men elektrisitet fra vannkraftverk er også viktig. Energi fra sol, vind og andre fornybare kilder bidrar fortsatt lite, men de har et potensiale som er betydelig større enn det som utnyttes i dag.

# Energilovene

Forfatter: Narom

[Energilovene \(59851\)](#)

Enhver energiomforming i et hvilket som helst system følger termodynamikkens to lover (eller hovedsetninger), også kalt varmens 1. og 2. lov.

Varme er energioverføring på grunn av temperaturforskjell. Både varme og arbeid er overføring av energi.

## Termodynamikkens første hovedsetning - energibevaring

I et friksjonsfritt planpendel svingerkulen like høyt på begge sider. Når pendelen snur på det høyeste punktet er kulen et øyeblikk i ro. Her har kulen kun potensiell energi. Vi velger nullnivået for den potensielle energien i det laveste punktet i pendelbevegelsen. Det betyr at pendelen her har kun kinetisk energi. På alle andre punkter har kulen en kombinasjon av potensiell og kinetisk energi. I alle posisjoner er summen av den potensielle og den kinetiske energien konstant. Det betyr at totalenergien er konstant.



### Pendel / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/59870>

Energiformene i en pendelbevegelse. Summen av den potensielle og den kinetiske energien er bevart.

Når vi observerer en virkelig pendel over litt lengre tid ser vi at pendelutslagene avtar, og at pendelen vil stoppe til slutt. Årsaken er at det alltid vil være noe friksjon tilstede. Den mekaniske energien går over til indre energi. Overgangen fra mekanisk energi til indre energi blir enda tydeligere, når vi bråbremser en sykkel eller bil fra høy fart. Bremsene blir glovarme. Denne temperaturøkningen forteller oss at den indre energien har økt. Energien er altså ikke borte, den har bare gått over til en annen form. Totalenergien er uforandret.

Vi formulerer den første energiloven:

Energi kan verken oppstå eller forsvinne, den går bare over i andre former. Den totale energien er konstant.

En simulering av pendelbevegelse, hvor en kan endre enkelte parameter finnes under relaterte lenker til høyre.

Vi skal også diskutere Termodynamikkens første lov matematisk. Et system er representert med en gass i et lukket system. Vi kan tilføre systemet energi ved varme ( $Q$ ) og ved arbeid ( $W$ ). Da endrer den indre energien i systemet ( $\Delta U$ ) seg. Energibevaringsloven er formulert i termodynamikkens første hovedsetning: *Ved enhver forandring i et system er summen av den tilførte varmen og det arbeid som blir utført på systemet, lik endringen i indre energi:*

$$\$ \$ \Delta U = \Delta Q - W \$ \$$$

Termodynamikkens første lov er loven om energiens bevarelse i et lukket system. Man ser på utveksling av varme  $\Delta Q$  inn i systemet og arbeid  $W$  med omgivelsene. Den indre energi er knyttet til systemets molekylbevegelser og tilstand. (Vi har valgt  $W$  positiv når systemet utfører arbeid på omgivelsene.) Den matematiske formulering av termodynamikkens første lov uttrykker prinsippet om energiens bevarelse og kan formuleres som i likningen over.

Energi kan overføres fra ett system til et annet og energien kan anta forskjellige former, men den forsvinner aldri og skapes heller aldri.

Her har vi tilsynelatende en paradoksal løsning på alle energiproblemer; energien forbrukes ikke men resirkuleres. Dette paradoxet setter imidlertid termodynamikkens andre lov en stopper for.

### Termodynamikkens andre lov – energikvalitet

Etter første lov forbrukes ikke energien, den bare omformes. Det som forbrukes, eller forringes, er energiens kvalitet. Dette forbruket av kvalitet uttrykkes i den 2. loven med en størrelse som kalles entropi ( $S$ ). Entropi er en størrelse som karakteriserer et fysisk system på samme måte som for eksempel volum, temperatur, trykk, osv, men som er langt mindre forståelig. En presis definisjon krever begreper fra statistisk fysikk.

Fordi vi kan uttrykke hvordan entropien endrer seg ved en gitt varmeoverføring for en bestemt temperatur, kan vi benytte denne størrelsen.

Føres en varemengde  $\Delta Q$  inn i et system ved en absolutt temperatur  $T$ , vil dette gi en økning i entropien som er gitt ved:

$$\$ \$ \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \$ \$$$

Termodynamikkens andre lov kan formuleres på følgende måte: Universets entropi vil alltid øke ved alle virkelige prosesser. Matematisk kan den 2. lov skrives på formen:

$$\$ \$ \Delta S_{\text{total}} \geq 0 \$ \$$$

Hvor  $\Delta S_{\text{total}}$  er entropiforandringen i hele systemet som inngår i prosessen. Likehetstegnet gjelder kun for prosesser som like gjerne kan gå begge veier, hva vi kaller reversible prosesser. Entropi er et sentral begrep innen mange områder som termodynamikk, statistisk mekanikk og informasjonsteori. Entropien er et mål for et systems mikroskopiske uorden. Termodynamikkens andre lov innebærer at alle virkelige prosesser fører til større mikroskopisk uorden.

Termodynamikkens andre lov er viktig, men intuitiv vanskelig å forstå. Vi skal derfor ta med noen eksempler hvor entropi er viktig. Den kinetiske energien ved et roterende svinghjul er null fordi alle atomer beveger seg ordnet og på samme måte. Stoppes hjulet ved friksjon, vil all energi gå over til termisk, dvs. uordnet bevegelse. Da har entropien økt. Den motsatte prosess er umulig, de varme bremsene kan ikke gi energien tilbake som rotasjonsenergi for hjulet ved at bremsene blir kalde. Energien er fortsatt til stede, men kan ikke lenger utføre arbeid.

Som vi vet av erfaring blir pendelutslagene mindre etter hvert, og pendelen stopper opp til slutt. Selv om energien ikke er borte, vil vi aldri oppleve at energien som har blitt til indre energi føres tilbake til pendelen, slik at det begynner å svinge igjen. Vi kan heller ikke utnytte den indre energien i bremsene til å gi oss tilbake farten vi hadde før vi bremset. Når mekanisk energi går over til indre energi går energikvalitet tapt. Dette er innholdet i den andre energiloven:

*Energikvaliteten avtar ved alle energioverganger. Energi har høy kvalitet, når den er lett å utnytte til å utføre et arbeid. Potensiell energi og kinetisk energi har høy kvalitet. Men ved energioverganger vil alltid noe energi gå over til indre energi. Indre energi har lav kvalitet. Det er ikke mulig å omgjøre all indre energi til arbeid.*

### Fordypning: Den andre energiloven

En annen måte å formulere den andre energiloven er: Ved alle prosesser i naturen avtar universets orden.

Når en sykkel har kinetisk energi beveger alle partiklene i sykkelen med samme fart og i samme retning. Her har vi høy orden. Når vi bremser, blir bremsene varme. Partiklene i bremsen har økt sin indre kinetisk energi. Men deres bevegelser har ikke en bestemt retning. Her har vi uorden.

Ved bevegelse overføres det alltid energi til omgivelsene. Derfor egner kinetisk energi seg dårlig til lagring av energi. Potensiell energi er en bedre egnet energiform til lagring av energi. Når vi demmer opp vann i et vannmagasin over en foss har vi lagret energi som potensiell energi.

### Eksempel: Energibevaring

Falltårn brukes til å utføre eksperimenter med fritt fall. Her fjerner man luft for å unngå luftmotstand. Et lodd på 10 kg løftes til 100 m høyde.

- Hvilken potensiell og kinetisk energi har loddet på toppen?
- Hvilken potensiell og kinetisk energi har loddet rett før det treffer bakken?
- Hvilken potensiell og kinetisk energi har loddet 10 m over bakken?
- Hvilken fart har loddet rett før det treffer bakken?

Svar:

- På toppen er den kinetiske energien null.  $E_k = 0$ . Den potensielle energien er  $E_p = m \cdot g \cdot h = 10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 100 \text{ m} = 9,81 \cdot 10^3 \text{ J}$ . Dette er også den totale energien.
- Idet loddet treffer bakken har hele den potensielle energien gått over til kinetisk energi. Den kinetiske energien ved bakken har altså den samme verdien som den potensielle energien på toppen, nemlig 9,81 kJ.

c) Den potensielle energien 10 m over bakken er  $E_p = m \cdot g \cdot h = 10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10$

$$m = 9,81 \cdot 10^2 \text{ J.}$$

Den kinetiske energien er da forskjellen mellom den totale energien og den potensielle energien

$$\$E_k = E_t - E_p = 9,81 \cdot 10^3 \text{ J} - 9,81 \cdot 10^2 \text{ J} = 8,83 \cdot 10^3 \text{ J}$$$$

Den kinetiske energien 10 m over bakken er  $8,83 \cdot 10^3 \text{ J.}$

d)

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \text{ J}}{10 \text{ kg}}} = 44,3 \text{ m/s}$$

Farten rett før loddet treffer bunnen er 44,3 m/s.

Vi kunne også ha regnet ut farten med hjelp av en av bevegelseslikningene for konstant akselerasjon:

$$v^2 - v_0^2 = 2a \cdot s, \text{ der } v_0 = 0, a = g, s = h.$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 100 \text{ m}} = 44,3 \text{ m/s}$$$$

# Klima

Forfatter: Narom

[Klima \(59871\)](#)

Når det gjelder klima, tenker vi ofte på temperatur, nedbør og uvær; med andre ord på atmosfærrens tilstand, eller på været. Men klimaet er mer komplisert enn dette. Det er derfor nødvendig å definere hva vi mener med klima og klimavariasjoner. Grovt sett er klimasystemet sammensatt av følgende 5 deler: atmosfære, hav, kryosfære, landmasse og biosfære.

## Atmosfæren

Atmosfæren består av en rekke gasser. Gassene har ikke noen fast form, de kan utvide seg, men også presses sammen. Nitrogen og oksygen er de viktigste. De dominerende atmosfæregassene opptrer i et konstant forhold, mens flere av de små gassene (som utgjør  $\leq 0,05\%$  av det totale volum) er meget variable. Som eksempel kan nevnes vanndamp,  $H_2O$ , som varierer mye med både årstid og breddegrad. Det er også en varierende mengde skyer i atmosfæren. Atmosfæren er jo meget dynamisk fra fint vær til kraftige stormer og uvær.

Atmosfæren beskytter oss også mot den farlige, ioniserende strålingen fra verdensrommet, mens jordas magnetfelt skjerner oss mot farlig partikelstråling fra universet.

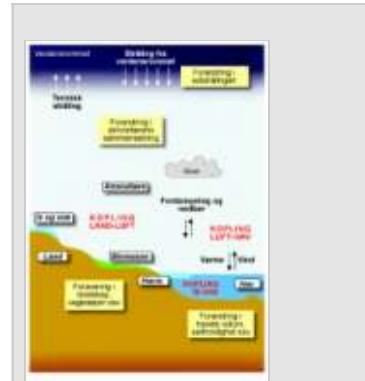
Atmosfæren er den viktigste delen av klimasystemet, særlig med tanke på de menneske skapte - "antropogene", forandringer. Når vi angir sammensetningen av atmosfæren refererer vi til en standard atmosfære. Konsentrasjonen av de "små" gassene er gitt som antall molekyler pr. million molekyler (ppm). Er konsentrasjonen ytterst liten, benyttes ofte ppb som står for antall molekyler pr. milliard (engelsk: "parts per billion").

I den lavere delen av atmosfæren kan det være store lokale variasjoner i sammensetningen. Jo kortere levetid en gass har, dess mer lokal vil virkningen av et gassutslipp være. Det ser vi tydelig når det gjelder biltrafikk og industri. Skal en gass ha virkning på global skala, må levetiden være så lang at gassen blandes gjennom hele atmosfæren. Både vanndamp og ozon varierer mye med hensyn til sted og høyde. For de andre gassene er blandingsforholdet i atmosfæren temmelig konstant opp til ca. 100 km.

I de senere årene er det blitt klart at små partikler (kalt aerosoler, de er større enn molekyler) i atmosfæren spiller en viktig rolle for været og klimaet.

De største variasjonene i klimasystemet finnes i atmosfæren. Mange ulike prosesser i atmosfæren bidrar til rask blanding, stor transport og høy variabilitet. Varmetransport mot polene er like stor i atmosfæren som i havet. I de senere år er det satt inn store ressurser for å varsle været nøyaktig. Til dette bruker en både faste og drivende metstasjoner, og stadig flere værsatellitter. Siktemålet er at en skal kunne forutsi når uværet kommer og hvor sterkt det vil bli.

## Havet



En skjematisk fremstilling av klimasystemet. De gule skiltene antyder forandringer som kan oppstå. De sorte pilene viser vekselvirkninger mellom deler av klimasystemet mens de hvite pilene viser vekselvirkningen mellom jordsystemet og verdensrommet. De viktigste koblingene mellom klimaelementer er angitt med rødt.  
Forfatter: [Narom](#)

Koblingen mellom havet og atmosfæren er viktig. Havet absorberer en stor del av strålingen fra sola og har stor varmekapasitet. Derfor representerer havet et enormt energilager som vil dempe alle temperaturvariasjoner. Havets varmekapasitet er ca. 30 ganger større enn atmosfærens totale varmekapasitet. Variasjonen av temperaturen i havet med årstiden går ned til ca. 70 meters dybde.

Havstrømmene transporterer store varmemengder fra områder omkring ekvator mot polene. De betyr mye for å opprettholde jordas varmebalansen. Det øverste vannlaget i havet vekselvirker med luften og sjøisen. Temperaturen har en utjevningstid på noen måneder. For de dypere lag derimot, er utjevningstiden mye lengre – ca. 1000 år. Temperaturvariasjoner i ekvatorielle havområder bestemmer i vesentlig utstrekning fordeling av nedbør og tørke over tropiske og subtropiske områder.

### Kryosfæren

Is- og snømassene på jorda kaller vi for kryosfæren. Mengden av snø og havis varierer betydelig med årstiden. Isbreene derimot varierer over lengre tidsrom. Snø og is reflekterer solstrålingen betydelig mer enn bar bakke. Kryosfæren er derfor viktig for jordas energibalanse, spesielt på høye breddegrader.

### Landmassene

Foruten fast land omfatter landmasse også innsjøer, elver og grunnvannet. Disse er en varierende del av systemet. Jordoverflatens beskaffenhet er viktig. En vesentlig del av de luftbare aerosolene som påvirker klimaet kommer fra jordoverflaten.

### Biomassen

Biomassen omfatter plantene på land og i sjø og alt dyreliv. Den er i varierende grad følsom overfor klimaforandringer og kan selv påvirke klimaet. Biomassen er viktig for innholdet av blant annet karbondioksid og partikler i atmosfæren. Variasjoner i biomassen påvirker refleksjonsevnen til jorda og fordampningen som inngår i energibusjettet.

### Konklusjon

Klimaet defineres som den midlere tilstand av elementene atmosfære, hav, kryosfære, landmasser og biomasse, tatt over en periode på 30 år. Middelverdien alene er ikke noen fullgod definisjon for klimaet. I tillegg bør en ha et mål for variasjoner omkring middelverdien. Vi kan fremstille klimasystemet på flere måter. En måte er vist i figuren under. I en diskusjon av de antropogene forandringene, er atmosfæren viktigst.

## Det har vært store forandringer i klimaet

Forfatter: Narom

[Det har vært store forandringer i klimaet \(59874\)](#)

Nøyaktige målinger av temperatur, nedbør, skydekke, etc. har vi bare for det siste 100 årene. Bare i de siste 60–70 årene har vi nøyaktige, koordinerte målinger som dekker hele jorda, og mye har skjedd i denne perioden.

Vi har ofte kalde eller milde vintrer, tørre eller fuktige somrer, osv. At to påfølgende vintrer ikke er like, tar vi som en naturlig ting. Det som vekker oppmerksomhet blant folk flest og i media, er ekstremesituasjoner som medfører materielle skader og tap av menneskeliv. De største ulykkene i vår tid skyldes gjerne ekstreme værforhold. Antall mennesker som ble drept i naturkatastrofer synes bare å øke. Det at folketallet øker, tilslører en slik utvikling.

Tretten av de fjorten varmeste årene som er registrert, finner vi etter 1980. Vi har opplevd dager med ekstremt sterkt vind. Høst- og vinterstormene i Skandinavia er beskjedne sammenlignet med tropiske orkaner. Slike ekstreme stormer krever stadig flere ofre. Også omfanget av de materielle skadene øker. Temperaturen har steget mellom 0,3 og 0,6 °C i perioden 1860 til 1990. Temperaturutviklingen er ikke jevn. Vi har hatt både oppvarming og avkjøling. Men det er en trend i de globale registreringene. En temperturstigning på 0,5 °C er signifikant. Temperaturdataene er avledet fra et enormt stort nett av værstasjoner. I de siste 30 årene er temperaturen også kontinuerlig målt med satellitter. Ulempen er at dataserien fortsatt er meget korte.

Noen årsaker til temperaturvariasjonen ligger utenfor systemet atmosfære/hav. For eksempel kan vulkanutbrudd påvirke været globalt over kortere perioder. Naturfenomenet som kalles El-Niño er derimot en klimavariasjon der vekselvirkningen mellom hav og atmosfære er helt essensiell for at fenomenet skal oppstå. (El Niño, på spansk: guttebarnet)

### Fordypning: Vulkanutbrudd

Enkelte vulkanutbrudd kan sende store mengder med gass og støv opp i atmosfæren, deriblant store mengder svoveldioksid, SO<sub>2</sub>. I nyere tid har vi hatt to kraftige vulkanutbrudd. Det var El Chichón i Mexico i 1982 og Mount Pinatubu på Filippinene i juni 1991. Støvet fra Mt. Pinatubo førte til en reduksjon i solstrålingen på omtrent 2 % i den nedre atmosfære. Den globale midlere temperatur falt med omtrent 0,25 °C de påfølgende to årene. Det er rimelig å anta at spesielle værfenomen i 1991 og 1992 kan settes i forbindelse med vulkanen. Disse utbruddene førte også til en fortynning av ozonlaget.



El Niño-situasjon



La Niña-situasjon

## Fordypning: El Niño

I Stillehavet, nær kysten av Peru, kan en med noen års mellomrom observere store havområder med varmt vann. Temperaturen kan være opptil 7 °C høyere enn normalt. I 1998 var det en meget kraftig El Niño. Det varme vannet hindrer kaldt næringsrikt vann å stige opp til overflaten, og dermed blir fisken borte. Situasjonen med ekstra kaldt vann kalles La Niña (jentebarnet). Vanntemperaturen omkring ekvator kan altså være i to tilstander, – El Niño og La Niña. I slutten av 1960-årene fant den kjente norske meteorologen Jacob Bjerknes, som da var professor ved University of California, at det er en sammenheng mellom det varme havvannet i El Niño, variasjoner i lufttrykket og luftstrømmene. El Niño har derfor betydelig innvirkning på været globalt. Varigheten og styrken av El Niño varierer fra gang til gang.

Koplingene mellom havet og atmosfæren er meget sterke. De nyere klimamodellene omfatter de viktigste prosessene som kopler disse delsystemene. Dette vil ha stor betydning for jordbruk, fiske og annen aktivitet rundt om i verden. Selv om vi vet mye om tidsrelasjoner og prosessene, er vi ikke i stand til å forklare hvorfor en spesiell storm starter.

Sovel i atmosfæren omformes stort sett til  $\text{SO}_2$  eller  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Disse gassene har innvirkning på skydekket.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  bidrar til den sure nedbøren som har betydelige skadefinnkninger. Det meste sovel kommer fra fossilt brensel og nedbryting av organisk materiale. Det kommer også mye sovel fra havet. Atmosfæren får stadig påfyll. Derfor vil luften inneholde store mengder svelvparkikler, spesielt i områder nær industristeder. Modeller viser at dette fører til en avkjøling.

# Klimaendringer

Forfatter: Narom

[Klimaendringer \(60039\)](#)

I de senere år er været – både regionalt og globalt – blitt noe vi diskuterer i stadig større grad. Klimaendringer ligger og lurter i bakgrunnen. De fleste av oss er nok mest interessert i endringer over kortere tidsrom.

Noe har skjedd med klimaet det siste århundre som det ikke var mulig å forutsi for si 70 år siden. Det er ting som tyder på at forandringene kan bli større i neste århundre. For å sette dagens observasjoner i rett perspektiv, må vi lete etter trender i klimaet over lange tidsperioder.

Vi kan med stor sikkerhet si fast at jordas befolkning vil øke betydelig. Hvordan vil en økende befolkning påvirke klimaet?

For å diskutere klimaendringer langt tilbake i tiden, må vi basere oss på indirekte data som årringer i trær, sedimentprøver fra innsjøer og havet, iskjerner, osv. I tillegg kan historiske beretninger være til hjelp. Fra slike datasamlinger kan man kartlegge store trekk i klimautviklingen på regionalt nivå.

Moderne massemedier bringer ofte nyheter om klimakatastrofer. Er kritiske klimaforandringer på gang? Moderne tekniske installasjoner er følsomme for ekstreme værsituasjoner. Dette har forsterket vår aktsomhet overfor klimaendringer. Men det må manes til en viss moderasjon. Det finnes betydelige naturlige variasjoner i vær og klima. Fordi vi har korte observasjonsrekker er det ikke unaturlig at det settes nye "rekorder". Følgende spørsmål er viktig:

Er de værsituasjoner vi opplever naturlige, eller er de antropogene, dvs. menneskeskapte effekter? Kan vi allerede se virkningen av økte mengder drivhusgasser? Vi må lete etter trender i klimaet, og ikke henge oss opp i korttidsvariasjoner.

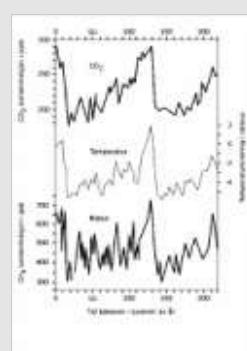
På 1960-tallet og tidlig i 1970 årene opplevde vi et fall i den globale temperaturen. Det var mange som da mente vi var på vei inn i en ny istid. Det var vært flere stormer i 1980- og 1990-årene enn det var de to tidligere tiårene. Slike observasjoner kan ikke brukes som bevis på en trend. Modeller med innlagt økt CO<sub>2</sub> gir heller ikke støtte for dette. De siste 10-15 årene har vært relativ varme. Det har forsterket diskusjonen om hvorvidt klimaet påvirkes av økte drivhusgasser i atmosfæren.

## Temperaturen i tidligere tider

Jorda har gjennomgått flere "isaldre". I tidsrommet mellom isperiodene har jorda vært tilnærmet isfri. I de siste ti tusen år har jorda vært relativt varm.

Hvordan kan vi få pålitelige informasjon om temperaturen for noen tusen år siden? En ny metode basert på bruk av isotopene O-16 og O-18, ble tatt i bruk i 1970-årene. De fleste oksygenatomene består av 8 protoner og 8 nøytroner; dvs. 16 atommasseenheter og betegnes O-16. Men det finnes oksygenkjerner med 8 protoner og 10 nøytroner slik at atommassen blir 18 u. Følgelig finnes vannmolekyler med normalt oksygen, H<sup>16</sup>O<sub>2</sub>, og vannmolekyler med den tyngre oksygenisotopen, H<sup>18</sup>O<sub>2</sub>. Det er et bestemt forhold mellom disse isotopene i naturlig vann. Ca. 0,3 % inneholder den tunge isotopen, og siden dette forholdet avhenger av temperaturen, kan det brukes som et termometer.

Isbreer inneholder små mengder atmosfæregasser. Ved en dybde på  $\geq 100$  meter ned i isbreen lukkes porene i snøen slik at gassene ikke slipper ut. Luften i porene utgjør ca. 10 % av volumet. Luften i iskjernene kan også gi opplysninger om konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> i atmosfæren den gang isen ble dannet. Opplysninger om den gjennomsnittlige atmosfæretemperaturen på den tiden snøen falt, kan vi få ved å analysere forholdet mellom oksygenisotopene O-16 og O-18 i isen.

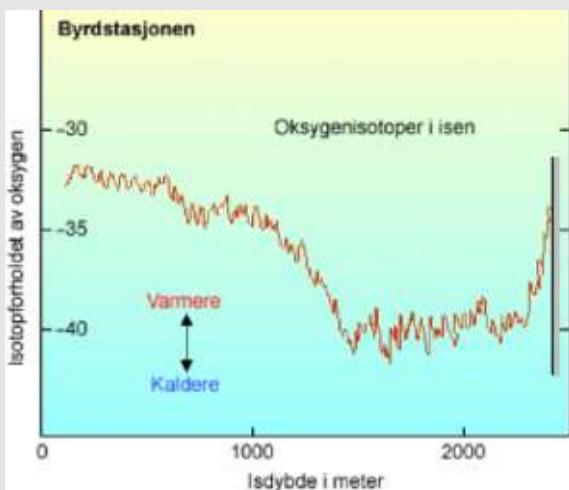


Isprøver

Isprøver som går mer enn 200.000 år bakover i tiden. Her er vist variasjoner i både CO<sub>2</sub>, metan og temperatur.

### Fordypning: Tidligere tiders atmosfæretemeraturer

I finner altså tidligere tiders atmosfæretemperatur ved å bore ut iskjerner og måle isotopforholdet. Isens alder kommer man fram til på en lignende måte som når man teller årringer i et tre. Et eksempel på temperatur målt fra isbreer er vist i følgende figur:



Isotopforholdet i oksygen som funksjon av isdybde ved Byrdstasjonen i Antarktis

Isen som i dag befinner seg i en dybde av 1000 meter, ble dannet for omkring 11.000 år siden. Den eldste isen er omkring 100.000 år gammel. Registreringene er fra Byrdstasjonen i Antarktis på 80 grader syd. Fra slike målinger får vi temperaturforholdene fra relativt nær fortid. Skal vi veldig langt tilbake i tid, brukes sedimentprøver hentet fra dyphavene.

Temperaturvariasjonene fra Byrdstasjonen kan summeres på følgende måte:

- I perioden fra år 800 til 1000 var det forholdsvis varmt med mindre isutbredelse enn nå. Det var i den perioden franskemennene klaged over konkurransen fra England på vinmarkedet.
- Perioden 1550 til 1800 var kald og den betegnes ofte som den "Den lille istid". Temperaturen var omkring 1 °C lavere enn nå. I denne perioden var det svært liten solflekkaktivitet. Noen forskere mener at dette er årsaken til temperaturfallet. Ut fra det vi nå vet om variasjon i solarkonstanten, er det lite trolig at en kan forklare temperaturfallet som en direkte følge av redusert utstråling fra sola.

Data fra iskjernene viser at det har vært klimasvingninger på tidsskala fra tiår til århunder.

## Hva er årsaken til istidene?

Klimaet på jorda har variert betydelig med varme perioder og istider, men klimaforandringene har skjedd relativ langsomt. Resultatene fra iskjerner viser at jordas middeltemperatur i de siste 10 000 årene har vært relativt konstant. Det er viktig å finne årsaken til istidene. Er det en sammenheng mellom istider og variasjoner i innstråling fra sola? Tre parametre, som varierer periodisk, må undersøkes nøy:

### Jordbanens form

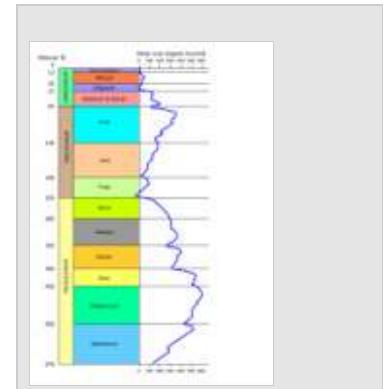
Jorda går i en elliptisk bane rundt sola. Eksentrisiteten, dvs. avviket fra en sirkelbane, er liten, men den varierer over en periode på ca. 100 000 år.. Det betyr at avstanden til sola og dermed innstrålingen vil variere. Eksentrisiteten har avtatt i de siste 15 000 år og dette vil fortsette i de neste 35 000 årene.

### Jordas rotasjonsakse

Jordas rotasjonsakse danner en vinkel med normalen til baneplanet som varierer mellom 21,6° og 24,5° med en periodisitet på ca. 41 000 år. For tiden er helningen 23,5 grader. Sesongvariasjonen i solstrålingen, særlig ved høye breddegrader, øker med helningsvinkelen. Det er ca. 10 000 år siden siste maksimum på 24,5°.

### Jordaksens presesjon

Den tredje parameteren er knyttet til jordaksens presesjon. Det har noe å si når på året jorda står nærmest sola. Nå for tiden skjer det i januar. Om ca. 11.500 år vil det skje i juli. Denne bevegelsen har en periode på omkring 23.000 år. Beregninger antyder at variasjonen i baneparametrene i perioder kan gi kalde somre og milde vintre ved høye breddegrader. Det betyr at snødekket og albedoen kan øke. Dette kan gi grunnlag for istider.



Havnivå

Temperatursvingningene i et geologisk tidsperspektiv, uttrykt i form av endringer i havnivået. Den globale temperaturen er bare en av flere årsaker til havnivåendringer.

## Fordypning: Andre årsaker til klimavariasjonene

Også andre årsaker til klimavariasjonene er blitt foreslått. En mulighet er at de store strømmene i verdenshavene blir påvirket av smeltevann fra breene. Man mener at de store strømmene i havene er drevet blant annet av forskjeller i temperatur og saltholdighet. Golfstrømmen, som "renner" nordover fra ekvatorområdet, blir utsatt for sterk fordampning. Det fører til økt saltholdigheten. Når det varme, salte vannet fortsetter mot Grønland, møter det kaldere vannmasser og blir avkjølt. Dermed blir det tyngre enn vannet i omgivelsene og synker. Dette gir opphav til en kald bunnvannsstrøm.

Spørsmålet om klimaet er stabilt eller ikke, er viktig når vi skal vurdere konsekvensene av eventuelle menneskeskapte klimaforandringer. Overgangen fra istid til mellomistid har tatt flere tusen år. Resultatene fra iskjernene viser at forandringene i temperaturen de siste 10.000 år ikke har vært dramatisk.

Det er vanskelig å tolke klimadataene. Fortsatt er det en rekke ting vi ikke kjenner tilstrekkelig og vi får stadig nye overraskelser.

# Drivhuseffekten

Forfatter: Narom

[Drivhuseffekten \(60044\)](#)

Vi skal nå diskutere den globale energibalansen ved omtale av drivhuseffekten. Drivhuseffekten har fått stor oppmerksomhet i massemedia den senere tid, men debatten har vært lite nyansert fordi prognosene og modellberegninger fremføres som absolutte sannheter. Andre hevder at påstandene om menneskeskapte klimaendringer ikke er påvist. Det er viktig å påpeke at drivhuseffekten er et naturlig fenomen; ja en forutsetning for livet på jorda. Uten drivhuseffekt ville vi ha temperaturforhold som på månen. Spørsmålet er hvor store endringene kan bli før miljøet på jorda forandres. Derfor er det viktig å kjenne de naturlige prosessene som påvirker energibalansen.

Den franske matematiker og fysiker Jean Baptiste Fourier (1767–1830) fant i 1824 at visse gasser i atmosfæren "holdt tilbake" noe av jordvarmen. Dette kunne sammenlignes med virkningen av et drivhusstak. 100 år senere ble det vist at klimaendringer kunne skyldes atmosfærens innhold av karbondioksid (CO<sub>2</sub>). CO<sub>2</sub> har evne til absorpsjon av termisk stråling fra jorda. Den svenske kjemikeren Svante Arrhenius (1859–1927) konkluderte at hvis en økte CO<sub>2</sub> innholdet til det dobbelte, ville temperaturen på jorda øke med ca. 5 til 6 °C.

Omkring 1940 ble det dokumentert at innholdet av karbondioksid i atmosfæren vil øke fordi vi brenner kull, olje og gass. Skog og planter tar opp CO<sub>2</sub> gjennom fotosyntesen. Ved å hugge ned skogen uten at en plantet ny skog samtidig, vil CO<sub>2</sub> øke. Avskoging kan derfor få store konsekvenser for klimaet.

## Hva er drivhuseffekten?

To forhold fører til at temperaturen øker i et drivhus eller i et gatetorg med glasstak.

1. Sollyset varmer opp bakken og det nederste luftlaget. Varm luft stiger til værs. Glasstaket utgjør en mekanisk hindring for at disse luftstrømmene skal unnslippe; dvs taket reduserer varmetapet.
2. En annen oppvarmingsmulighet er knyttet til glasstakets evne til å slippe gjennom solstrålingen, mens det hindrer varmestrålingen fra bakken - pga. forskjellige bølgelengder, å gå motsatt vei.

Det er punkt 2 som tilsvarer drivhuseffekten i atmosfæren.

## Et enkelt bilde av drivhuseffekten

Vi skal først regne ut middeltemperaturen på jorda uten å ta hensyn til atmosfæren.

Tilnærmet all energi som når jordoverflaten, kommer fra sola. Den totale effekten er gitt ved solarkonstanten  $S$  ( $\approx 1380 \text{ W/m}^2$ ). (I romalderen er solarkonstanten blitt målt med satellitter.) Ca. tre tideler av solstrålingen som treffer jordas atmosfære absorberes og reflekteres tilbake til verdensrommet. Jordas "albedo" (betegnes med  $A$ ) er dermed  $\approx 0,3$ .

Varmestrålingen fra jorda er gitt ved Stefan-Boltzmanns ligning. Ved jordas overflate har vi: Energien inn mot jorda er lik den energi som sendes ut. Følgende ligning beskriver denne situasjonen:

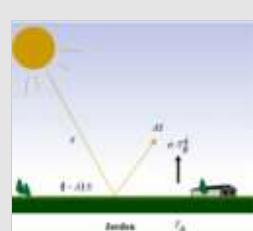
$$\$$(1 - A) \cdot \sigma \cdot S = \sigma \cdot T_B^4$$$$

hvor  $A$  = jordas albedo,  $\sigma$  = Stefan-Boltzmanns konstant og  $T_B$  er bakketemperaturen som vi kan beregne fra denne ligningen.

Faktoren 4 i nevneren har følgende forklaring. Den absorberete solenergi er proporsjonal med jordas tverrsnitt (gitt ved  $\pi \cdot R_j^2$ ). På grunn av jordrotasjon fordeles den absorberete energi over hele jordoverflaten (gitt ved  $4\pi \cdot R_j^2$ ). Vi fordeler den absorberete energien over hele jorda ved å multiplisere med  $\pi \cdot R_j^2 / 4\pi \cdot R_j^2$ . I middel er det derfor bare 1/4 av solarkonstanten som treffer jordoverflaten til enhver tid.

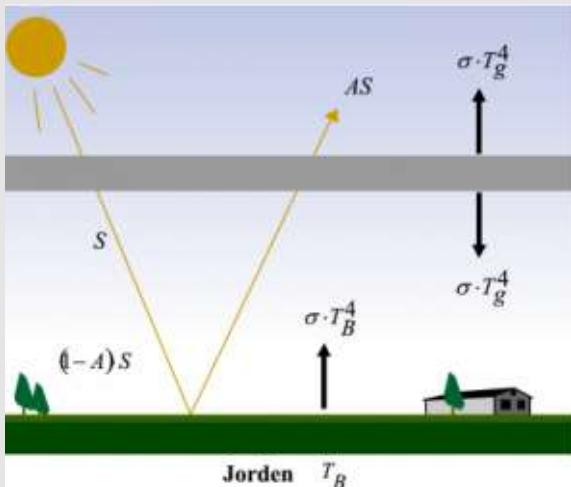
Eneste ukjente i ligningen over er temperaturen. Om vi setter  $S=1380 \text{ W/m}^2$ ,  $A=0,3$  og videre  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  og regner ut, blir bakketemperatur  $255 \text{ K}$  eller minus  $18^\circ\text{C}$ . Dette samsvarer med den midlere temperatur på månen.

Vi skal nå ta hensyn til jordas atmosfære, som vi fysisk beskriver som et "drivhustak". Atmosfæren slipper gjennom synlig lys fra sola, men absorberer mye av varmestrålingen fra bakken. Legg merke til at også "taket" (dvs atmosfæren) stråler. Hvis den absorberete strålingsdelen er  $e$ , vil taket sende ut brøkdelen  $e$  som stråling. Alle legemer som har en temperatur stråler i hht. Stefan-Boltzmanns lov. Strålingsforholdene endres som vist i figuren under. Med disse forutsetninger kan vi sette opp et energiregnskap for både bakken og drivhustaket.



Strålingsbalanse

En enkel fremstilling av strålingsbalansen når vi ser bort fra atmosfære rundt jorda.  $S$  er solarkonstanten,  $A$  er albedo,  $T_B$  er bakketemperatur og  $\sigma$  er Stefan-Boltzmanns konstant.



Energibalanse

Energibalansen for jorda med atmosfæren som er komprimert og ligner et drivhustak (prikket). Drivhustaket har en temperatur,  $T_g$ , og stråler ut energi både oppover og nedover. Det er den mengden som går nedover som øker temperaturen på jorda.

For bakken får vi følgende ligning:

$$\$ (1 - A) \cdot S = \sigma (T_B^4 + e \cdot T_g^4) \$$$

For drivhustaket får vi følgende bidrag:

$$\$ e \cdot \sigma T_B^4 = 2e \cdot \sigma T_g^4 \$$$

Her kjenner vi  $A$ ,  $S$  og  $\sigma$ . Størrelsen  $e$  må vi velge slik at resultatet stemmer med observasjonene, mens  $T_B$  og  $T_g$  er ukjente. Vi kan da beregne  $T_B$  når vi har valgt  $e$ . Velger vi  $e=1$ , dvs. at taket absorberer all stråling fra bakken får vi  $T_B = 303 \text{ K}$  ( $3^\circ\text{C}$ ). Hvis vi velger  $e=0,77$ , dvs. at 77 % av strålingen fra bakken blir stoppet i taket får vi en bakketemperatur på  $T_B = 288 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$ .

Dette er samme verdi som den observerte, globale, midlere temperatur. Tilbakesprett solstråling fra taket bidrar da med  $107 \text{ W/m}^2$  til oppvarming av jorda.

Drivhusetaket fører til en dramatisk øking av temperaturen fra  $-18^\circ\text{C}$  til  $+15^\circ\text{C}$ , dvs en økning på  $33^\circ\text{C}$ . Forutsetningen er at atmosfæren slipper gjennom all solstråling, mens den absorberer 77 % av varmestrålingen fra jorda.

Modellen beskrevet over viser hva som skjer. Atmosfæren fører til at den termiske strålingen til verdensrommet blir redusert. Vi har strålingsbalanse. Derfor må temperaturen ved bakken øke slik at utstrålingen blir lik innstrålingen. De gassene i atmosfæren som absorberer strålingen fra bakken, kalt drivhusgasser, er derfor meget viktige.

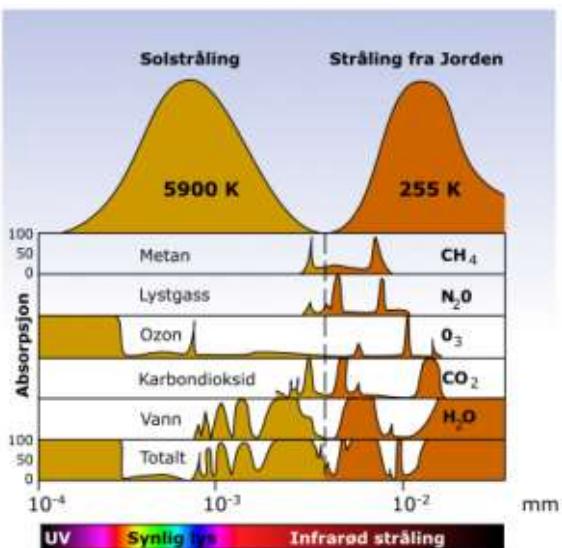
Det er drivhuseffekten som gjør det levelig på jorda. Dette kan vi konkludere ved å sammenligne med temperaturforholdene på månen. Den har i middel samme avstand fra sola som jorda, slik at innstrålingen pr. flateenhet er den samme. Men månen har ingen atmosfære som påvirker strålingen. Middeltemperaturen på månen er minus  $18^\circ\text{C}$ , mens vi på jorda har en middeltemperatur på omkring pluss  $15^\circ\text{C}$ . Forskjellen er  $33^\circ\text{C}$ , en forskjell som er svært viktig for livet på jorda.

### Absorpsjon av solstrålingen i atmosfæren

Gassene i atmosfæren har forskjellige absorpsjonsegenskaper; fordi absorpsjonen varierer med bølgelengden til strålingen. Enkelte gasser absorberer UV-stråling (for eksempel ozon), andre gasser absorberer synlig lys, mens noen absorberer i det infrarøde området, dvs. varmestråling. En drivhusgass er pr. definisjon en gass som absorberer varmestrålingen, infrarød stråling, fra jorda.

Den elektromagnetiske strålingen fra sola er vist i figuren over sammen med spekteret fra jorda. Stråling med bølgelengde mindre enn ca. 300 nm absorberes fullstendig av atmosfæren (hovedsakelig pga. ozon). I den infrarøde delen er det noen "søkk" i spekteret som viser at mye av strålingen er absorbert. Her er vanndamp viktig. Flere detaljer om hvilke gasser som absorberer stråling ser du i figuren under.





Absorpsjonsevnen til de viktigste gassene i atmosfæren, gitt i prosent av total absorpsjon

Jorda stråler som et svart legeme med en "effektiv" temperatur på 255 K. Formen på spektret er gitt ved strålingsloven, og er derfor lik formen på solspekteret. Spektrene er forskjøvet i forhold til hverandre fordi temperaturen er så forskjellig. Sollyset har maksimum ved ca. 500 nm, mens spektret fra jorda har maksimum ved ca. 11.300 nm eller 11,3  $\mu\text{m}$ . Disse to viktige strålingsspekturene er vist i figurene over. Som vi ser er det ingen overlapping mellom spektrene.

#### Fordypning: "Atmosfærens vindu"

Noen gasser absorberer stråling fra sola, mens andre absorberer jordstrålingen. Ozon, vanndamp og CO<sub>2</sub> absorberer stråling både fra sola og jorda. Absorpsjonsspekturene til de viktigste drivhusgassene er vist til høyre for stiplet linje i figurene over. Det samlede resultatet av alle drivhusgassene er vist øverst i figuren.

Området 8 til 13  $\mu\text{m}$  kalles "atmosfærens vindu" fordi termisk stråling i dette området slipper ut i verdensrommet. I vår modell gikk ca. 23 % av strålingen rett ut i verdensrommet.

Oksygen og nitrogen absorberer lite av solstrålingen. Utenfor det atmosfæriske vinduet absorberes strålingen fra jorda ganske effektivt av vanndamp, karbondioksid, ozon, lystgass og metan. I nyere tid er det kommet til andre gasser som også absorberer termisk stråling fra jorda. De viktigste er klor-fluor-karbongassene, forkortet KFK-gassene, som menneskene har sluppet ut i atmosfæren siden 1930-årene. Det som er særlig betenklig ved KFK-gassene er at de absorberer i området omkring 11 mm, det vil si i atmosfærens vindu. Dette gjelder både CFCI<sub>3</sub> (F-11) og CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (F-12). Det at de absorberer i et område der de naturlige drivhusgassene ikke absorberer, gjør dem svært effektive.

Vil drivhuseffekten øke?

Drivhuseffekten fører til at temperaturen på jorda er ca. 33 °C høyere enn den ville vært om jorda var uten atmosfære. Dette skyldes i hovedsak vanndamp, men også CO<sub>2</sub> er viktig. Vanndampen kommer stort sett fra fordampning av havene. Den kan bare indirekte påvirkes av menneskene ved at vår aktivitet fører til globale variasjoner i temperaturen. Vanndampinnholdet i atmosfæren er derfor praktisk talt bestemt av naturen selv.

Når det gjelder CO<sub>2</sub>, er forholdene litt annerledes. Store mengder karbon er lagret i olje og kullreservoarene. Ved å bruke fossilt brensel, frigjøres karbondioksid som slippes ut i atmosfæren. CO<sub>2</sub>-innholdet i atmosfæren har økt med ca. 25 % siden starten av den industrielle revolusjon. Denne økningen vil forsterke drivhuseffekten, selv om vi ikke kan angi nøyaktig hvor mye.

Om CO<sub>2</sub>-innholdet i atmosfæren fordobles vil vi få nye strålingsbetingelser. Solstrålingen inn mot atmosfæren vil forbli uforandret. Økingen i CO<sub>2</sub>-mengde ville føre til en ubalanse i strålingsbudsjetten på omtrent 4 W/m<sup>2</sup>. For å opprettholde likevekten ved atmosfærens ytterkant måtte temperaturen på jorda øke. Beregning av temperaturøkningen fra modeller gir en økning på 1 til 2 °C.

### Fordypning: Tilbakekopling ved temperaturøkning

Hvis temperaturen på jorda øker, vil sannsynligvis også fordampningen fra havene øke. Dette kan igjen påvirke skydannelsen som i sin tur vil påvirke drivhuseffekten. Vi kaller det en "tilbakekopling". Så lenge konsentrasjonen av drivhusgasser er liten, vil absorpsjonen øke med kvadratroten av konsentrasjonen. Ved en ytterligere økning av konsentrasjonen, vil stadig større deler av båndet være total absorbert. En økning i absorpsjonen vil derfor bare finne sted ute på vingene av kurven, der absorpsjonsevnen er svak. Dette er tilfelle med CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i atmosfæren i dag.

Kan vi i dag med sikkerhet slå fast at drivhuseffekten har ført til økt temperatur? Svaret er nei. Mange forskere mener at vi ennå må vente et tiår eller to. Dette skyldes i høy grad de store naturlige variasjoner. Selv om vi ikke kan identifisere virkningen av antropogene utslipper, er de fysiske prosessene forstått.

### Oppsummering

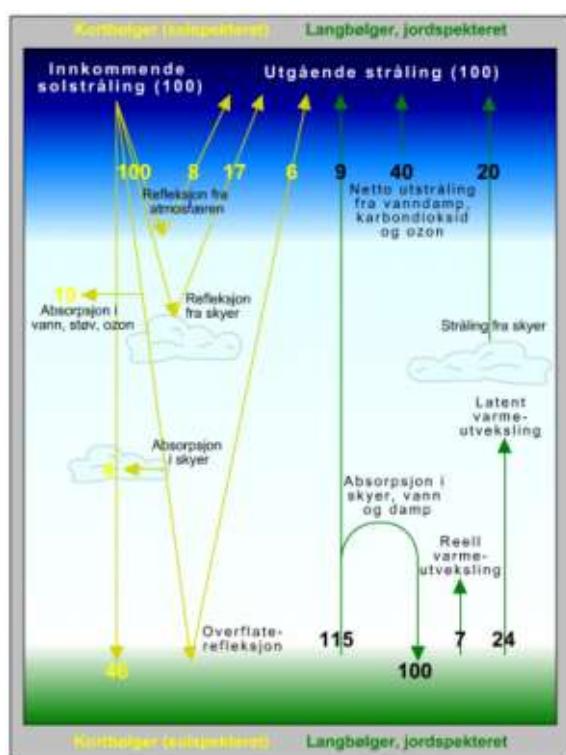
Atmosfæren inneholder gasser med absorpsjonsegenskaper som kan sammenlignes med et drivhustak. Det som er viktig er at den naturlige drivhuseffekten har ført til at temperaturen på jorda er omkring 33 °C høyere enn den ville ha vært uten en atmosfære.

Gassene som absorberer den termiske strålingen fra jorda kalles for drivhithusgasser. Noen av disse er naturlig tilstede i atmosfæren mens andre er sluppet ut av mennesker, de er såkalte antropogene. På grunn av menneskelig aktivitet øker mengden av både naturlige og antropogene drivhusgasser. Det er virkningen av disse som skaper bekymring. Det er verdt å merke seg at nitrogen, oksygen og argon, som utgjør 99,96 volumprosent av atmosfæren, ikke tar del i disse strålingsprosessene, fordi deres absorpsjonsspektere ligger i et annet bølgelengdeområde.

Vår enkle modell gir en god illustrasjon av drivhuseffekten, men den har store svakheter. Vi har antatt at all energitransport skjer ved stråling. Varme transporterer også ved at varm luft beveger seg vertikalt (konveksjon). Transporten av varme skjer dessuten ved turbulente (uordnede) bevegelser. For å forstå energibalansen må denne transporten tas med i tillegg til strålingseffekten. I tillegg er det andre viktige effekter som f eks skyer, havstrømmer, luftforurensninger osv., som er viktig for jordas energibalanse.

Jordoverflaten varmes opp ved at den absorberer sollys. Luften nær bakken varmes så ved varmeledning og begynner å stige. Etter som luften stiger, vil den utvide seg fordi trykket faller. Luftens avkjøles. Når den varme luften stiger, vil kaldere luft synke ned for å fylle "tomrommet". På den måten får vi en kontinuerlig luftbevegelse som gir en balanse, vi kaller det konvektiv likevekt.

I vår drivhusmodell er det balanse mellom solstrålingen som kommer inn og strålingen som forlater toppen av atmosfæren. Figuren under viser de forskjellige komponentene av strålingen som ankommer og forlater atmosfæren. I middel blir  $67+168=235 \text{ W/m}^2$  av solstrålingen absorbert av atmosfæren og bakken. Vi har ikke tatt hensyn til skyer. Skyene reflekterer en del av solstrålingen tilbake til verdensrommet. Dessuten absorberer og emitterer skyene infrarød stråling. På den måte bidrar de til den naturlige drivhuseffekten. Vi vet at temperaturen er høyere når det er skyer sammenlignet med en klar vinternatt.



De forskjellige bidragene til strålingsbalansen

#### Fordypning: Drivhuseffekten på planeten Mars

Mars er mindre enn jorda, og har en mye tynnere atmosfære. Lufttrykket på Mars er mindre enn 1 % av trykket ved jordoverflaten. Atmosfæren består i hovedsak av CO<sub>2</sub>, som er en viktig drivhusgass. Den midlere avstand mellom sola og Mars er 1,52 AU, dvs. ca. 1,5 ganger jordas avstand til sola. Da strålingsfluksen avtar med kvadratet av radien, finner vi at solfluksen (solarkonstanten) ved Mars er  $(1/1,5)^2$  er lik  $\approx 610 \text{ W/m}^2$ . Vi antar at albedoen er lik jordas albedo. Fra dette får vi temperaturen på Mars uten atmosfære lik 206 K eller -67°C. Den observerte temperatur på Mars er ca. -47 °C. Det betyr at den tynne atmosfæren på Mars gir en drivhuseffekt som øker temperaturen med omkring 20 °C.

# Drivhusgasser og aerosoler

Forfatter: Narom

[Drivhusgasser og aerosoler \(60052\)](#)

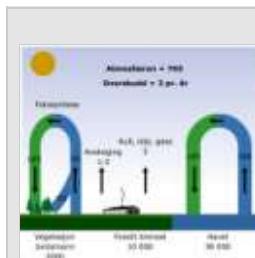
Vi skal i det følgende kort omtale de viktigste drivhusgassene og se litt nærmere på kilder og sluk for gassene. Virkningen av aerosoler (partikler) i atmosfæren vil også bli omtalt. Drivhusgassene blander seg hurtig med de andre gassene i atmosfæren. Mange av disse gassene har lang levetid slik at virkningen blir global. Situasjonen er forskjellig for aerosoler. På grunn av nedbør og tyngdekraften blir effekten av partikkelutslipp, mer lokalt.

## Vanndamp

Vanndamp er den viktigste klimagassen. I atmosfæren opptrer vann i form av gass (vanndamp), som iskrystaller eller dråper i skyer. Som omtalt tidligere vil vanndampen i atmosfæren, i middel, ha en skalahøyde på ca. 2,5 cm. Dens bidrag til drivhuseffekten er meget stor. Vanndampen fører til en forandring i utgående stråling på ca. 100 W/m<sup>2</sup> mot ca. 25 W/m<sup>2</sup> for CO<sub>2</sub>. Vanndampens betydning har fått liten oppmerksomhet i debatten om drivhuseffekten, sannsynligvis fordi forekomsten av vanndamp er lite påvirket av menneskelig aktivitet.

## Karbondioksid (CO<sub>2</sub>)

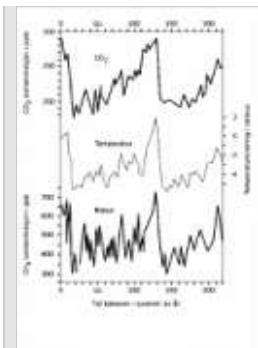
Debatten om drivhuseffekten har vært koncentrert om CO<sub>2</sub>-innholdet i atmosfæren. Karbondioksidet skyldes biologiske, fysiske og antropogene prosesser på jorda. Karbon inngår i mange kretsløp. Det utveksles stadig mellom atmosfæren, havene, biosfæren og noe mer langsomt i sedimenter og bergarter. Mennesker og dyr er en del av dette kretsløpet, og vi bidrar til denne utvekslingen når vi puster. Det blir produsert CO<sub>2</sub> når vi lager bål og fyrer med ved eller når vi bruker kull, olje og gass. I naturen frigjøres CO<sub>2</sub> når organiske materialer som løv, planter og lignende brytes ned aerobt, det vil si med oksygentilgang. Karbonkretsløpet er skissert i figuren. Fordi CO<sub>2</sub> i atmosfæren vil kunne påvirke klima i opptil 100 år framover, er tidsskalen lang.



Karbonets kretsløp

Forfatter: [Narom](#)

Alle tall som angir karbonfluktsene pr. år er gitt i gigatonn (Gt) rent karbon. De fleste tall er temmelig usikre. Det er viktig å være oppmerksom på at karbonet utgjør bare 12/44 av CO<sub>2</sub>-molekylet.



Isprøver

Isprøver som går mer enn 200.000 år bakover i tiden. Her er vist variasjonen i både  $\text{CO}_2$ , metan og temperatur.

### Fordypning: Svingninger i atmosfærens karboninnhold.

Ved fotosyntese tar plantene inn karbondioksid fra atmosfæren, og sammen med lys dannes det oksygen og organisk stoff. Oksygenet blir ført tilbake til atmosfæren, mens karbon bindes i planter og skog. Også i havet foregår fotosyntesen.  $\text{CO}_2$ -innholdet i atmosfæren er fortsatt dårlig kjent. De eneste sikre tallene er mengden av  $\text{CO}_2$  som slippes ut ved forbrenning av fossilt brensel. Utgangspunktet for klimadebatten er at vi har fått en stadig økning av  $\text{CO}_2$  i atmosfæren pga. menneskelig aktivitet. Summen av utslippene til atmosfæren er beregnet til 157 Gt rent karbon pr. år, mens opptak fra atmosfæren svarer til 154 Gt. Forskjellen på 3 Gt karbon blir tilbake i atmosfæren. Det tilsvarer da en øking i atmosfæren på 1; 5 ppm pr. år.

Karbondioksid har økt fra  $\approx 280$  ppm før den industrielle revolusjon til  $\approx 360$  ppm i 1998. I karbondioksidmolekylet er det 1 karbonatom og 2 oksygenatomer. Karbonatomet har atomvekten 12 mot oksygenatoms 16. Samlet atomvekt for  $\text{CO}_2$ -molekylet blir derfor 44. Det betyr at mengden rent karbon i  $\text{CO}_2$  utgjør 12/44 deler, eller 27,3 % av vekten. En annen nyttig omregningsfaktor er en  $\text{CO}_2$  mengde på 1 ppm tilsvarer 7,97 Gt  $\text{CO}_2$  eller 2,17 Gt rent karbon.

Det er store sesongvariasjoner i  $\text{CO}_2$  konsentrasjonen. Det skyldes at fotosyntesen tapper atmosfæren for karbon i vekstsesongen. Deler av den føres tilbake når plantene brytes ned høst og vinter. I atmosfæren over barskogbeltet er svingningene omtrent 15 ppm pr. år. Mange forskere hevder at halvparten av økningen i atmosfæren av  $\text{CO}_2$  skyldes de antropogene utslippene.

Havene inneholder 50 ganger så mye karbon som atmosfæren. For å kartlegge utvekslingen mellom havet og atmosfære må man benytte modeller. Havets opptak av  $\text{CO}_2$  fra atmosfæren skjer ved

1. transport av CO<sub>2</sub> gass gjennom havoverflaten
2. kjemisk vekselvirkning med oppløst uorganiske karbon
3. transport fra overflatevannet (blandingslaget) ned til dyphavet.

Fluksen av CO<sub>2</sub> fra havet til atmosfæren er stor. Selv om havområdene spiller en vesentlig rolle er deres bidrag ikke kartlagt i detalj. Hvis vi kun ser på de CO<sub>2</sub> utslippenes meneskene er ansvarlig for, kan vi sette opp et slags regnskap for både kilder og sluk.

Målinger av CO<sub>2</sub> i atmosfæren begynte omkring 1870. For å få informasjon om CO<sub>2</sub> mengden langt tilbake i tid, må vi derfor benytte indirekte metoder. Ved å analysere luften i isbreer får vi informasjon om CO<sub>2</sub>-innholdet på den tid isen ble dannet.

I Antarktis og Grønland er det boret ned til over 2000 meter. Det nederste laget ble dannet for omkring 200 000 år siden. Figuren til viser at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen ved slutten av siste istid var omlag 180-190 ppm, eller omlag 60 % av den preindustrielle verdien. Figuren viser også at konsentrasjonen økte raskt med temperaturen ved overgangen fra istid til mellomistid.

### Metan (CH<sub>4</sub>)

Etter vanndamp og CO<sub>2</sub> er metan den viktigste drivhusgassen i atmosfæren. Metan bidrar med ca. 15 % til dagens oppvarming. CH<sub>4</sub> er en svært reaktiv gass. Gjennom kjemiske reaksjoner vil den også påvirke andre drivhusgasser i atmosfæren, spesielt ozon. Metan dannes i hovedsak ved ufullstendig forbrenning, dvs. anerobt nedbrytning av organisk materiale. Den totale produksjonen er på ca. 1500 Mt pr. år. De antropogene kildene er større enn de naturlige. Naturlige kilder er i første rekke våtområder, termitter og havet.

Antropogene kilder er naturgass, kullgruver og petroleumsindustri. Videre har vi gjæring i tarmer, rismarker, brenning av biomasse, jordfyllinger, dyreavfall og søppel. Kjemiske reaksjoner mellom CH<sub>4</sub> og OH i troposfæren representerer det største tapet. Informasjon om atmosfærens innhold av metan i tidligere tider kan en også få ved å studere borekjerner fra isbreer.

### Lystgass (N<sub>2</sub>O)

Lystgass er en viktig drivhusgass. Den produseres i hovedsak ved biologiske prosesser i jord og vann. Gassen fjernes ved fotodissosiasjon og kjemiske reaksjoner med atomært oksygen. Jordsmønnet i tropiske skoger antas å være den viktigste kilden til lystgass. For disse områdene er det vanskelig å skille mellom naturlige og antropogene kilder.

De største naturlige kildene er havet, skog og beiteområder. De viktigste antropogene kildene er brenning av biomasse, industri og husdyr. En antar at de naturlige kildene slipper ut omlag 50 % mer pr. år enn de antropogene kildene. Et sluk for lystgass er fotodissosiasjon med en bølgelengde på 180–230 nm. Den kan derfor bare skje høyt i stratosfæren. Konsentrasjonen av N<sub>2</sub>O har steget de siste årene og var i år 2000 omlag 315 ppb.

### Klorfluorkarboner og haloner

De beryktede KFK-gassene inneholder klor (Cl), fluor (F) og karbon (C). De blir også kalt freoner. Nær beslektet med disse er forbindelser som inneholder brom. Disse kalles haloner. Freoner og haloner er betydelige drivhusgasser. Flere av disse har lang levetid (mer enn 50 år) i atmosfæren. Noen av komponentene som inneholder klor og brom er under streng regulering for å beskytte ozonlaget.

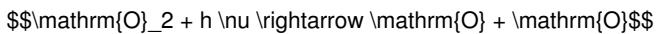
KFK-gassene er i sin helhet antropogene. De er svært stabile, de brenner ikke, eksploderer ikke, og er ikke giftige. De ble derfor regnet som svært miljøvennlige. Derfor ble de benyttet i produksjonen av isolasjonsmateriale (skumplast), i kjøleindustrien, ved renseanlegg, til brannslukking osv. "Baksiden av medaljen" er at de bryter ned ozon. Fra 1. januar 1996 har det vært forbudt å slippe ut KFK-gasser i Norge.

### Ozon (O<sub>3</sub>)

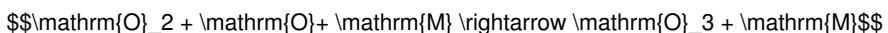
Ozon er også en drivhusgass. Omlag 90 % av ozonet er i stratosfæren og 10 % i troposfæren (jfr avsnitt 6.8). Ozon absorberer både UV-stråling og IR-stråling fra jorda.

Ozonlaget viser en markert årstidsvariasjon. Mengden i vinter- og vårmånedene er redusert. For resten av året og over ekvatorområdene er endringene små. De antropogene ozonbidragene skyldes reaksjoner med karbonmonoksid (CO), nitrogenokside (NO<sub>x</sub>) og hydrokarboner (NMCH). Disse gassene er i stor grad antropogene.

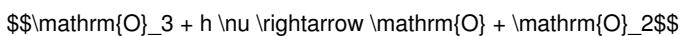
Høydefordelingen av ozon viser et maksimum ved ca. 20 km. Mengdene er små. Dersom all ozon i atmosfæren komprimeres til et lag med atmosfærisk trykk, vil tykkelsen av dette laget være ca. 4 mm. Vi skal her kort beskrive hvordan ozon dannes og destrueres. Den primære kilden til ozon er dissosiasjon av O<sub>2</sub> ved ultrafiolett stråling i bølgelengdeområdet 200 – 300 nm:



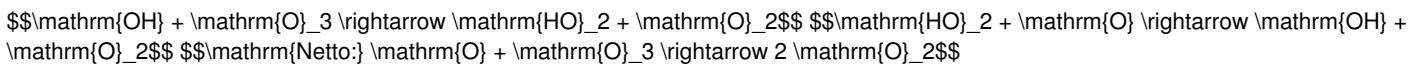
Atomært oksygen rekombinerer hurtig med molekulært oksygen. Ozon dannes i en trelegeme-kollisjon der det tredje molekyl M er nødvendig for å tilfredsstille bevarelse av bevegelsesmengde og energi i prosessen:



Nedbryting av ozon kan skje ved en rekke prosesser. Den viktigste naturlige prosessen er dissosiasjon ved ultrafiolett lys:



Videre kan sporstoffer som OH, NO og ClO inngå i katalytiske reaksjoner av typen



Vi ser at den nedbrytende bestanddel gjendannes og kan ta del i nye reaksjoner. Nitrogenoksid (NO) dannes bl. a. ved kraftig protonnedbør i atmosfæren i forbindelse med visse typer utbrudd på sola. ClO kan dannes ved fotolyse av freongasser og er sannsynligvis en viktig kilde til antropogen forandring i ozonlaget i stratosfæren. Dynamiske prosesser er svært viktig for transport av ozon, og hele ozonbalansen er svært komplisert.

### Fordypning: Svovelheksafluorid

Svovelheksafluorid ( $SF_6$ ) er også en drivhusgass. Den har en levetid i atmosfæren på omkring 3000 år.  $SF_6$  er en menneskeprodusert gass. Den brukes i elektrisk utstyr med høye spenninger, som f.eks. til strømbryter eller til å isolere strømledere. Trass i omfattende forskning har man ikke funnet frem til egnede erstatningsstoffer. I 1995 utgjorde utsippene anslagsvis 4600 tonn.

## Partikler i atmosfæren – aerosoler

I de senere årene er det blitt klart at små partikler (kalt aerosoler, de er større enn molekyler) i atmosfæren spiller en viktig rolle for været og klimaet. Aerosolene blir ført med vindsystemene i atmosfæren, men pga. tyngdekraften og nedbør spredes de ikke over store avstander. De påvirker strålingen fra sola ved absorpsjon og spredning. Aerosolene absorberer en del stråling som ellers ville bli absorbert av bakken. Dermed flyttes den delen av absorpsjonsenergien opp i atmosfæren. Aerosolene øker klodens albedo, men bare på dagtid. De vil dermed føre til en oppvarming.

Noen aerosoler er dannet fra utsipp fra sjøsalt, vulkanutbrudd, jordstøv og spesielt industrielt støv og sot, mens andre dannes i atmosfæren fra gasser.

### Fordypning: Aerosoler

Den totale effekten av aerosoler er avhengig av forholdet mellom absorpsjon og tilbakespredning. Hvis bakkealbedoen er liten, kan aerosolene virke avkjølende (dvs. mer stråling blir spredt tilbake til verdensrommet), mens hvis den er stor, er det sannsynlig at aerosolene vil virke oppvarmende. Virkningen av aerosolene er størst om dagen. Drivhusgassene derimot, virker hele døgnet. Størrelsen på aerosolene er viktig. Den påvirker de optiske egenskapene og bestemmer hvor lenge partiklene oppholder seg i atmosfæren. Små partikler med diameter mindre enn 1 mikrometer, vil stort sett oppholde seg permanent i atmosfæren. Det skyldes de såkalte Brownske bevegelser, dvs. stadige støt mot andre partikler. Det fører til at aerosoler holder seg så lenge i atmosfæren. Noen aerosoler i atmosfæren er dannet fra utsipp av støv, sjøsalt og fra vulkaner. Andre aerosoler dannes i atmosfæren fra gasser. Vi har også antropogene kilder som industrielt støv, sot, brenning av biomasse og nitrater. Utsipp av sotpartikler er spesielt viktig, fordi de absorberer mye sollys. Spredningseffekten av hver partikkelen er liten, men på grunn av det store antallet, er effekten på energibalansen betydelig. Kull gir mer partikelutsipp enn oljefyring. Montering av moderne renseutstyr har forbedret situasjonen, men i mange land er utsippene fortsatt store. Det største antropogene bidraget kommer fra industrien. Omtrent 90 % av svovelutslippene skjer på den nordlige halvkule.

## Den relative betydning av drivhusgassene

Mengden av de forskjellige drivhusgassene varierer mye. For å unngå en forsterkning av drivhuseffekten, er det viktig å vite hvilke tiltak som er mest effektive. Effekten av en drivhusgass er bestemt av gassens absorpsjonsevne og mengden av gassen. De forskjellige gasser absorberer stråling innenfor bestemte bølgelengdeområder. Hvis en gass absorberer innenfor et område hvor det er lite stråling, enten fordi den allerede er absorbert eller fordi det i utgangspunktet er lite, så betyr utsipp av gassen mindre enn om det var mye stråling i det samme spektralområdet. Det er allerede så mye  $CO_2$  i atmosfæren at nye utsipp ikke får full effekt. Hvis vi øker  $CO_2$ -konsentrasjonen med 100 % (en dobling) så vil absorpsjonen bare øke med 30 %. For andre drivhusgasser, som det er lite av i atmosfæren, øker absorpsjonen lineært med konsentrasjonen.

Hvor lenge drivhusgassen oppholder seg i atmosfæren er viktig. En gass som oppholder seg i atmosfæren i 100 år er viktigere for drivhuseffekten enn en gass som bare oppholder seg der i en uke. Vi må derfor prioritere en reduksjon av utsippene til de gassene som har lengst oppholdstid i atmosfæren.

## Tiltak mot klimaendringer

Forfatter: Narom

[Tiltak mot klimaendringer \(60071\)](#)

I klimadebatten er det både viktig og nødvendig å konsentrere seg om globale forhold. Det vi vet med sikkerhet er at konsentrasjonen av en rekke klimagasser i atmosfæren økte gjennom hele forrige århundre.

Atmosfæren synes å ta opp mer og mer CO<sub>2</sub> etter som tiden går. Selv om vi ikke øker utslippene av CO<sub>2</sub>, vil mengden av CO<sub>2</sub> i atmosfæren øke i mer enn 30 år framover.

Derfor er det mest sannsynlig at CO innholdet i atmosfæren vil øke betydelig, opp mot 600 ppm, i dette århundre.

Konsekvensene av økt drivhuseffekt er fortsatt usikre. For tiden finnes en lang rekke med mer eller mindre dystre spådommer og mer eller mindre kvalifiserte gjetninger.

Det mest logiske tiltaket vil være å redusere utslippene av drivhusgasser. (Selv om vi klarer å redusere utslippene, vet vi ikke helt sikkert hva effekten av dette vil bli.) Fordi utslippene griper inn i vårt daglige liv, er reduserte utslipp vanskelig å gjennomføre. Det kan bli smertelige prosesser. Å minke befolkningsveksten vil også være et effektivt tiltak, fordi det vil redusere energiforbruket. Det er nok langt mer sannsynlig at befolkningen fortsatt vil øke. Økt konsentrasjon, vil i hht. eksisterende modeller gi økt temperatur, men tidsskalene for klimaforandringer er heldigvis relativ lange. Økt drivhuseffekt vil skape betydelige problemer både hva gjelder bo (et høyere havnivå kan få dramatiske konsekvenser) og leveforhold, samt marginale forhold for matvareproduksjonen for kommende generasjoner.

Hovedkilden til de menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslippene er bruk av fossilt brensel. Det vil derfor være viktig å satse på energikilder som gir mindre utslipp, spesielt redusere bruken av kull.

I hht. Kyoto avtalen fra 1997 skal man redusere utslippene av CO<sub>2</sub> og andre drivhusgasser med 5,2 % i forhold til 1990 nivået innen 2012. (Fram til år 2000 har Norge økt utslippene med ca. 7% i forhold til 1990 nivået.)

Vi må velge mellom reduksjon, stabilisering eller moderat vekst.

Er det mulig (kan vi sette i gang aktive inngrep) og ønskelig å redusere drivhuseffekten? En økning av drivhuseffekten vil gi bedre klima for enkelte regioner, men dårligere for andre. Det samme kan man si om en reduserer drivhuseffekten. Til tross for usikre klimaprognosører – det er fortsatt flere ukjente faktorer, er scenarioene så dramatiske at man snarest må starte/utvide mottiltakene. Mange slutter seg til føre-var-prinsippet, men det kan også føre til betydelige problemer. Det som er viktig er at innsatsen må være godt planlagt og mest mulig effektiv på global skala.

Hvilke virkemidler har samfunnet for å stoppe/redusere drivhuseffekten? Noen tiltak vil være fornuftige og ønskelige ut fra andre hensyn enn bare klimaet. En mer fornuftig bruk av fossilt brensel og andre ikke-fornybare ressurser vil være ønskelig. Å helt stoppe bruken av KFK-gasser, vil redusere drivhuseffekten.

Fordi levetiden for metan i atmosfæren er relativ kort, bare noen få år, vil en reduksjon i utslippene fort få effekt. Metan er en mer effektiv drivhus gass enn CO<sub>2</sub>. En slik reduksjon vil heller ikke få så store konsekvenser for livet på jorda. Alle KFK-gassene er produsert av mennesker. Derfor bør det ikke koste for mye å erstatte de med andre ufarlige gasser.

Vi vet at alle planter tar opp CO<sub>2</sub> ved fotosyntesen. Derfor er økte skogs- og landbruksarealer viktig. Havet spiller en viktig rolle i karbonets kretsløp. Ved gjødsling av havet vil mengden av plankton og alger øke og havet vil da kunne ta opp enda mer CO<sub>2</sub>.

Å stoppe hogging av urskogen i verden samt planting av ny skog vil redusere veksten av CO<sub>2</sub> i atmosfæren. Skogplantningsprosjekter aksepteres som CO<sub>2</sub>-reduserende tiltak.

## Jordas permanente magnetfelt

Forfatter: Narom

[Jordas permanente magnetfelt \(60075\)](#)

Jorda har et magnetfelt, jordmagnetfeltet,  $\vec{B}_J$ . Feltet er ikke bare knyttet til jorda, men strekker seg langt utenfor atmosfæren. Magnetfeltet er en del av jordas romdrakt. Det beskytter oss mennesker mot kosmisk stråling, dvs. ladde partikler med høy energi.

## Innledning og historikk

Forfatter: Narom

[Innledning og historikk \(60079\)](#)

Jordmagnetfeltet har vært benyttet til retningsangivelser i mer enn 1000 år. Kompasset, i ulike former, var et godt hjelpemiddel for de gamle sjøfarere og det er uunnværlig for dagens orienteringsløpere eller for en fjellvandrer i tåke og uvær. Kompasset har også gitt oss verdifull informasjon om jordmagnetfeltet.

På 1500-tallet ble en klar over at kompassnålen ikke pekte nøyaktig mot den geografiske nordpol. Sjøfolk og kartmakere lærte seg å ta hensyn til dette avviket som ble kalt misvisningen eller deklinasjonen. Misvisningen er ikke den samme alle steder. De første dokumenterte måling av misvisningen i Norge ble utført allerede i 1596 av Willem Barents.

Den vitenskapelige utforskningen av jordmagnetfeltet startet med engelsmannen William M. Gilberts bok "De Magnete" som ble publisert i år 1600. Gilbert laget en magnetisk modell av jorda og viste ved hjelp av et kompass at magnetfeltets retning varierte med hvor på jorda en oppholdt seg. Han konkluderte da: "Magnus magnes ipse est globus terrestris", dvs at jorda selv er en stor magnet.

På 1800-tallet fant man at jordmagnetismen endrer seg med tiden. Det er variasjoner både i retning og amplitude over år, tiår og århundrer. Omkring 1820 oppdaget Hans Christian Ørsted (1777–1851) at elektrisk strøm produserte magnetiske felt. I 1826 skrev han en avhandling hvor det står at magnetiske variasjoner i forbindelse med nordlys kunne skyldes elektriske strømmer.

Pioneren i norsk naturvitenskap, Christopher Hansteen (1784–1873), fikk internasjonal oppmerksomhet på grunn av sine studier av jordmagnetismen. Hansteen var utdannet ved Universitet i København og hadde et nært samarbeid med professor Ørsted. I 1812 vant han en prisoppgave om hvordan man skulle forklare jordas magnetfelt. I 1817 ble han utnevnt til den første professor ved vårt nye universitet, i fagene matematikk og astronomi.

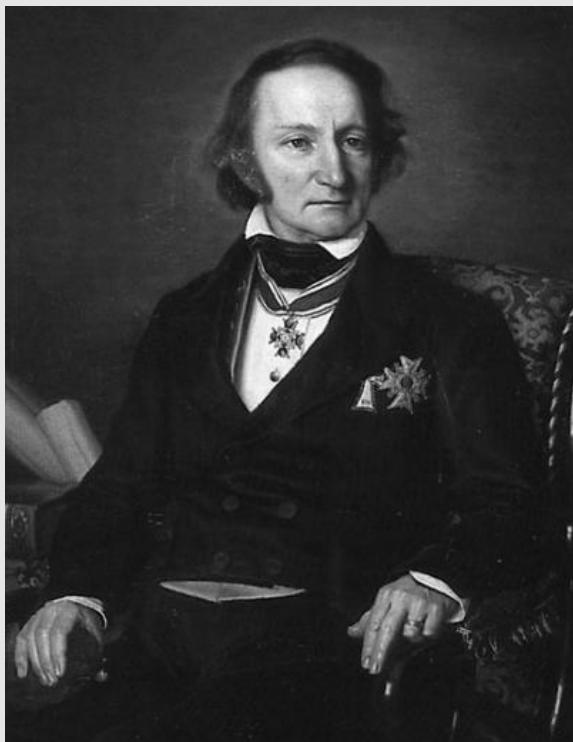


Gilbert



De Magnete

William M. Gilbert (1544–1603). Gilbert startet utforskningen av jordas magnetfelt. I boken "De Magnete" fra år 1600 (den ble oversatt og utgitt på engelsk i år 1900) demonstrerte han på en overbevisende måte at jorda er en stor magnet og at magnetpolene avviker betydelig fra de geografiske polene. Forsiden til andreutgaven av boken er vist i den nederste figuren.



Christopher Hansteen

Pioneren i norsk naturvitenskap, Christopher Hansteen (1784–1873). I 1814 ble han ansatt ved Universitetet i Kristiania og 3 år senere ble han professor i astronomi og geofysikk. Hans navn er særlig knyttet til utforskingen av jordas magnetfelt. Hansteen gjennomførte flere ekspedisjoner. Mest kjent er en 25 måneders reise til Sibir og Mongolia for å undersøke om jorda har to eller flere magnetiske aksepoler. Hansteen er også kjent for sitt arbeid med almanakken og for et nytt, moderne astronomisk observatorium som ble bygget i Kristiania omkring 1830. (Maleri av Johan Gørbitz)

Systematiske observasjoner av jordas magnetfelt begynte omkring 1840 samtidig som C. F. Gauss publiserte den første realistiske modell for å beskrive det geomagnetiske feltet. Under Det første internasjonale polaråret i 1882–83 ble oppmerksomheten fokusert på internasjonalt samarbeid for å kartlegge både steds- og tidsvariasjoner av jordas magnetfelt.

Magnetfeltet i Norge ble først utforsket av Christopher Hansteen. Han opprettet flere målestasjoner. På grunnlag av en stor mengde data tegnet han de første realistiske kart over magnetfeltet.

### Måleenheter for magnetfelt

Enheten for magnetisk intensitet eller magnetisk fluksstetthet er Tesla (T), eller Weber per kvadratmeter [ $\text{Wb}/\text{m}^2$ ]. Fordi Tesla er en stor enhet, bruker vi ofte nanotesla ( $\text{nT}$ ) =  $10^{-9} \text{ T}$ .

### Partikkelbevegelse i magnetfeltet

Magnetfelt brukes til å styre elektrisk ladde partikler fordi deres bevegelse kontrolleres av feltet. Derfor er magnetfeltet veiviser for elektriske partikler. Jordas magnetfelt dominerer bevegelsen til elektrisk ladde partikler i det nære verdensrom og er av avgjørende betydning for fysikken i den øvre atmosfære.

Fysikken bak dette er at ladde partikler som beveger seg i et magnetfelt utsettes for en kraft, kalt Lorentz-kraften, som går  $90^\circ$  på både hastighetsretningen og magnetfeltretningen. Lorentz-kraften er gitt ved:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$
 Her er  $\vec{B}$  jordas magnetfelt,  $q$  er partikkelens ladning og  $\vec{v}$  er dens hastighet. Retningen på kraften, på en ladd partikkel i et magnetfelt, er illustrert i figuren under. Kraften er loddrett på både  $\vec{v}$  og  $\vec{B}$ . Størrelsen av denne kraften blir følgelig:  $F = q v B \sin \alpha$  hvor  $\alpha$ , også kalt "pitchvinkelen", er vinkelen mellom partikkelens bane og magnetfeltet. Partikler som beveger seg på skrå i forhold til  $\vec{B}$ , vil bevege seg i spiralformede baner langs magnetfeltet. Positive ioner og negative elektroner vil rotere motsatt vei rundt feltlinjene. Rotasjonsretningen vil variere med retningen på  $\vec{B}$ . Partikkelnedbøren gir opphav til nordlys og sydlys, magnetiske forstyrrelser, og elektriske strømmer.

Partikkelstrålingen fra sola, som består av elektroner (e<sup>-</sup>), protoner (H<sup>+</sup>) og alfapartikler (He<sup>++</sup>), strømmer mot jorda med stor fart. De blir avbøyd i jordmagnetfeltet. slik at magnetfeltet gir oss en beskyttelse mot partikkelstrålingen.

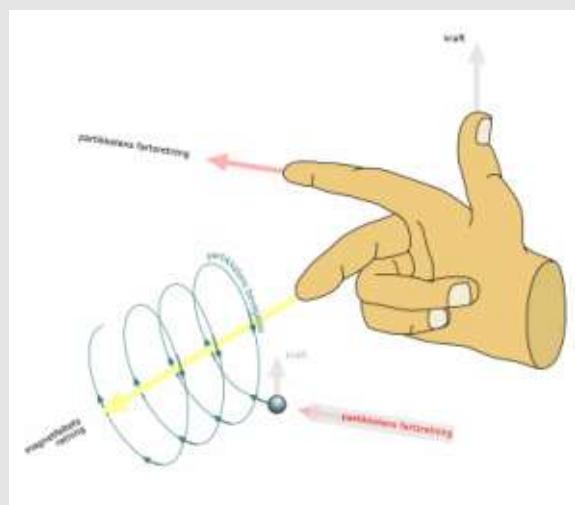
På grunn av magnetfeltets form er denne avbøyningen, eller skjermingen, ikke perfekt. Spesielt slipper partiklene lett inn i atmosfæren i polområdene. Om partiklene beveger seg langs magnetfeltlinjene virker det ingen magnetisk kraft på dem. Det var også på den måten partiklene slapp ut fra solas overflate; de strømmet ut langs åpne magnetfeltlinjer, dvs. i koronahullene.

Jordmagnetfeltet kan sperre inne ladde partikler slik at vi får strålingsbelter.



Gauss

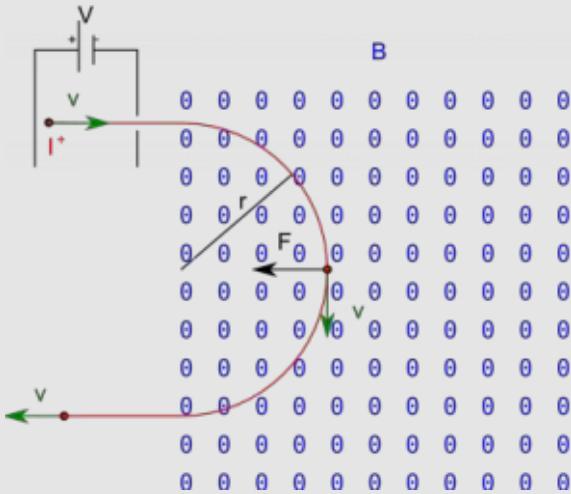
Carl Friedrich Gauss (1777–1855). Gauss var professor og direktør for det magnetiske observatoriet i Göttingen i Tyskland. Han utarbeidet teorier som har vært av grunnleggende betydning for senere geomagnetisk forskning. Delvis som følge av Christopher Hansteens virksomhet konstruerte han pålitelige instrumenter for jordmagnetiske observasjoner. Maleri av Christian Albrecht Jensen (1792 - 1870)



Høyrehåndsregelen

En elektrisk partikkell styres i en spiralbane langs magnetfeltet. Dersom magnetfeltets retning er langs langfingeren i figuren, vil en elektrisk ladd partikkell som beveger seg i pekefingerens retning bli utsatt for en kraft i tommelfingerens retning, dvs. normalt både på partikkellens bevegelsesretning og magnetfeltets retning. Dette kalles høyrehåndsregelen for magnetkraften. En partikkell med negativ ladning vil bevege seg i motsatt retning.

### Eksempel: Ion i magnetfelt



Ion i magnetfelt

Et ion med ladning  $q = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  blir akselert fra 0 til 90 V og går inn i et homogent magnetfelt,  $B = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ . Magnetfeltet,  $B$ , står vinkelrett på hastigheten,  $v$ . Banen til ionet beskriver en halvsirkel med radius  $r = 4,9 \text{ cm}$ .

- Finn den kinetiske energien til ionet.
- Finn massen til ionet, og prøv å avgjøre hvilket ion det er.

Svar:

a)

$$E_k = q \cdot U = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 90 \text{ V} = 1,44 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

b) For en sirkelbane gjelder det at

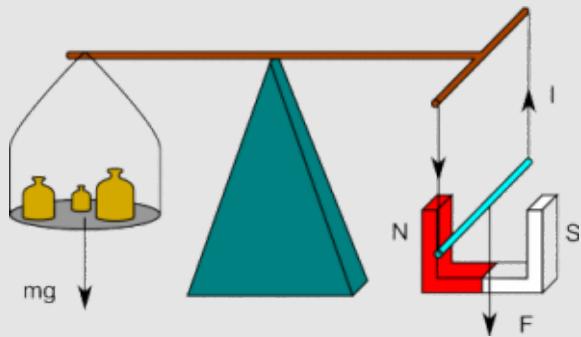
$$F = ma = m \frac{v^2}{r}$$

Og den eneste kraften er lorentzkraften  $F = q \cdot v \cdot B$  slik at vi får:

$$m \frac{v^2}{r} = q \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad m = \frac{qB}{v} \quad \text{og} \quad E_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{(qvB)^2}{r^2} = \frac{1}{2} \frac{(4,9 \cdot 10^{-2} \text{ T})^2}{(0,049 \text{ m})^2} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ T} \cdot 1,44 \cdot 10^{-17} \text{ J} = 1,67 \cdot 10^{-17} \text{ kg}$$

Ionet er en  $\text{H}^+$  partikkell.

## Eksempel: Strømvekt



Strømvekt

Om vi sender 1,5 A gjennom lederen i strømvekten, må vi legge på 250 g i lodd for å få likevekt.

- Finn retningen på strømmen.
- Finn magnetisk fluksstetthet,  $B$ , mellom polene på magneten.

Svar:

a) I vår store stavmagnet peker flukslinjene vannrett fra N mot S. Fra høyrehåndsregelen må derfor  $I$  peke lodrett inn i papirplanet, som skissert i figuren.

b) Kraften fra magnetfeltet går lodrett nedover

$$F = m \cdot g = 250 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Lorentzkraften blir i dette tilfelle

$$F = I \cdot \ell \cdot B$$

$$B = \frac{F}{I \cdot \ell} = \frac{2,45 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{1,5 \text{ A} \cdot 0,1 \text{ m}} \approx 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

## De magnetiske polene

Forfatter: Narom

[De magnetiske polene \(60125\)](#)

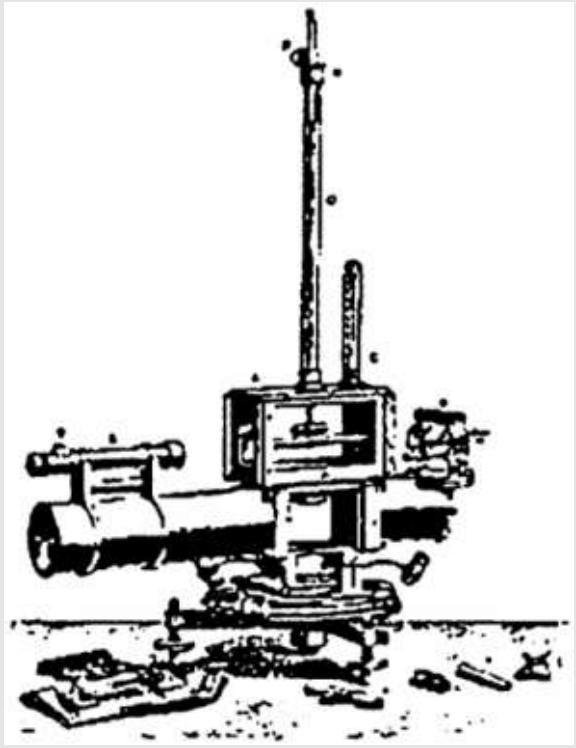
1. juni 1831 er "den magnetiske nordpols fødselsdag". Det var James Clark Ross på Victory-ekspedisjonen som var først på den magnetiske polen. Polpunktet ble da bestemt til  $70^{\circ} 5' 17''$  N og  $96^{\circ} 46' 45''$  V. Det tok riktignok tid før det ble klart at det egentlig var den magnetiske sydpol Ross hadde oppdaget. Den magnetiske nordpol ligger i Antarktis.

Fra ca. 1910 er det gjennomført flere ekspedisjoner til de magnetiske polene, og fra 1948 har magnetpolene vært systematisk overvåket. Vi har nå gode målinger over hvordan feltet varierer med tiden og hvordan magnetpolene flytter seg. For tiden driver polen på den nordlige halvkule mot nordvest med en hastighet nordover på ca. 40 km per år og vestover med ca. 5 km per år. I 1996 lå den ved Kong Christian Island og posisjonen var  $79,2^{\circ}$  N og  $105,7^{\circ}$  V. I 2001 var den flyttet seg enda en bit nordover, og lå da på  $81,3^{\circ}$  N og  $110,8^{\circ}$  V. Magnetpolen har flyttet seg ca. 1500 km i løpet av de 150 år som er gått siden J. C. Ross fant den i 1831.



### Fordypning: Gjøa-ekspedisjonen

Gjøa-ekspedisjon (1903–1906), som var ledet av Roald Amundsen, hadde som et av sine mål å finne igjen den magnetiske pol. De magnetiske instrumentene som ble brukt, et av disse er vist i fiugeren under, hadde en langt større presisjon enn de som ble brukt av Ross på Victory-ekspedisjonen. Det ble utført målinger på Kong Williams Land i Gjøahavn og ved stasjonen i King Point. De hadde kontinuerlige målinger i mer enn 700 dager og gjennomførte dessuten flere slede-ekspedisjoner til området rundt selve polen for å måle magnetfeltet. Basert på observasjoner kan vi lage en tabell (under) som angir koordinatene for den magnetiske pol slik Amundsen lokaliserte den i 1904. Disse observasjonene synes å være av god kvalitet, men det er noe usikkert hvordan lokale magnetiske avvik påvirker resultatet.



Et av de magnetiske instrumentene som ble brukt på Gjøa-ekspedisjonen

Basis for bestemmelsen	Posisjon nord	Posisjon vest
Fra måling av deklinasjon	75° 35'	96° 10'
Fra måling av horisontal intensitet	75° 40'	96° 05'
Fra måling av inklinasjon	75° 40'	96° 55'

Bestemmelse av den magnetiske pol fra Amundsens data

# Variasjoner i jordas magnetfelt

Forfatter: Narom

[Variasjoner i jordas magnetfelt \(60127\)](#)

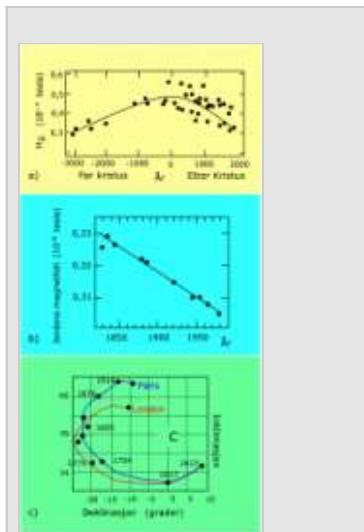
Jordas magnetfelt er ikke stabilt. Stadig skjer det endringer, noen store og langsomme mens andre er små og hurtige. I tillegg flytter magnetpolene seg fra år til år.

Parallelt med studiet av magnetfeltet i verdensrommet har utviklingen av teknikker for innsamling og tolking av arkeologiske (brent leire) og geologiske data (magnetisk materiale i vulkanske bergarter) gitt ny informasjon om hvordan magnetfeltet har variert. Elektriske strømmer (flytende jern og nikkel) i jordas indre er hovedkilden til jordmagnetfeltet. Strømmer i jordas indre varierer langsomt, over århundrer eller enda lengre tidsperioder. Figuren illustrerer noen av disse variasjonene. Seismologiske målinger har vist at jordas faste materie går over til flytende i en dybde mellom ca. 3.000 og 5.000 km. Nøyaktig hvordan magnetfeltet forandres og vedlikeholdes er fortsatt ikke kjent.

I løpet av de siste 5,5 millioner år har magnetfeltet skiftet retning flere ganger. Det innebærer at kompassnålen snur 180°. I gjennomsnitt har dette skjedd hvert 500.000 år. Målinger som er gjort tyder på at skiftet i polaritet skjer ved at feltet gradvis avtar mot null og at det så bygger seg opp igjen med motsatt polaritet.

I perioder med svakt magnetfelt vil den høyenergetiske kosmiske strålingen ved jordoverflaten øke, noe som har betydning for livet på jorda. Det er ting som tyder på at når magnetfeltet har snudd, så har det samtidig skjedd klimaforandringer.

Forandringen i jordas magnetfelt er vist i figur a og b. Intensiteten avtar og retningen sett fra Skandinavia blir mindre vestlig for hvert år. Som figuren viser har feltet avtatt med omkring 10 nT per år. Hvis det fortsetter slik vil feltet bli nær null om 2-3000 år. Forandringene er ikke konstant i tid. De siste 30-40 årene har intensiteten av feltet avtatt mye hurtigere. Om det vil fortsette på samme måte, vil feltet være nær null om bare 1000 år.



Variasjoner i jordas  
magnetfelt

Magnetfeltet de siste 5000 år er vist i figur a, og i de siste 150 år i figur b. Feltet nær ekvator, i figur a, er bestemt fra målinger på arkeologiske prøver, spesielt brent leire. I figur B er feltet bestemt ved direkte registreringer. Feltet avtar med omkring 10 nT per år. Variasjoner i magnetfeltets retning, deklinasjon og inklinasjon, for henholdsvis London og Paris, er vist i figur c. Nøyaktigheten i observasjonene er god fra ca. 1850. Som vi ser har misvisningen endret seg med over 30° i løpet av dette tidsrommet.



## De magnetiske elementene

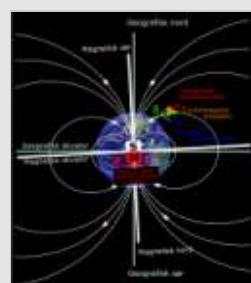
Forfatter: Narom

[De magnetiske elementene \(60130\)](#)

Nordpilen i kompasset peker mot nord. Derfor kalles denne retningen magnetisk nord. Pilen i kompasset viser retningen til den magnetiske polen på nordlige halvkule. Dette samsvarer vanligvis ikke med retningen til den geografiske polen.

Det geomagnetiske feltet  $\vec{B}_J$ , i et vilkårlig punkt i rommet, angis ved retning og feltstyrke. Fordi  $\vec{B}_J$  på den nordlige halvkule peker mot jorda, ligger den magnetiske sydpol på den nordlige halvkule, figuren over. Figuren viser også hvordan  $\vec{B}_J$  kan deles i en vertikal komponent  $Z$ , og en horisontal komponent  $H$ . Vinkelen mellom  $H$  og  $\vec{B}_J$  er inklinasjonen, også kalt hellingsvinkelen.

For å bestemme  $\vec{B}_J$  nøyaktig, må vi dekomponere feltet i tre komponenter. Dette er vist i figurene over og til høyre, for den nordlige halvkule.  $\vec{B}_J$ ,  $Z$  og  $H$  er her markert med grønne piler, og vinkelen mellom dem, inklinasjonen, er markert med lysgrønt.



Modell av jordmagnetfeltet

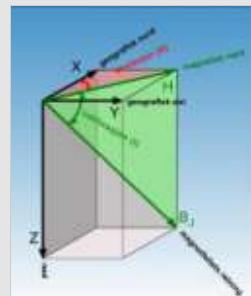
Forfatter: [Narom](#)

Vinkelen, i horisontalplanet, mellom retningen til magnetisk nord og geografisk nord kalles deklinasjonen ( $D$ ), og er markert med rødt i figuren. Inklinasjon er altså en vinkel i vertikalplanet, mens deklinasjonen er en vinkel i horisontalplanet. Deklinasjonen kalles også for misvisningen.

Det geomagnetiske feltet kan også angis som verdien av tre komponenter  $X$ ,  $Y$  og  $Z$  som står normalt på hverandre. I følge internasjonal konvensjon skal  $X$ -aksen peke mot geografisk nord,  $Y$ -aksen mot geografisk øst og  $Z$ -aksen peke mot jordas sentrum (nadir).

Deklinasjon og inklinasjon måles i grader eller radianer. Deklinasjonen er positiv øst for geografisk nord, mens inklinasjonen er positiv nedover.

Settet  $H$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $D$  og  $I$  kalles de magnetiske elementene. Vertikalplanet gjennom  $H$  (grønt) kalles det magnetiske meridianplanet. Det jordmagnetiske feltet beskrives ofte ved komponentene  $H$ ,  $D$  og  $Z$  eller ved  $X$ ,  $Y$  og  $Z$ . Om for eksempel  $H$  og  $I$  er kjent, kan vi finne  $Z$  fra ligningen  $Z = H \cdot \tan I$ .



Magnetfeltkomponenter

Oppdeling av jordmagnetfeltet (på den nordlige halvkule) i komponenter.

## Teoretisk modell av jordas magnetfelt

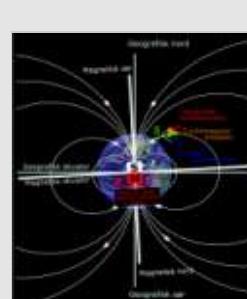
Forfatter: Narom

[Teoretisk modell av jordas magnetfelt \(60142\)](#)

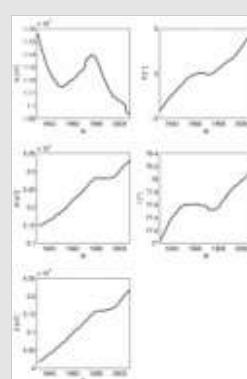
Det er praktisk umulig, og heller ikke nødvendig, å utføre magnetiske observasjoner alle steder på jordoverflaten. Man forsøker i stedet å lage magnetiske kart ved hjelp av matematiske modeller og de observasjonene en har.

Omkring 1980 var det 250 magnetiske observatorier i kontinuerlig drift, hvorav 7 i Norge. Det mest kjente er i Tromsø. Vi beskriver jordas magnetfelt ved hjelp av en modell der vi antar at feltet nær jordoverflaten tilnærmet kan betraktes som feltet fra en dipol i jordas sentrum, eller en homogen magnetisert kule i dipolaksens retning.

En tenker seg en magnetisk dipol (en stavmagnet) i jordas indre som danner en vinkel på tilnærmet  $11,5^\circ$  med jordaksen. Dipolens akse har to skjæringspunkt med jordoverflaten. Disse skjæringspunktene definerer de magnetiske polene, nordpol og sydpol. I 2001 var koordinatene for den nordlige magnetiske polen  $81,3^\circ \text{ N}$  og  $110,8^\circ \text{ V}$



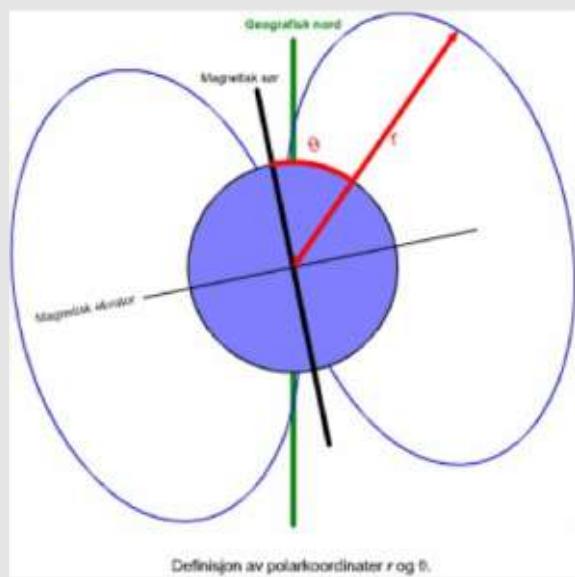
Modell av jordmagnetfeltet



Middelverdier for  
magnetfeltet i Tromsø

Kilde: Tromsø  
Geophysical  
Observatory

**Fordypning: Feltstyrke**



Modell av jordmagnetfeltet

Siden jorda er kuleformet blir regningen lettere hvis en benytter polarkoordinater. Polarkoordinater (se figuren ovenfor) består av to størrelser  $r$  og  $\theta$ , der  $r$  er radiell avstand fra Jordas sentrum og  $\theta$  er vinkelavstand til dipolaksen (kalt kolatituden). Det magnetiske potensialet ifølge dipolmodellen er gitt ved

$$V_M(r, \theta) = -\frac{\mu_0}{4\pi r^3} \vec{M} \cdot \vec{r} = -\frac{\mu_0}{4\pi r^2} M \cos \theta$$

der  $M$  er Jordens magnetiske dipolmoment (ca.  $8 \cdot 10^{22}$  A m<sup>2</sup>) og  $\mu_0$  er permeabiliteten i fritt rom. Potensialet  $V_M$  er sammensatt av to ledd,  $V_{M\text{indre}}$  og  $V_{M\text{ytre}}$ .  $V_{M\text{ytre}}$  skyldes strømmer utenfor jorden. Det bidrar i middel bare med ca. 1 til 2 % til det permanente feltet. Vi ser derfor bort fra dette leddet i det følgende. Magnetfeltet varierer fra sted til sted på jorden fordi vinkelen  $\theta$  varierer. Feltstyrken svarende til dette potensialet har følgende horisontale og vertikale komponenter:

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{r} \frac{\partial V_M}{\partial r} = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} M \sin \theta = H_E \left(\frac{R}{r}\right)^3 \sin \theta \\ Z &= \frac{\partial V_M}{\partial r} = 2 H_E \left(\frac{R}{r}\right)^3 \sin \theta \end{aligned}$$

$$H_E = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{1}{R^3}\right) M$$

$$\tan I = \frac{Z}{H} = 2 \cot \theta$$

Figuren over viser feltet fra en homogen magnetisert kule med åpne og lukkede feltlinjer. Den fiolette linjen er det magnetiske ekvator. Det var denne modell av jordmagnetfeltet som var rådende frem til ca. 1960.

$H_E$  er ekvatorverdien ( $Z=0$ ) av magnetfeltet ved jordoverflaten ( $R$  er jordradien). Generelt gjelder at den totale feltstyrke  $B$  er gitt ved følgende likning:

$$B = \sqrt{H^2 + Z^2} = H_E \left(\frac{R}{r}\right)^3 \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}$$

Ved polene er vinkel  $\theta$  lik null og ved ekvator er den 90°. Om  $\theta = \pi/2$  og  $r = R$  får vi at  $B = H_E$ .

Jordmagnetfeltet  $B_J$  er dobbelt så stort ved polene som ved ekvator. Feltet ved polene er ca. 60 000 nT, mens det ved ekvator er tilnærmet lik 30 000 nT. Ved polene er feltets retning normalt på jordoverflaten, mens ved ekvator er feltet parallelt med jordoverflaten. Feltets retning i rommet forandrer seg med magnetisk bredde. Da det horisontale feltet er meget svakt nord og syd for ca. 75 magnetisk bredde, kan man ikke stole på kompasset i polarområdene.

Så lenge vi befinner oss på jordoverflaten er  $r = R_J$  og størrelsen  $(R_J/r)^3$  er lik 1. Hvis vi går ut fra jordoverflaten, øker  $r$  og dipolfeltet avtar. Redusjonen går som tredje potens av avstanden, dvs. som  $1/r^3$ . Det vil si at for  $r = 2 R_J$  (jordradier) ( $R_J = 6400$  km) så er feltet bare 0,125, altså 12,5 %, av feltet ved jordoverflaten.

### Fordypning: Stærisk harmonisk analyse

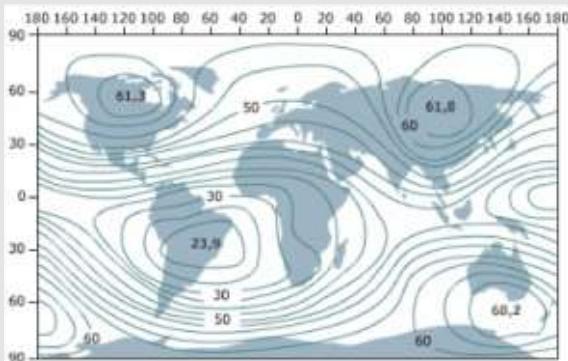
For å bestemme de magnetiske elementene alle steder på jordas overflate må vi foreta en analyse av de observerte verdiene av magnetfeltet. Ved en sfærisk harmonisk analyse utjevnes de målte verdiene. Fra slike analyser får vi en relativt nøyaktig verdi for jordas magnetiske potensial og vi får bestemt polpunktene for feltet. Dip-polene (hvor  $H = 0$ ,  $B = Z$  og  $I = 90^\circ$ ) viser seg å ligge langt fra dipol-polene. Dette betyr at dipolbeskrivelsen ikke er så bra. Dipolbeskrivelsen gir for eksempel deklinasjoner (misvising) for Skandinavia i området  $20\text{--}30^\circ$  vest, mens de observerte verdier varierer mellom noen få grader øst og vest. Fra verdensomfattende kart (figuren nedenfor) av magnetfeltet, ser vi at feltet heller ikke er kulesymmetrisk; dvs. dipolbeskrivelsen er ikke god nok.

En sfærisk harmonisk analyse av det geomagnetiske feltet er matematisk komplisert. Her skal vi bare skissere prinsippet. Om den elektriske strøm mellom jorda og den øvre atmosfæren er tilnærmet lik null, betyr det at det eksisterer et potensial slik at

$$\$B = -\nabla V_M$$

Videre har vi alltid at en magnetfeltlinje er lukket i seg selv. Matematisk betyr det at divergensen til feltet er null. Dette gir oss en differensialligning av annen orden som har en vanskelig matematisk løsning. Resultatet er at vi må lage matematiske modeller hvor vi tar med høyere ordens ledd enn dipolen, og som kan beskrive de observerte verdiene av magnetfeltet mer nøyaktig.

Det skalare magnetiske potensial  $V_M$  er forårsaket av strømmene i jordas indre. Når dette er kjent kan vi regne ut feltet overalt på jorda.



Isomagnetisk kart

Det isomagnetiske kartet i figuren er basert på modellberegringer av det totale jordmagnetiske felt. Konturene forbinder punkter med samme magnetiske feltstyrke. Tallene angir feltstyrke i mikrotesla. Magnetfeltet har maksimalverdier i Nord-Canada og Sibir og over Victoria Land i Antarktis, mens det i et område utenfor kysten av Sør-Amerika når en minimumsverdi.

### Fordypning: Eksentrisk dipolbeskrivelse

For å få en mer nøyaktig beskrivelse av  $\vec{B}$  må vi ta med høyere ordens ledd, det vil si kvadrupol, oktopolledd, osv. I tillegg må vi ta hensyn til magnetiske metaller og mineraler i jordskorpa. Elektriske strømmer i jordas øvre atmosfære er viktige for å forklare jordas magnetfelt. Ved å legge kvadrupol-leddene til dipol-termene, får vi det som kalles den eksentriske dipolbeskrivelse. For mange formål er denne modellen akseptabel. Mens dipol-leddet avtar med avstanden fra jordoverflata som  $1/r^3$ , vil kvadrupolene minske med  $1/r^4$ . Magnetiske avvik i jordskorpa betyr derfor relativt lite i store avstander ( $>3R$ ) fra jordoverflaten.

Den eksentriske dipolbeskrivelsen brukes mye i analyser av geofysiske data. Feltet har samme styrke som fra en dipol, men dens origo er forskjøvet ca. 400 km fra jordas sentrum i retning  $10^\circ$  N og  $150^\circ$  Ø. For å lage en modell som beskriver feltet på jordoverflaten meget bra (dvs. hvor avviket fra observasjonen er  $< 1\%$ ), må vi ta med ledd opp til sjette orden.

Det observerte feltet avviker betydelig fra et eksentrisk dipolfelt i avstander større enn 4 til 5 jordradier. Solvinden er årsaken til deformasjon av jordfeltet, spesielt i store avstander fra jorda.

Teorien med en magnetpol i jordas indre gir en rimelig god tilnærming til det virkelige  $B$ -feltet. Avviket fra dipol-symmetri kan illustreres ved verdien av deklinasjonen (misvisningen) i Skandinavia. En god del av denne uoverensstemmelsen kan fjernes hvis vi antar en eksentrisk dipol. Videre forandrer vi dipolens retning slik at den skjærer jordoverflaten ved ca.  $81^\circ 0' N$ ,  $275^\circ 3' \text{Ø}$  og ved  $75^\circ 0' S$ ,  $120^\circ 4' \text{Ø}$ . Ved å bruke den fullstendige matematiske modellen kan man oppnå så god tilnærming man ønsker hvis en tar med tilstrekkelig antall ledd.

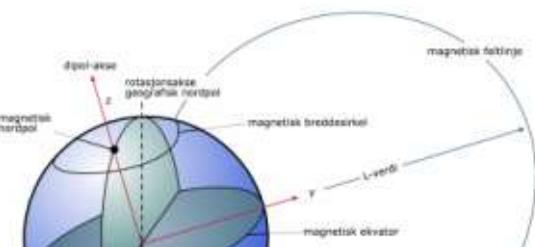
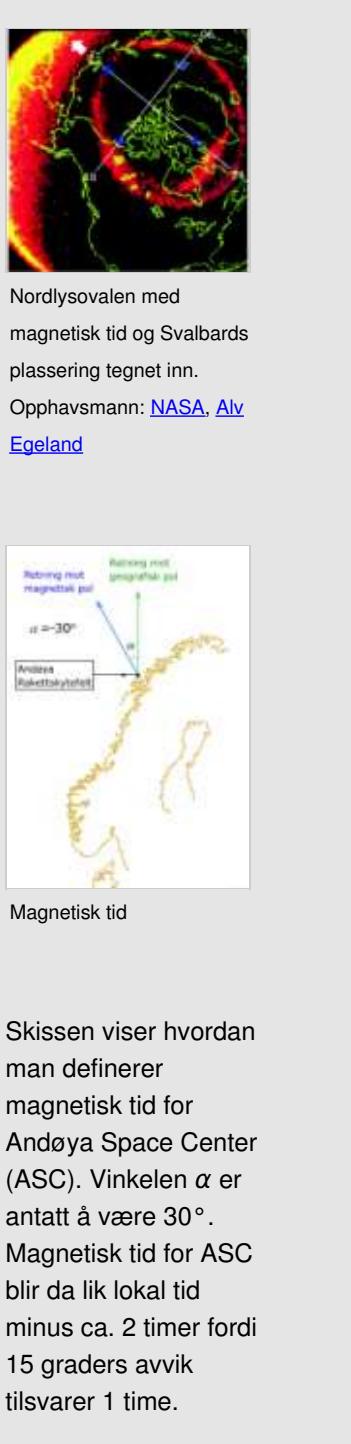
# Magnetiske koordinater og tid

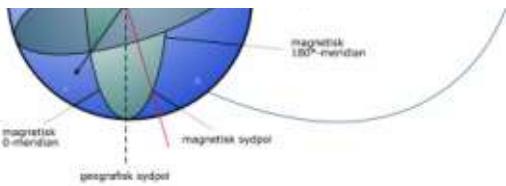
Forfatter: Narom

[Magnetiske koordinater og tid \(60151\)](#)

Jordas magnetfelt spiller en dominerende rolle i romfysikken. Det er derfor nødvendig å definere magnetisk tid og magnetiske koordinater.

Det enkleste geomagnetiske koordinatsystemet bygger på dipolbeskrivelsen. Jordas deles fortsatt inn i  $90^\circ$  mellom magnetisk ekvator og magnetpolene. Magnetisk lengde er positiv øst for meridianen gjennom den magnetiske og den geografiske polen. Solas retning i relasjon til det magnetiske koordinatsystemet definerer magnetisk tid på tilsvarende måte som vår lokale tid bestemmes fra et geografisk koordinatsystem i relasjon til sola.





Magnetiske koordinater

Figuren over viser magnetisk gradnett med magnetiske meridianer og breddesirkler markert med grønt. Det kartesiske system, med x-, y- og z-koordinater, er markert med rødt. Feltlinjebasert system som angir hvor langt ut fra jorda feltlinjen gjennom punktet A krysser ekvatorplanet, er markert med fiolett. Alle punkt på en og samme feltlinje har samme L-verdi.

Den geomagnetiske tidsvinkel er vinkelen mellom det geomagnetiske meridianplan, hvor observatoriet befinner seg, og det plan som er  $180^\circ$  forskjøvet fra det plan hvor sola er. Også ved magnetisk tid svarer en rotasjon på 15 lengdegrader til en time. Figuren til høyre viser en enkel måte å definere magnetisk tid på. Det var professor Lars Vegard som i 1930-årene først introduserte magnetisk tid.

# Magnetiske variasjoner

Forfatter: Narom

[Magnetiske variasjoner \(60158\)](#)

Når det gjelder variasjoner i jordas magnetfelt kan de deles inn i to hovedkategorier. For det første er det langtidsvariasjoner ( $10\text{--}10^6$  år) som har sin årsak i jordas indre. Disse vil ikke bli diskutert her. Variasjoner som skyldes elektriske strømmer i den øvre atmosfære og/eller i det nære verdensrommet, er viktige i romfysikken. De sistnevnte strekker seg fra sekunder til en solflekkperiode.

Elektriske strømmer i den øvre atmosfæren og det nære verdensrommet gir følgende tre karakteristiske forstyrrelser ved jordoverflaten:

- Døgnvariasjoner i  $B_J$  som skyldes bevegelser i luftlagene i den øvre atmosfæren.
- Store forstyrrelser av magnetfeltet i polarområdene (dvs  $10^\circ$  til  $35^\circ$  fra magnetpolen), også kalt magnetiske substormer, som hovedsakelig skyldes intense elektriske strømmer i høydeområdet 100 til 150 km (kalt elektrojeten).
- Magnetiske forstyrrelser som observeres samtidig over hele jorda kalles stormer. Magnetiske stormer oppstår i det nære verdensrommet etter en økning av aktiviteten på sola.

## Daglige forstyrrelser

Døgnvariasjonene skyldes bevegelser i ionosfæren, spesielt i E-laget (95-150 km). Bevegelsene er forårsaket av ujevnt fordelt soloppvarming (en slags tidevannseffekt). De er størst om sommeren. Vi kaller denne effekten roligdagskurven  $S_q$  ( $S$  for sola og  $q$  for rolig, eng.: quiet).  $S_q$ -effektene er så små (typisk 10 nT) at en ofte ser bort fra dem. Hypotesen om den daglige gangen i magnetfeltet ble første gang nevnt i 1884. Det er også en annen, mindre effekt som følger månefasen. En detaljert analyse av magnetdataene er nødvendig for å bestemme månens bidrag i de daglige magnetiske forstyrrelsene.

## Forstyrrelser i polarområdene

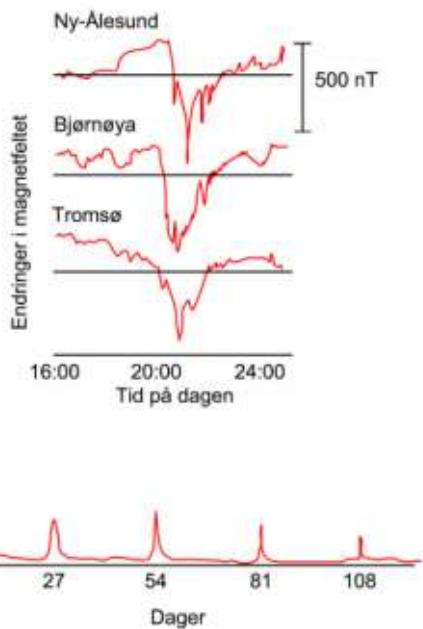
Store forstyrrelser i nordlyssonene, det vil si mellom  $60^\circ$  og  $80^\circ$  geomagnetisk bredde, skyldes kraftige elektriske strømmer i høydeområdet 100–150 km. Det var professor Birkeland som først påpekte at hovedkilden til disse magnetiske forstyrrelsene var elektriske strømmer i den øvre atmosfære. I polarområdene er ionisasjonsgraden, dvs. forholdet mellom antall ioniserte og antall nøytrale luftpartikler, i ionosfæren spesielt høy fordi atmosfæren her også bombarderes av elektroner og ioner. Denne partikkelenstrømmen, som fører til nordlys og sørlys, gir også opphav til kraftige elektriske strømmer i dette høydeområdet. Disse strømmene vil gi forstyrrelser, typisk 100-1000 nT, i magnetfeltet. At magnetiske forstyrrelser faller sammen med sterkt nordlysaktivitet ble påvist for over 100 år siden. Den elektriske strømtettheten,  $j$  (i  $\text{A}/\text{m}^2$ ) er gitt ved:

$$j = n_e \cdot e \cdot (v_i - v_e)$$

der  $n_e$  er tettheten av frie ladninger,  $q$  er elementærladningen,  $v_i$  og  $v_e$  er hastigheten for ioner og elektroner. Den elektriske strømmen flyter i en høyde mellom 100 og 150 km. Strømmen flyter i øst-vest retning innenfor et begrenset område i magnetisk bredde, det som kalles nordlysovalen. Den totale strømstyrken kan overstige 1 million ( $10^6$ ) ampere (A). Disse strømmene gir kraftige forstyrrelser i magnetfeltet målt ved bakken. Strømmene synes å være koncentrert som et nesten linjeformet strømelement langs en del av nordlyssonen. Kristian Birkeland studerte disse enklere stormer gjennom triangulering fra flere observatorier etter et prinsipp som er skissert i figuren. Strømstyrken er av størrelsesordenen  $10^6$  –  $10^7$  A.



Den øverste delen av figuren viser triangulering av det elektriske strømsystemet ved hjelp av magnetiske registreringer fra Bjørnøya og Tromsø. Nederst vises de magnetiske kraftlinjene omkring en horizontal leder med strømretning ut av figurplanet.



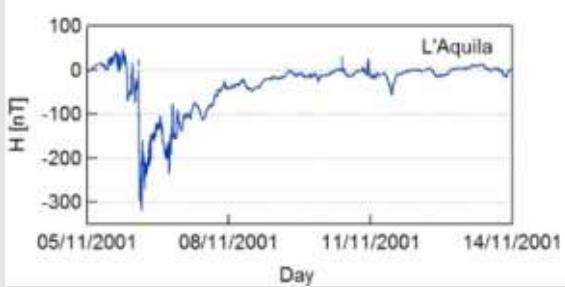
Typiske magnetfeltmålinger under nordlysutbrudd.

Eksempelet viser *H*-komponentmålinger fra 19. september 1977.

I figuren over er vist eksempler på hvordan et nordlysutbrudd (magnetisk substorm), 19. september 1977, ført til forandringer i horisontalkomponenten til jordmagnetfeltet i Ny-Ålesund, Bjørnøya og Tromsø. Nederst er vist hvordan en magnetisk storm kan vende tilbake etter en eller flere solrotasjoner. Forstyrrelsene kan bli opp til 1000 – 2000 nT som er omkring 2–4 % av det totale felt på stedet, men forstyrrelser på 4 % er sjeldent. Varigheten av slike magnetiske substormer er typisk noen titalls minutter til et par timer. Ved Andøya Space Center, som ligger sentralt i nordlyssonen, registreres en eller flere substormer nesten hver kveld/natt. Substormene er regionale og forekommer nesten alltid innenfor nordlysbeltene.

## Magnetiske stormer

Til tider oppstår kraftige magnetiske stormer som observeres samtidig over hele verden. De skyldes elektriske strømmer i vårt nære verdensrom, spesielt en ringformet elektrisk strøm med sentrum nær ekvatorplanet i 3 til 7 jordradiers avstand. Effekten av denne ringstrømmen på bakken er derfor sterkest ved lavere breddegrader, det vil si nærmere ekvator. Varigheten av disse stormene er gjerne fra noen timer til maksimum to til tre dager. Enkelte kraftige stormer gjentar seg etter 27 og 54 dager. Det er derfor rimelig å anta at disse stormene er forbundet med aktive områder på sola, fordi vi vet at det samme området peker mot jorda med 27 dagers mellomrom. Den totale energi som blir frigjort i en magnetisk storm kan beløpe seg til en milliard kilowattimer,  $10^9$  til  $10^{12}$  kWh.



Magnetisk storm

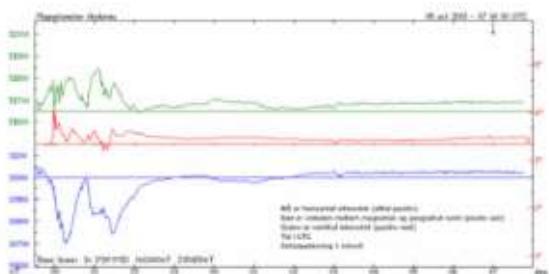
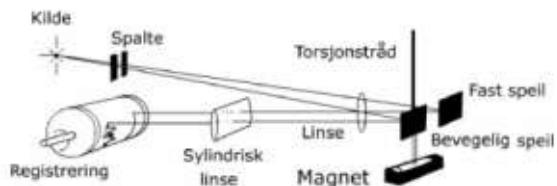
Typisk magnetisk storm sett i målinger av endringen av  $H$ -komponenten til magnetfeltet.  
Målingen er fra L'Aquila i Italia (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia).

# Måleinstrumenter

Forfatter: Narom

[Måleinstrumenter \(60472\)](#)

I figuren under har vi vist en skisse av utstyr som har vært benyttet i mer enn 100 år til å måle jordas magnetfelt. I dag brukes digitale magnetometre.



Prinsippet for måling av jordas magnetfelt.

Kjernen i instrumentet er en permanent magnet som er montert slik at den kan rotere eller svinge fritt når jordfeltet forandrer seg. På torsjonstråden er montert et lite speil. Speilet reflekterer en lysstråle, kalt kilde, og fokuserer denne på et rullende fotografisk papir. I tillegg er det et fast speil som angir basislinjen. Forandringer i magnetfeltet som fører til at magneten og speilet vrir seg, registreres fotografisk gjennom lysflekkens vandring på papiret. Det er avviket fra den rette linjen en er interessert i. Avviket sammenlignes med nordlysregistreringene for å undersøke sammenhengen mellom disse to fenomenene.

I løpet av de siste 30 år er nye instrumenter for magnetfeltregistreringer utviklet. De er basert på andre prinsipp enn vridningen av en permanent magnet. De mest kjente er fluksgate- og protonmagnetometre.

Fullstendig bestemmelse av jordas magnetfelt foregår ved observatorier rundt om i verden. I Norge er det 13 stasjoner som overvåker feltet kontinuerlig. Ved Nordlysobservatoriet i Tromsø (nå kalt Tromsø Geophysical Observatory) har en målt magnetfeltet i mer enn 80 år. De er i dag ansvarlige for alle stasjonene i Norge. Ved samtlige stasjoner brukes fluksgatemagnetometre. Observasjonene er ledd i et verdensomspennende samarbeidsprosjekt og brukes blant annet til studier av magnetiske forstyrrelser i polarstrøk og verdensomspennende magnetiske stormer.

Mikropulsasjonsinstrumenter brukes til å kartlegge magnetiske feltvariasjoner som er hurtigere enn noen få sekunder. Kjernen i dette instrumentet er store elektriske spoler med diameter opp til 1 meter og med 10-20.000 kobbertrådsviklinger, ofte rundt kjerner av magnetisk materiale. Disse graves ned i jorda slik at de ligger støtt. Raske variasjoner i jordas magnetfelt fører til elektriske strømmer i spolene. Disse kan forsterkes og registreres. Slike induksjonsinstrumenter, "search coils", brukes også i raketter og i satellitter.

Aktuelle magnetfelldata fra Norge finnes på: <http://geo.phys.uit.no/geomag.html>

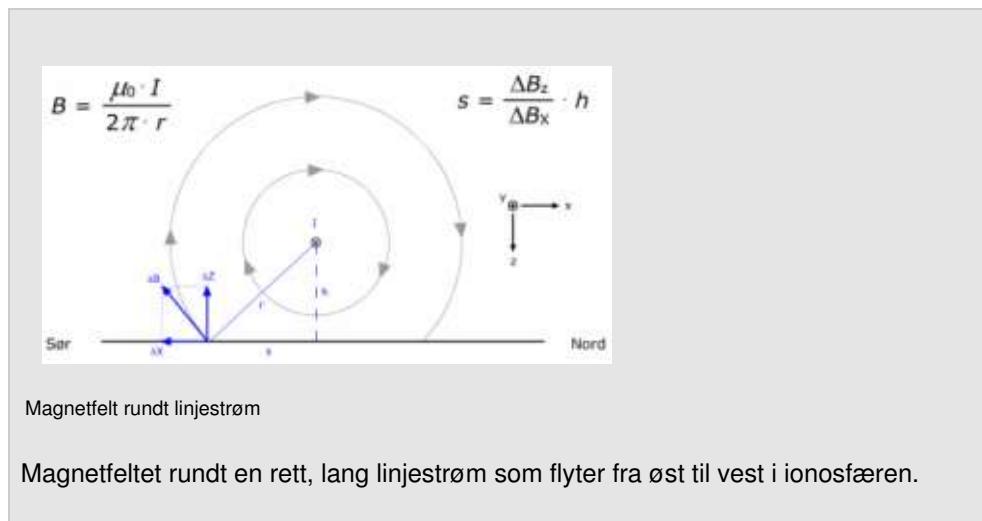
## Tolkning av magnetometerdataene - Biot-Savarts lov

Rundt en rett, lang strømførende elektrisk ledet vil magnetfeltlinjene være konstriske sirkler. Magnetfeltet som strømmen setter opp rundt en uendelig lang ledet er gitt ved:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

hvor  $B$  = den magnetiske fluksstettheten i tesla,  $\mu_0$  = permeabiliteten i atmosfæren (som er lik permeabiliteten i vakuum =  $4 \cdot 10^{-7}$  T m/A),  $I$  = strømstyrken i ampere og  $r$  er avstanden fra strømlederen. Hvilken vei magnetfeltet peker finner vi ut fra "høyrehåndsregelen": Dersom vi griper med høyre hånd omkring strømlinjen med tommelen i strømmens retning, vil magnetfeltet dreie seg rundt ledningen i samme retning som de øvrige fire fingrene peker.

Figuren under viser feltet rundt en slik ledet. Retningen og størrelsen av strømmen  $I$  kan beregnes fra komponentene  $\Delta B_x$ ,  $\Delta B_y$  og  $\Delta B_z$  som vi måler på bakken med magnetometerne ( $\Delta$  leses delta).  $\Delta$ -verdiene regnes som avvikende fra magnetfeltet før forstyrrelsen begynte. Når strømmen ( $I$ ) i ionosfæren flyter rett øst/vest, er  $\Delta B_y = 0$ . Positiv retning for X-komponenten er mot nord og for Z lodret nedover på den nordlige halvkule.



Vi antar en uendelig lang linjestrom som flyter fra øst til vest i ionosfæren som skissert i figuren. Strømmen flyter i en høyde  $h$  over bakken. Observasjonspunktet ligger i en horisontal avstand  $s$  fra fotpunktet til strømmen. Da kan  $s$  (positiv nordover) uttrykkes

$$s = \frac{\Delta B_z \cdot h}{\Delta B_x}$$

I figuren er både  $\Delta Z$  og  $\Delta X$  negative. Vi får en positiv verdi for  $s$ , noe som stemmer med figuren. Hvis strømmen  $I$  (den kalles på fagspråket for elektrojeten) hadde vært rettet østover, noe som oftest forekommer tidlig på kvelden eller også på morgensiden, ville begge komponentene haft motsatt fortegn. Men  $s$  ville fortsatt vært positiv. Utslag i  $\Delta B_y$  vil vise om strømmen flyter rett øst-vest eller på skrå. Om Y-komponenten = 0 flyter strømmen rett øst-vest. Dette er en enkel modell. Den gir oss styrken for elektrojeten og tilnærmet posisjon for elektrojeten i forhold til bakkestasjonen. For mer kompliserte elektrojetter er modellen med bare en strømleder, for enkel.

Elektrojeten flyter i de høydeområdene hvor den elektriske ledningsevnen er stor, dvs. der partikkelnedbør fra rommet, solvinden, ioniserer atmosfæregassene mest og gir mange frie elektroner. Normalt er høyden for elektrojeten  $120 \pm 10$  km.

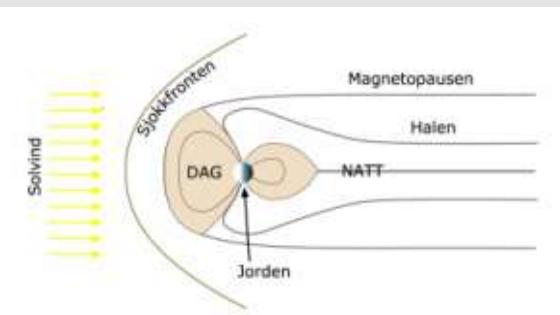
Når  $\Delta B_X$  er negativ og  $\Delta B_Z$  nær null, har vi mest partikkelnedbør rett over stasjonen. I mørketiden vil forekomsten av nordlys bekrefte dette. Om sommeren kan det kontrolleres ved hjelp av ionosonden og/eller riometeret. Disse instrumentene vil vise om mengden av frie ladninger i ionosfæren er mye over normalen.

## Magnetfeltet utenfor jorda

Forfatter: Narom

[Magnetfeltet utenfor jorda \(60493\)](#)

Magnetfeltet er viktig for alle fysiske prosesser i det nære verdensrommet. Som det fremgår av figuren under avviker jordas magnetfeltet mye fra et dipol-felt, spesielt i avstander større enn  $4$  til  $5 R_J$  fra jordoverflaten. Det er solvinden som er hovedårsaken til denne deformasjonen av jordmagnetfeltet. Partikler i solvinden avbøyes av magnetfeltet. Jorda blir dermed liggende i et hulrom. Samtidig induseres sterke elektriske strømmer, som igjen omgir seg med et magnetfelt, i det nære verdensrom. Resultatet er at jordas magnetfelt trykkes sammen på solsiden og trekkes ut i en flere hundre tusen kilometer lang hale på nattsiden.



Jordmagnetfeltet

Jordmagnetfeltet i middag-midnatt-planet hvor sola er til venstre. Sjokkfronten (buesjokket) oppstår når den supersoniske solvinden møter jordas magnetfelt. Solvinden fører til at jordas magnetfelt får en form som skissert i figuren.

Vi skal regne ut hvor langt bort jordas magnetfelt, og dermed det nære verdensrom, strekker seg i ekvatorplanet på dagsiden av jorda. Utenfor dette har vi det interplanetare magnetfeltet, dvs. magnetfeltet i solvinden.

Beregningen er basert på følgende antagelse: Solvinden trykker på jordas magnetfelt. I en bestemt avstand  $r$  fra jorda oppstår en likevekt hvor trykket fra solvinden er lik trykket fra jordas magnetfelt. Denne avstanden  $r$  er definert som rekkevidden av jordas nære verdensrom, også kalt magnetosfæren. Elektron og protonmassen er henholdsvis  $m$  og  $M$ , solvindhastigheten er  $v$  og partikkeltettheten er  $n$ . Det er like mange elektroner som protoner. Det kinetiske trykket  $P_S$  fra solvinden er:

$$P_S = n(m + M)v^2 \approx n \cdot M \cdot v^2$$

Som det framgår av likningen tar vi kun hensyn til protonene fordi deres masse er 1836 ganger større enn elektronets masse. Mottrykket  $P_B$  fra jordas magnetfelt er gitt ved:

$$P_B = \frac{B_d^2}{8\pi\mu_0}$$

$B_d$  er magnetfeltet på det sted vi har likevekt og  $\mu_0$  er den magnetiske permeabiliteten for vakuum. Feltet  $B_d$  kan uttrykkes ved feltet på jordoverflaten og vi får følgende likning for magnetfeltet i ekvatorialplanet ( $\theta = 90^\circ$ ):

$$B_d = H_E \left( \frac{R_J}{r} \right)^3$$

$r$  den avstanden vi vil beregne. Ved å sette inn i siste likning og sette  $P_S = P_B$  får vi følgende uttrykk:

$$\$n \cdot M \cdot v^2 = \frac{H_E^2}{2 \mu_0} \left( \frac{R_J}{r} \right)^6$$

Denne likningen løses med hensyn på  $r$ :

$$\$r = R_J \cdot \sqrt{\left( \frac{H_E^2}{2 \mu_0} \cdot n \cdot M \cdot v^2 \right)^{1/6}}$$

$n$  og  $v$  er kjent fra satellittobservasjoner ( $n = 8 \cdot 10^6$  partikler per kubikkmeter). Den observerte middelverdi for  $r = 10,8 R_J \approx 70000$  km. Fra resultatet over får vi

$$\$r = 7 - 12 R_J$$

om  $v$  varierer fra 150 til 600 km/s. Det betyr at jordas magnetfelt når ut til ca. 7 til 12 jordradier på solsiden. Dette regnestykket er ikke helt riktig fordi solvinden vil indusere strømmer i grenseflaten ved  $r$ . Dette fører til at feltet ute i verdensrommet er sterkere enn det opprinnelige dipol-feltet. Når vi tar hensyn til dette får vi at jordmagnetfeltet strekker seg ut til ca. 11 jordradier under rolige forhold på sola, mens det bare når ut til 6 – 7 jordradier ved kraftige forstyrrelser.

Utstrekningen og formen på magnetosfæren vil variere med aktiviteten på sola. Jo større aktivitet, dess mindre blir  $r$ . I de senere årene er jordas magnetfelt, som funksjon av aktiviteten på sola, nøye observert ved hjelp av satellitter. De verdier for feltet som her er beregnet, passer bra med observerte verdier.

På den side av jorda som vender mot sola er altså rekkevidden av jordmagnetfeltet ca. 10 jordradier, hvilket vil si ca. 64.000 km. På nattside derimot, strekker feltet seg ut i en lang hale på flere hundre jordradier. For alle andre retninger enn siktelinjen til sola, vil jordas magnetfelt gå lenger ut enn  $10 R_J$ .

## Magnetosfæren - vårt nye verdensrom

Forfatter: Narom

[Magnetosfæren - vårt nye verdensrom \(60495\)](#)

Himmelrommet har opptatt våre forfedre gjennom årtusener. Undring og nysgjerrighet har vært den store drivkraften. Man mente at det nære verdensrommet mellom planetene var praktisk talt tomt for materie. Jordas magnetfelt var symmetrisk fra dag- til nattsiden og uten strukturer og irregulariteter. Dette trodde man fram til ca. 1960.

Takket være den moderne romforskningen har vi fått et helt nytt bilde av det nære verdensrommet, som fra 1965 kalles magnetosfæren. Magnetosfæren er den del av verdensrommet hvor jordas magnetfelt kontrollerer bevegelsen til de elektriske partiklene. Yttergrensen av magnetosfæren kalles magnetopausen. Magnetopausen er grenseflaten mellom det interplanetare rommet og jordas nære verdensrom.



Noen sentrale områder innen magnetosfæren.

Opphavsmann: [Narom](#)

# Strålingsbeltene - van Allen beltene

Forfatter: Narom

[Strålingsbeltene - van Allen beltene \(60496\)](#)

De første satellittene sendt opp i 1958 førte til den første store forandring i datidens enkle verdensbilde. Satellittinstrumentene kartla den gradvis overgangen fra den øvre atmosfæren til den jordnære delen av verdensrommet. Resultatet var oppdagelsen av de to strålingsbeltene (se figur a i fordypningsavsnittet om strålingsbeltene) rundt jorda, også kalt van Allen-beltene. James van Allen var vitenskapelig leder for prosjektet. Oppdagelsen av disse strålingsbeltene var et viktig vitenskapelig resultat.



Strålingsbeltene

Figur a: Et dag-natt  
snitt gjennom jorda og  
verdensrommet viser  
beliggenheten av  
strålingsbeltene.

Størmers baneberegninger

Figur b: Figuren viser  
noen av Størmers  
baneberegninger fra  
1907. Det hvite  
området i figuren kalte  
Størmer det forbudte  
området.

## Fordypning: van Allen-beltene og Størmers baneberegninger for elektroner i jordas magnetfelt.

Professor Størmers baneberegninger for elektroner i jordas magnetfelt er historiske. Originalskissen av Størmer er vist i figur b. Størmer fant i 1907 at ladde partikler i et dipol-felt kan, innen visse regioner, være fanget i magnetfeltet. Dette viktig resultat ble dessverre oversett helt til van Allen hadde utført sine første satellittobservasjoner.

Partiklene i strålingsbeltene var innfanget. De kunne ikke komme ut. Nye elektroner og ioner kunne heller ikke komme inn i beltene ved rolige forhold på sola. Van Allens observasjoner viste at strålingsbeltene hadde noen karakteristiske egenskaper som Størmer, på teoretisk grunnlag hadde forutsagt mer enn 50 år tidligere. Det hadde derfor ikke vært urimelig om strålingsbeltene hadde blitt kalt van Allen/Størmer-beltene.

Etter Explorer-serien har utallige satellitter i forskjellige baner kartlagt egenskapene ved strålingsbeltene med mer avanserte instrumenter. I det "bløte" området av spekteret, dvs. elektroner og protoner med mindre energi enn en kiloelektronvolt (keV), er fluksen størst i det ytre beltet. Her har vi også de største variasjonene.

Kilden til ringstrømmen, den viktig elektriske strømmen i det nære verdensrommet, finnes i strålingsbeltet mellom 3 og 6 jordradier.

Den dominerende ionen i beltene er protoner ( $H^+$ ). Nye målinger har vist små konsentrasjoner av tyngre ioner,  $He^{++}$ ,  $O^+$  og  $O^{++}$ . De er viktige bestanddeler i det ytre beltet. Antall partikler varierer i takt med "været på sola", solaktiviteten. Energien til partiklene i det indre beltet, som har sentrum ca. 3000 km fra jordoverflaten, er meget stor, opp til  $10^8$  eV.

Strålingsbeltene har stor praktisk betydning for satellitter og satellitt-kommunikasjon. De fører til intens partikkelskadelig bombardering og betydelig elektrisk oppladning av romfartøyene som beveger seg gjennom strålingsbeltene. Det er derfor helt nødvendig å bruke skjermede komponenter, dvs. komponenter som ikke blir ødelagt av intens partikkelskadelig stråling, i satellitter som krysser strålingsbeltene. Spesielt solcellene, men også følsom elektronikk i satellittens indre, må dekkes til og skjermes fra den intense strålingen. Likevel forekommer det ofte store strålingsskader på satellittene.

# Strukturer og dynamikk i magnetosfæren

Forfatter: Narom

[Strukturer og dynamikk i magnetosfæren \(60502\)](#)

Magnetosfæren er gradvis blitt kartlagt takket være moderne romforskning. Den er meget dynamisk og består av mange regioner med forskjellige plasmaopulasjoner. Magnetosfæren skyldes vekselvirkningen mellom solvinden og jordas magnetfelt. På samme måte oppstår magnetosfærer på alle himmellegemer som har et magnetfelt. De første målingene av magnetfeltet i større avstander fra jorda førte til store forandringer i datidens magnetfelt-modell.

Satellittmålinger av jordmagnetfeltet i ekvatorplanet på dagsiden viser at feltet blir mer og mer deformert jo lengre bort en kommer fra jordoverflaten. I større avstander enn  $5-6 R_J$  på dagsiden avtar feltet langsommere og langsommere. Således er feltet en faktor to større ved ca.  $10 R_J$  enn hva den klassiske dipolteorien angir. Lenger borte (mer enn  $10 R_J$  på dagsiden) er  $B_J$  praktisk talt null.

Jordas magnetfelt er ikke konstant. Derfor vil også formen og utstrekningen av det nære verdensrommet variere. Noen ganger ved lav solaktivitet observerte satellittene at magnetfeltet nådde helt ut til  $12-14 R_J$ , mens feltet andre ganger, ved høy solaktivitet, ikke strakk seg lengre enn til  $6-7 R_J$  i ekvatorplanet på dagsiden.

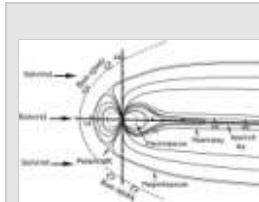
Der hvor jordas magnetfelt avtar til null, er yttergrensen for det vi definerer som det nære verdensrommet og begynnelsen på det interplanetare rommet. Grenseflaten kalles magnetopausen. Tykkelsen på magnetopausen er ca. 150 km.

Hvordan feltet ser ut på nattsiden (ofte kalt halen) i store ( $> 100$ ) avstander fra jorda, er ikke godt kjent. Men generelt kan man si at mens det nære verdensrommet på dagsiden tilnærmet består av en halvkule med radius på tilnærmet  $10-13 R_J$ , så har magnetfeltet på nattsiden form som en lang sylinder med en diameter på ca.  $40 R_J$ . Lengden av feltet på nattsiden, til det sted hvor  $B_J < IMF$ , det interplanetare magnetfeltet, er fortsatt litt usikkert. Flere observasjoner indikerer at magnetfeltet på nattsiden kan nå ut til  $10^3 R_J$ .

Grovt sett består jordas magnetfelt på nattsiden av to halvsylindre, med motsatt rettet magnetfelt. De er skilt fra hverandre av et nøytralt område i sentrum. Magnetopausen er diffus på nattsiden, men tydelig markert på dagsiden.

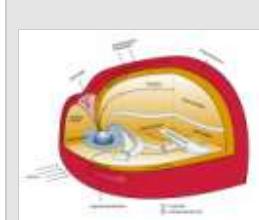
Solvinden avbøyes av jordmagnetfeltet som et resultat av Lorentz-kraften. Dette minner om vannet i en elv som renner forbi en stor stein. Sterke elektriske strømmer finnes flere steder i magnetosfæren. Alle de elektriske strømmene omgir seg igjen med et magnetfelt. Ved magnetopausen på dagsiden og ute i halen på nattsiden er det store strømsystemer. Resultatet av vekselvirkningen med solvinden er at jordas magnetfelt trykkes sammen på solsiden og trekkes ut i en flere hundre tusen kilometers lang Hale på nattsiden. Jordas nære verdensrom på nattsiden minner om halen til en komet.

Det er uklart hvordan solvinden trenger inn i magnetosfæren. De to modellene som diskuteres mest er en åpen eller en lukket modell av magnetosfæren.



En modell av det nære verdensrommet, med sola til venstre

Forfatter: [Narom](#)



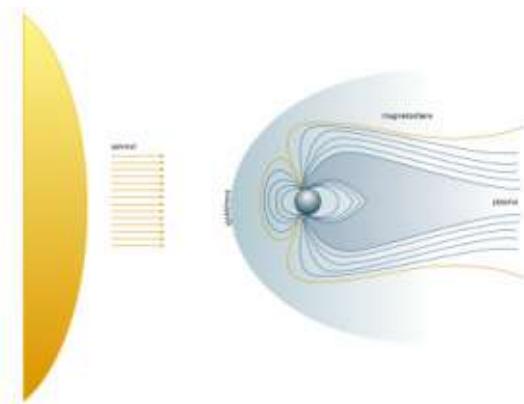
Plasmaområdene i jordas magnetosfære

I den åpne modellen er jordas magnetfelt noen steder knyttet sammen (sveiset) med  $B$ -feltet i solvinden. Partiklene i solvinden føres da inn i magnetosfæren langs sammenhengende magnetfeltlinjer. I den lukkede magnetosfæremodellen er det ikke noen kontakt mellom magnetfeltene i det interplanetare rommet og i jordfeltet. Partiklene kommer da inn i magnetosfæren via ulike fysiske prosesser, kalt diffusjonsprosesser. Dette minner om hvordan fløten blander seg med kaffen i en kaffekopp.

Foran magnetopausen, på dagsiden, ble en sjokkfront kalt buesjokket, observert i 1970-årene. Dette betyr at jorda beveger seg rundt sola med en sjokkfront omkring  $4 R_J$  foran magnetopausen. Fordi tettheten i det interplanetare rommet er lavt (7 partikler per kubikkmeter), hadde man ikke ventet å finne noen sjokkfront der. Det er solvindens overlydshastighet, når den støter mot jordfeltet, som fører til at sjokkfronten oppstår.

Modeller av magnetosfæren i middag-midnatt planet sees i figurene på denne siden. Følgende regioner og grenseflater er avmerket:

1. Sjokkfronten
2. Magnetosjiktområdet
3. Magnetopausen
4. Magnethalen
5. Det nøytrale området
6. Plasmasjiktet
7. Polarkløftene
8. Strålingsbeltene og ringstrømmen
9. Området for åpne og lukkede magnetfeltlinjer



Snitt av jordas nære verdensrom i det magnetiske meridianplan

# Nordlysphysikk

Forfatter: Narom

[Nordlysphysikk \(60569\)](#)

Nordlyset forekommer oftest og med størst intensitet langs en oval sone som ligger mellom 10 og 30 grader fra jordas magnetpoler. Nordlyset på natten ligger tilnærmet dobbelt så langt fra polene som nordlyset på dagen. Nordlys skyldes kollisjoner mellom energirike partikler fra solvinden og atmosfærens gasser. Når solaktiviteten er høy flytter nordlyset seg nærmere ekvator. Jordas magnetfelt er veiviseren for nordlyspartiklene.

Maksimal nordlysintensitet kan nesten bli like sterkt som månelyset på bakken. Minimum nordlyshøyde er  $\approx 90$  km, mens maksimum kan være  $> 500$  km. De fleste nattnordlys har maksimum intensitet mellom 100 og 200 km, mens dagnordlyset lyser sterkest mellom 200 og 350 km.

Nordlyset opptrer i mange forskjellige former. Den grønne nordlyslien ( $\lambda=557,7$  nm) dominerer nattnordlyset, mens den røde linjen ( $\lambda=630,0$  nm) er sterkest i dagnordlyset. I nordlysspektret finnes også de første linjene i Balmer-serien, nemlig  $H_\alpha$  (656,3 nm) og  $H_\beta$  (486,1 nm). De skyldes nedbør av energirike protoner,  $H^+$ . I helt nye observasjoner fra satellitter er også  $H_\gamma$  og  $H_\delta$  blitt observert.

Fra studier av nordlys kan vi få viktige informasjoner om aktiviteten på sola og i det interplanetare rommet, samt i jordas nære verdensrom.

## Ionosfæren

Ionosfæren er definert som det høydeområdet i jordas atmosfære der konsentrasjonen av frie elektroner ( $n_e$ ) er så stor at den påvirker radiobølgene. Vi sier at atmosfæren er ionisert, dvs. den er elektrisk ledende. Det finnes like mange positive ioner i ionosfæren, men på grunn av deres relativt store masse vil de nesten ikke påvirke radiobølgene. Ionosfæren ble oppdaget da man i 1901 observerte at radiobølger kunne forplante seg over store avstander, over 1000 km. Det måtte derfor eksistere et elektrisk ledende lag i den øvre atmosfære som reflekterte bølgene.

Ionosfæren strekker seg fra ca. 50 til 500 km over bakken. Konsentrasjonen av elektronene ( $n_e$ ) varierer fra  $10^7$  partikler pr.  $m^3$  ved 50 km, til et maksimum på ca.  $10^{12}$  partikler pr.  $m^3$  i høyden mellom 200-300 km.

Ionosfæren dannes ved at energirik elektromagnetisk- og partikelstråling fra sola og verdensrommet ioniserer luften. Fysiske og kjemiske bindinger i gassmolekylene og atomene brytes lett av høyenergetisk stråling. Fri elektroner og ioner dannes i den øvre atmosfære. Ionosfæreplasmaet er svakt ionisert. Forholdet mellom elektronkonsentrasjonen og tettheten av den ikke-ioniserte luft er  $\sim 10^{-5}$ , selv ved  $n_e$  maksimum.

Den regulære ionosfæren dannes av ultrafiolett og røntgenstråling fra sola. Den har en karakteristisk daglig variasjon. I polare strøk, dvs. nord for ca.  $60^\circ$ , bidrar energirike elektroner og ioner mye til ionisasjonsprosessen. Det dannes ionosfærelag som er assosiert med nordlys. Også når det gjelder kommunikasjons- og navigasjonssystemer er ionosfæren viktig.

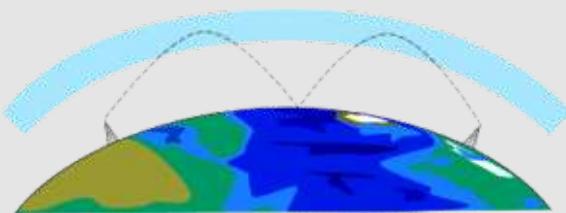
## Historikk

Forfatter: Narom

[Historikk \(61308\)](#)

I desember 1901 sendte den italienske tekniker G. Marconi (1874–1937) radiobølger fra Cornwall i England til New Foundland, en avstand på mer enn 4500 km. Det ble konkludert at bølgene måtte følge jordas krumning langs “elektriske lag” i den øvre atmosfæren. Det måtte derfor finnes en ionosfære som virket som et speil for radiobølger.

De elektriske egenskapene til den øvre atmosfære ble kartlagt av Edward Appleton i 1930-årene. Han var den første som studerte refleksjoner fra den øvre atmosfære. Til dette benyttet han radiobølger som varierte i frekvens fra 1 til 10 MHz. For sine grunnleggende undersøkelser av radiobølgens utbredelse i atmosfæren fikk Appleton i 1947 Nobelprisen i fysikk.



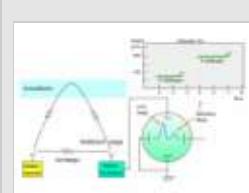
Marconis radiosending

Marconis radiosending fra Cornwall til New Foundland den 12. desember 1901 viste at det måtte finnes et elektrisk ledende lag i atmosfæren. Radiobølger har vært hovedverktøyet i utforskningen av ionosfæren fram til romalderen.

Snart oppdaget man flere lag i den øvre atmosfære. Appleton foreslo en inndeling etter alfabetet hvor han startet lavest med E-laget, og fortsatte med F-laget noe høyere i atmosfæren. (Han kalte det E-laget fordi han registrerte den elektriske komponenten av bølgene.) Målinger viste at F-laget splittet seg i to deler med hvert sitt maksimum. Lagene ble døpt henholdsvis F1 og F2. Senere ble det oppdaget et svakt D-lag under E-laget (figur nederst).

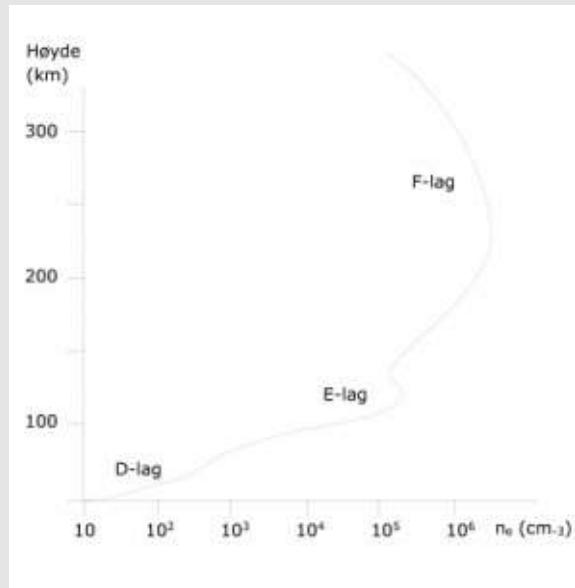
Ionosfæren over F-lagene ( $> 500$  km) kalles magnetosfæren. Dette skyldes at magnetfeltet her har en dominerende innflytelse på bevegelsene av de frie elektrisk partiklene.

Våre kunnskaper om ionosfæren før romalderen fikk vi ved bruk av ionosondeinstrumenter. En prinsippskisse er vist i figuren til høyre. Senderbølgen reflekteres fra ionosfærelagene og mottas av mottakeren sammen med den direkte bølgen fra senderen. På en skjerm kan vi se tidsforskjellen mellom de direkte og de reflekterte bølgene og intensiteten av dem. Fra disse observasjonene kan både elektronitettheten og høyden på ionosfærelagene beregnes.



Ionosonde

Prinsippskisse av et ionosondeinstrument.



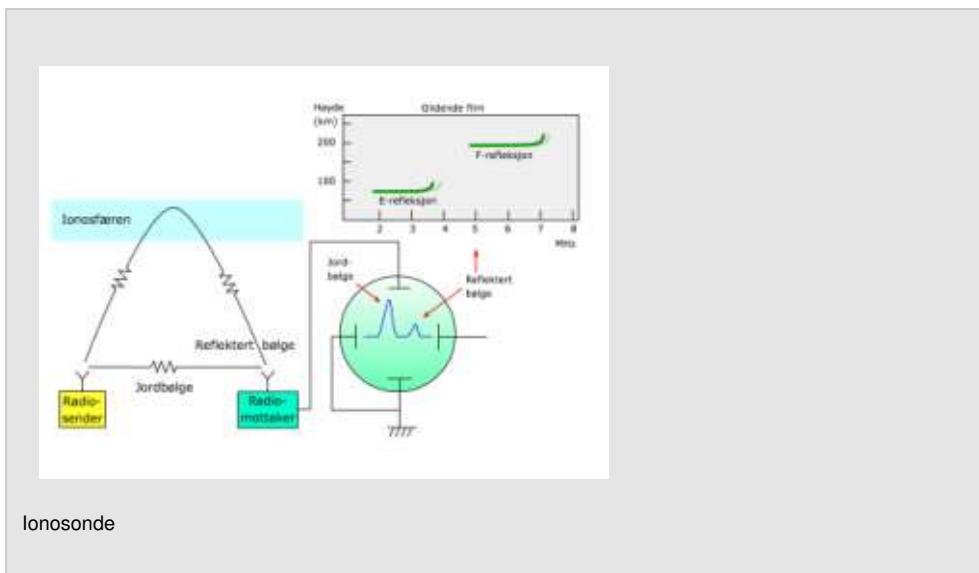
Ionosfæren

Elektrontetthetsprofil for en normal ionosfære på dagtid.

## Fordypning: Målinger av radioekko fra ionosfæren..

[Fordypning: Målinger av radioekko fra ionosfæren \(61665\)](#)

De første studiene av ionosfæren ved radiomålinger ble utført i 1927. Radioekkomålinger er fortsatt en viktig kilden til kunnskaper om ionosfæren. Instrumentet som brukes kalles et radioekkoinstrument eller en ionosonde. En prinsippskisse av virkemåten er vist i figuren under mens figuren nederst viser en radioekkoregistrering.



Hovedprinsippene i radioekkoforsøkene er følgende: Det sendes ut korte ( $50 - 100 \mu s$ ), høyfrekvente pulser (mellan 0,1 og 20 MHz) synkront med nettfrekvensen på 50 Hz. Ved mottakeren, som ligger mindre enn 1 km fra senderen, registrerer vi den direkte og den fra ionosfæren reflekterte bølgen. Tidsforskjellen mellom disse bølgene,  $\Delta t$ , måles nøyaktig. Senderfrekvensen økes jevnt over frekvensområdet i steg på 0,1 MHz. Man følger automatisk etter med avstemming av mottageren. Ekkoenes beliggenhet langs en tidsakse, på en oscilloskopskjerm, fotograferes som vist i figuren nederst. I dag brukes digital avlesning. Høyden  $h$  av ekkoene er gitt ved:

$$h = 0,5 \cdot \Delta t \cdot c$$

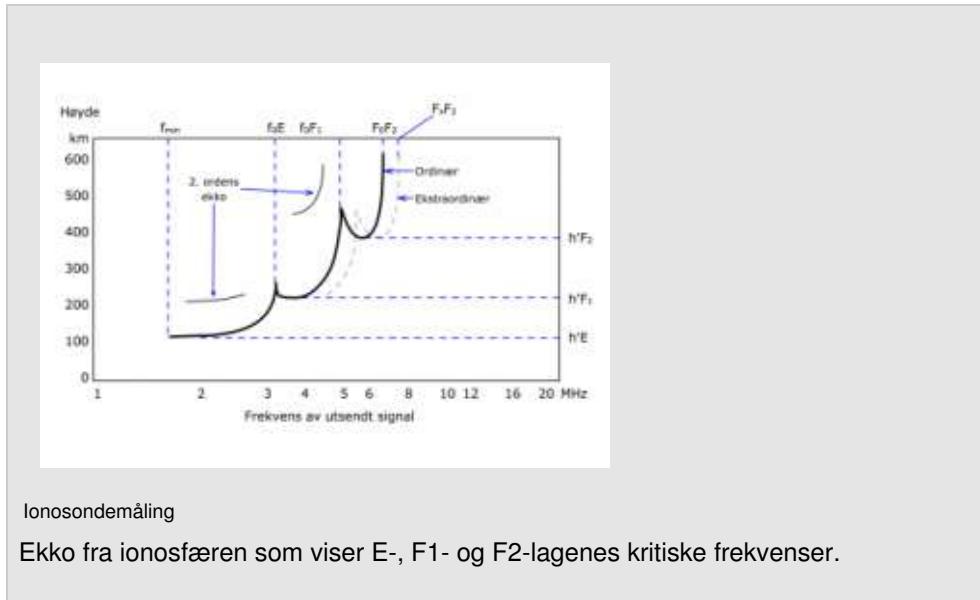
hvor  $c$  = lyshastigheten og  $h$  = den virtuelle høyden. Vi antar at radiobølgene hele tiden utbrer seg med lyshastigheten. Dette er ikke riktig nær refleksjonspunktet. Gruppehastigheten til en radiobølge, som er den farten bølgens energi utbrer seg med, er mye mindre enn  $c$  nær refleksjonspunktet. Vi observerer derfor en stor økning i den virtuelle høyden nær refleksjonspunktet.

På registreringen i figuren under legger vi merke til at frekvenser opptil ca. 3 MHz reflekteres fra en høyde mellom 100 og 130 km. Ved ca. 3 MHz bryter bølgen gjennom E-laget og vi får refleksjoner fra F-lagene mellom 200 og 300 km ved ca. 8 MHz. Frekvensen for bølgene som bryter gjennom E-, F- og F-lagene kalles kritiske frekvenser. Fra kritiske frekvenser, kalt  $f_c$ , kan vi regne ut elektronkoncentrationen fra følgende likning

$$n_e = 1,24 \cdot 10^{10} \cdot f_c^2$$

hvor  $f_c$  observeres i MHz.

Ekkoregistreringene viser en rekke trekk som krever en grundigere analyse. Fra slike registreringer som utføres på flere hundre steder jorda rundt, får vi kunnskaper om ionosfæren.



Ionometermåling

Ekko fra ionosfæren som viser E-, F1- og F2-lagenes kritiske frekvenser.

## **Den forstyrrede ionosfære**

Forfatter: Narom

[Den forstyrrede ionosfære \(61619\)](#)

Energetiske elektroner og ioner fra sola og magnetosfæren trenger inn i atmosfæren og bidrar til ekstraordinær produksjon av ioner og elektroner på høyere breddegrader. Slike forstyrrelser er nært knyttet til forekomsten av nordlys. Økningen i elektronitetthet fører til store forandringer i refleksjon og absorpsjon av radiobølger.

Forstyrrelser i ionosfæren på høye breddegrader kan forårsake totalt sammenbrudd i kortbølgekommunikasjon ("radio black outs"). De elektriske strømmene som settes opp i ionosfæren påvirker også kraftforsyning og kan føre til korrosjon i oljeledninger.

## Nordlys / Polarlys

Forfatter: Narom

[Nordlys / Polarlys \(61620\)](#)



Den vitenskapelige utforskningen av nordlys i vårt land ble innledet i 1882-83 med en norsk ekspedisjon sendt til Finnmark.

Professor Kristian Birkeland begynte i 1890-årene sine epokegjørende nordlysundersøkelser på samme sted, etter at han i 1896 hadde offentliggjort sin nye nordlysteori, og året etter laget kunstig nordlys i sitt berømte Terrella-laboratorium. Allerede i 1899 ble det første permanente nordlysobservatorium bygd på Halldetoppen i Alta. Fra da av kan man si at nordlyset har vært under kontinuerlig observasjon i Norge.



Nordlys tegnet av Nansen

Nordlyset tegnet av Fridtjof Nansen, først publisert i hans bok Nord i Tåkeheimen fra 1910.

### [Terrella](#)

Terrella

Bilde av de lysende ringene Birkeland kunne produsere rundt polene på terrellaen når denne ble bombardert med elektroner. Disse ringene representerer nordlys- og sydlyssonen.



Birkelands laboratorium

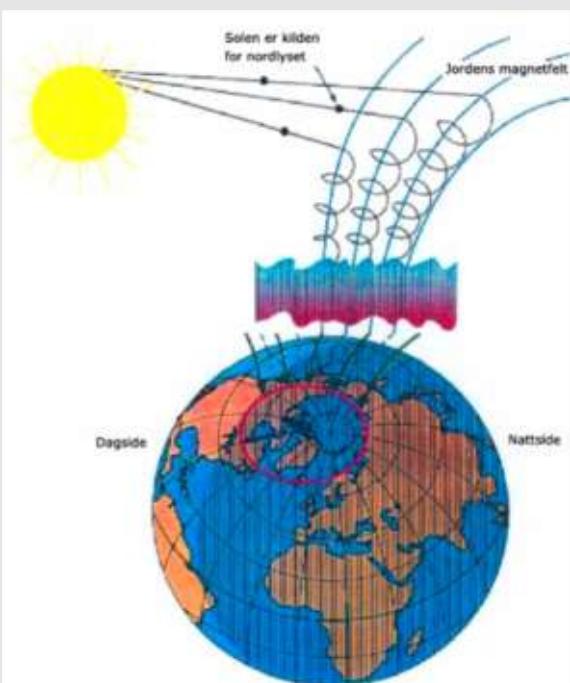
Professor Birkeland (1867 – 1917) i sitt laboratorium (Terrellalaboratoriet). Allerede i 1896 fremsatte Birkeland sin nordlysteori. Hovedideen var at elektrisk ladde partikler som beveget seg fra flekker på solas overflate ble innfanget av jordas magnetfelt, og styrt ned mot polområdene hvor de “tenner” atmosfæren og får dent til å lyse.

I 1909 lyktes det professor C. Størmer å ta de første brukbare bilder av nordlys. Ved samtidig fotografering fra to eller flere steder, med ca. 50 kilometers avstand, kunne han for første gang bestemme høyden av nordlyset.

I 1912 begynte professor L. Vegard sine banebrytende arbeider over nordlysets spektrum.

Birkelands teori gikk ut på at nordlys oppstår ved at elektroner fra sola styres mot jordas polområder av dens magnetfelt. Partiklene bremses i luften og i 100 – 300 km høyde tenner de atmosfæregassene slik at de lyser opp (jfr. figuren under). Birkeland demonstrerte sin nye teori i laboratorieforsøk slik som figurene av Terrella-eksperimentet viser. Disse modellforsøkene ble senere gjentatt mange steder i verden.

Det første kunstige nordlys i atmosfæren ble produsert i 1958, da en atombombe ble detonert i atmosfæren.



### Birkelands nordlysteori

Illustrasjon av Birkelands nordlysteori. Fra sola kommer solvinden. Partikler styres av jordas magnetfelt mot polområdene. De elektriske partiklene eksiterer gassene i jordas atmosfære slik at de lyser.



Carl Fredrik Mülertz

Størmer

Carl Fredrik Størmer (1874 – 1957) arbeidet gjennom et langt liv med å løse nordlysets gåte. Han ble utnevnt til professor i matematikk ved Universitetet i Oslo, i 1902. Størmer kartla nordlysets geografiske utbredelse og de ulike nordlysfenomener. Han bestemte nordlysets høyde. Størmer er også kjent for sine beregninger av nordlyspartiklenes (partikler med elektrisk ladning) baner i jordmagnetfeltet.



Lars Vegard

Lars Vegard (1880 – 1963) ble utnevnt til professor i fysikk i 1918. Hans store interesse var nordlysets farger. Vegard har fått hoveddæren for at Nordlysobservatoriet ble bygget i Tromsø, i 1927.



## Nordlysets fordeling i rom og tid

Forfatter: Narom

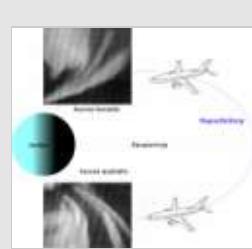
[Nordlysets fordeling i rom og tid \(60572\)](#)

Mer eller mindre samtidig som nordlyset oppstår på den nordlige halvkule opptrer det samme fenomenet, sydlys, på den sørlige halvkule. Endatil de samme formene er observert samtidig i sør og nord, så like at de nærmest er speilbilder av hverandre. Se illustrasjon. Fellesbetegnelsen for nordlys og sydlys er polarlys.

Polarlyset opptrer hyppigst og med størst intensitet i områdene rundt de magnetiske poler. Det er særlig hyppig i to ringformede soner; nordlys- og sydlyssonen, som ligger i middel omkring  $23^{\circ}$  eller  $\sim 2500$  km fra jordas magnetpoler. Sonene representerer det statistiske bildet basert på middelverdiene av et meget stort antall visuelle observasjoner. Polarlyssonene er ca. 500 – 1000 km brede, avhengig av aktiviteten på sola, og de ligger symmetrisk om magnetpolene.

Fordi vi hovedsakelig vil diskutere dette himmellyset sett fra Norge, vil vi i det følgende omtale fenomenet som nordlys, selv om det noen steder ville vært mer korrekt å bruke begrepet polarlys.

Fordi nordlyset skyldes vekselvirkning mellom magnetfeltet og ladde partikler fra solvinden, er nordlyset magnetisk orientert. Nordlys produseres også på jordas dagside, dvs. på den siden som vender mot sola. Men i en solbelyst atmosfære er det praktisk talt umulig å observere dette nordlyset fra bakken. Midtvinters, nord for polarsirkelen, lar det seg imidlertid gjøre når sola er under horisonten om dagen. Avstanden mellom nordlysringen og magnetpolen er mye mindre på dagsiden enn på nattsidén. Nordlysets fordeling som funksjon av rom og tid er illustrert i figurene på denne siden. Figurene viser at nordlyset observeres med størst intensitet langs en oval sone rundt magnetpolen, som kalles nordlysovalen.



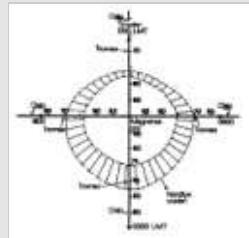
Symmetri i polarlyset

Nesten identiske nordlysformer kan forekomme samtidig på den nordlige- og sørlige halvkule. Disse to nordlysbildene er tatt samtidig fra to fly, ett over Alaska, mens det andre var syd for New Zealand. Flyene var samtidig på tilnærmet samme magnetfeltlinje. Pga. at sollyset og været er så forskjellig i nord og sør, er slike observasjoner som illustrert i denne figuren, meget begrenset.

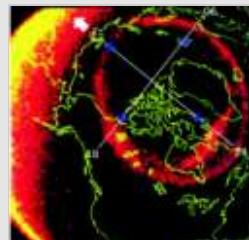


Nordlysovalens beliggenhet

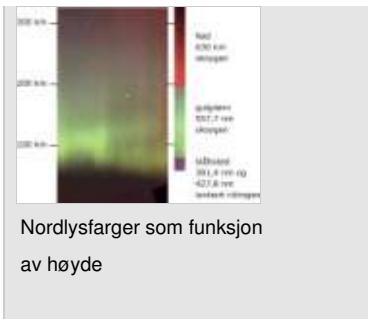
Nordlysovalens beliggenhet relativt til Nord-Skandinavia og Svalbard (NÅ= Ny-Ålesund, T = Tromsø og K = Kiruna) på forskjellige tider av døgnet. Den magnetiske nordpol er markert med +.



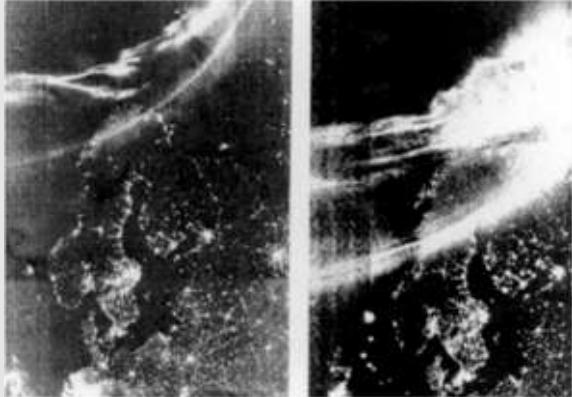
Nordlysovalens form  
En mer korrekt framstilling av formen og bredden på nordlysovalen som funksjon av lokal tid for middels sterk magnetisk aktivitet. Ovalens beliggenhet relativ til Tromsø og Oslo er også indikert.



Nordlysovalen  
Nordlysovalen fotografert i UV-lys fra satellitten Dynamic Explorer med magnetisk tid og Svalbards plassering tegnet inn i blått.  
(Figur: NASA/Alv Egeland)



Nordlysfarger som funksjon  
av høyde



Nordlysets beliggenhet

Nordlysets beliggenhet i relasjon til Skandinavia under rolige magnetiske forhold sees i det venstre bildet. Det er tatt fra en satellitt i ca. 800 km høyde. Til høyre er et tilsvarende bilde på en forstyrret/urolig natt. Nordlyset når da ned mot Trøndelag.

Som det framgår av figurene, er nordlysovalen ca. dobbelt så bred og sentrum er to ganger så langt fra polen ved magnetisk midnatt som ved magnetisk middag; henholdsvis ca.  $23^\circ$  og  $12^\circ$  fra polen. Videre viser figurene at den nattlige nordlysovalen går langs kysten av Troms og Finnmark. Her kan man observere nordlys de fleste klare netter i vinterhalvåret. På vår side av jorda ligger dagsiden av ovalen over Svalbard.

Fra rakter og spesielt satellitter, observeres nordlyset også i den ultrafiolette (UV) delen av spektret. UV-strålingen absorberes i atmosfæren, og nordlyset i UV-området kan derfor ikke registreres fra bakken, men kan sees fra satellitter og rakter utenfor atmosfæren. Nordlys kan også observeres indirekte om dagen via observasjoner av nordlyspartikler, samt ved magnetiske forstyrrelser på bakken som skyldes elektriske strømmer i nordlysområdet og ved bruk av radiobølger.

For at man skal kunne observere dagnordlys fra bakken må man være ca.  $15^\circ$  fra magnetpolen, samt ha sola minimum  $10^\circ$  under horisonten nær magnetisk middag.

Svalbards beliggenhet er gunstig for optiske studier av dagnordlys. Systematiske undersøkelser av dagnordlyset over Svalbard begynte først omkring 1980. Siden da og spesielt etter 1990 er infrastrukturen for nordlysstudier fra Svalbard bygd betydelig ut.

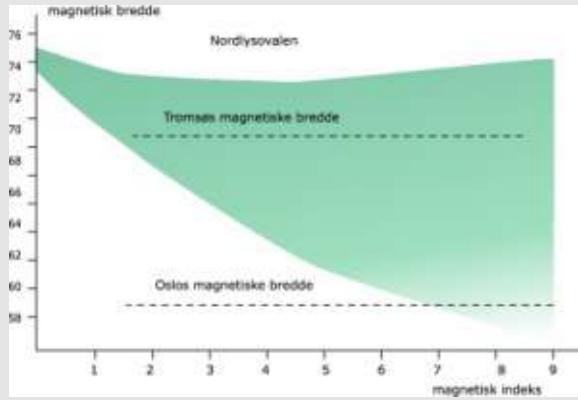
På grunn av solvindens vekselvirkning med jordas magnetfelt oppstår en kløft i magnetfeltet på dagsiden av jorda, omtrent  $12 \pm 3^\circ$  fra de geomagnetiske polene. For solvinden representerer disse polarkløftene på den nordlige og sydlige halvkule direkte kanaler fra det interplanetære rommet til den polare atmosfære. Polarkløftene er derfor unike "kikkehull" mot det store verdensrom og sola. Dagnordlyset er et resultat av partikkelnedbøren i kløftene.

På den nordlige halvkule ligger dagsiden av nordlysovalen over Svalbard og Frans Josefs Land ved magnetisk middag nær 0830 UT  $\pm 2$  timer og når sola er mer enn under horisonten. Dette inntrer i to måneder rundt vintersolverv. Landfaste stasjoner for visuelle observasjon av dagnordlyset på den nordlige halvkule, må legges enten til Svalbard eller til Frans Josefs land. Derfor har Svalbard – pga. sin beliggenhet og infrastruktur, en unik beliggenhet for studier av nordlys og andre forstyrrelser i de polare kløftene.

Forekomsten og intensiteten av nordlys er nært forbundet med forstyrrelser i jordas magnetfelt, og aktiviteten på sola. Også under uforstyrrede forhold vil det være nordlys, men nordlyset kan da være så svakt at vi ofte ikke kan se det med bare øyet. Nordlyset ligger da nærmere polene, henholdsvis ca.  $20^\circ$  om natten og ca.  $10^\circ$  om dagen. Etter hvert som solaktiviteten øker, øker intensiteten av lyset og ovalen blir bredere. Ovalen utvider seg både mot polen og spesielt mye mot ekvator når aktiviteten på sola øker.

På den sørlige halvkule ligger polarkløften over det antarktiske kontinent. Klimaet og avstandene vanskelig gjør kontinuerlige observasjoner i Antarktis.

I samband med de aller største forstyrrelser på sola, som i gjennomsnitt forekommer 2–10 ganger per år, kan nordlyset ligge mer enn  $30\text{--}40^\circ$  fra magnetpolene. Hvordan nordlysovalen flytter seg og blir bredere som funksjon av magnetisk aktivitet, er illustrert i figuren under. I gjennomsnitt kan vi se nordlys over Oslo-området (langt borte fra bylyset) hver 10. stjerneklaire vinternatt, mens det kan gå mange år mellom hver gang nordlyset viser seg i Sør-Europa ( $> 50^\circ$  fra polen).



Halvverdibredden

Halvverdibredden (dvs. det området hvor nordlyset forekommer 50 % av tiden eller mer) og beliggenheten av nordlysovalen nær magnetisk midnatt som funksjon av lokal magnetisk aktivitet. Bare om den magnetiske indeksen når 7 eller mer, kan vi forvente å se nordlys i senit over Oslo.

Nordlys opptrer også i de sentrale polarområdene, innenfor ovalene. Men lyset er der vanligvis mye svakere enn i ovalene, og spekteret er forskjellig. Dette polarnordlyset har kort varighet, og det opptrer hyppigst under rolige magnetiske forhold. Polarnordlyset er antikorrelert med den magnetiske aktivitet, i motsetning til hva vi har i ovalen. Fortsatt er egenskapene til dagnordlyset og lyset i den sentrale polarkalotten ikke detaljert kartlagt, men våre kunnskaper har øket betydelig siden 1980.

Sol-jord-orienterte buer er en vanlig nordlysform i polarområdene. Disse opptrer bare under spesielle forhold på sola, nemlig når IMF  $B_Z > 0$ . Dette er normale betingelser for rolige magnetiske forhold. De sol-jord-orienterte buene kan brukes som “naturens egen klokke”, fordi de viser retningen til sola. Skyformede nordlys (patches) opptrer ofte på polsiden av ovalen for IMF  $B_Z < 0$ . Kilden til patches er fortsatt ikke klarlagt.

# Former og struktur i nordlyset

Forfatter: Narom

[Former og struktur i nordlyset \(60601\)](#)

Ved et nordlysutbrudd kan en iaktta de mest fantastiske former og strukturer. Nordlyset kan være splittet opp i lange, tynne stråler som kan opptre som en egen form, eller de kan stå sammen og danne kroner og draperier. Homogene buer og bånd, samt diffuse flekker og flater klassifiseres som rolige former. Stråler, kroner, draperier og buer og bånd med strålestruktur er aktive former med mye dynamikk.

Ved å iaktta noen store nordlysutbrudd kan en lett få det inntrykk at et forvirrende stort antall former forekommer. Figurene over og til høyre illustrerer noen karakteristiske nordlysformer.

Et nærmere studium viser at en kan forklare observasjonene med noen få elementære former og strukturer som varierer i rom og tid. Det er viktig å være oppmerksom på at en nordlysform, parallel med jordas magnetfelt, vil se forskjellig ut om en er på pol- eller ekvatorsiden av ovalen. Følgende former er karakteristiske og forekommer hyppig:

## Buer og bånd

Rolige former. Nordlyset kan strekke seg i lange (mer enn 1000 km) buer eller bånd. Disse har en retning som er vinkelrett på de magnetiske feltlinjene. De kan være enkle eller sammensatt av flere, opptil fem, seks parallelle former samtidig. Deres horisontale bredde kan variere fra noen hundre meter til noen titalls km. Deres synlige vertikale utstrekning er også noen få titalls kilometer. Forskjellen mellom buer og bånd fremgår av figuren over. Som figuren viser er buene meget regelmessig i form, mens båndene kan ha store strukturer. Under rolige forhold på sola, er både buene og båndene diffuse i form.

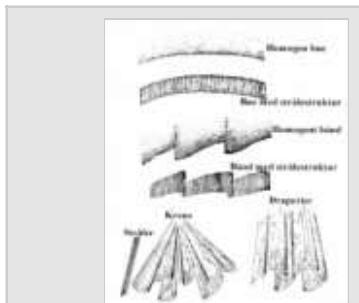
## Aktivt nordlys med strålestruktur

Nordlyset kan være splittet opp i lange, tynne stråler, som ligger langs de magnetiske feltlinjene. Lengden av strålene kan variere fra noen titalls til flere hundre kilometer. Nordlysstrålene kan opptre som egen form, de kan danne kroner/koronaer eller draperier, eller de kan gå gjennom buer og bånd; dvs. vi har buer og bånd med strålestruktur.

## Diffuse flekker og flater

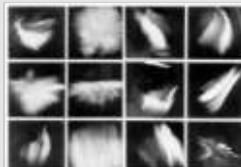
Andre typiske former er diffuse, skylignende flater, vanligvis av gråliggrønn farge. Disse flatene dekker ofte flere hundre kvadratkilometer og opptrer mest på morgensiden (4 – 8 timer etter magnetisk midnatt). Fordi det er lite struktur i disse formene er de ofte vanskelige å se med det blotte øyet.

## Spiralstrukturer



Skisse av noen vanlige nordlysformer. Draperier kan minne om metallpipene i et stort kirkeorgel. De strekker seg tilnærmet loddrett fra horisont til høyt på himmelen, mens de stadig varierer i høyde og intensitet. Det var denne formen som var bakgrunnen for logoen for vinter-OL i 1994 på Lillehammer.

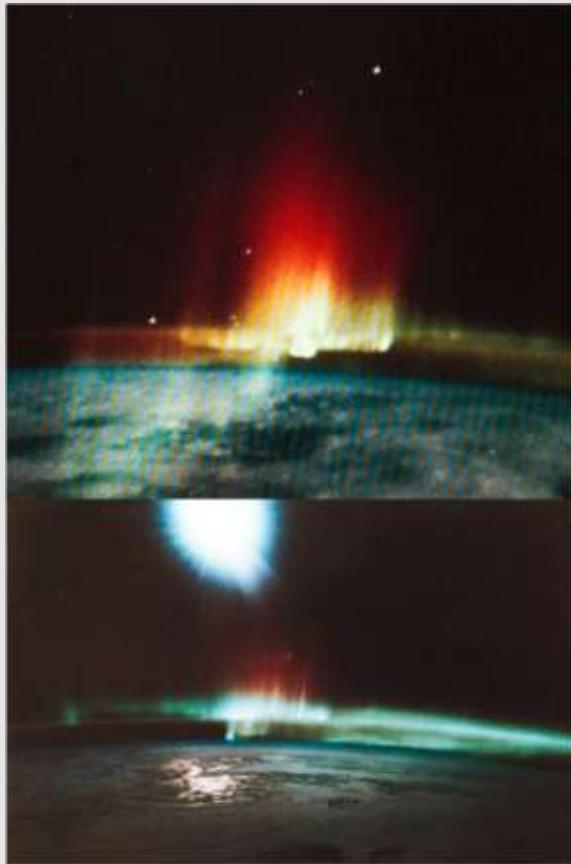
Forfatter: [Narom](#)



Nordlys med strålestruktur

Fotografier tatt med Størmer/Krogness nordlysameraet.

Spesielt ved store nordlysutbrudd forekommer ofte mange forskjellige geometriske former, som f. eks. store spiralstrukturer. Typiske dimensjoner kan være fra 10 – 100 km. De er spunnet opp i bestemte retninger. Et eksempel, tatt fra en av romfergene, sees i figuren under. Små spiralstrukturer i nordlyset som roterer hurtig rundt, kalles krøller ("curls").



Nordlys sett fra romferge

Eksempler på nordlys tatt fra en av romfergene ca. 350 km over bakken.

Skal vi studere de svake, små strukturene i lyset og deres variasjoner, må vi ha spesiallagede tv-kameraer som tar flere bilder av nordlyset pr. sekund. Det er snakk om strukturer i nordlyset som har dimensjoner mindre enn 100 m, og nordlysintensitet langt under øyets terskelverdi, det svakeste lys som øyet kan oppfatte, samt nordlysets hurtige bevegelser. Slike opptak viser ofte små strukturer med varighet mellom 0,2 og 10 sekund. De tynteste strålene observert i nordlyset, har dimensjoner mindre enn 100 m.

Det finnes noen nordlysforskere som bare skiller mellom to typer av nordlys: diffuse eller diskrete former.

## Nordlysets høyde

Forfatter: Narom

[Nordlysets høyde \(60605\)](#)

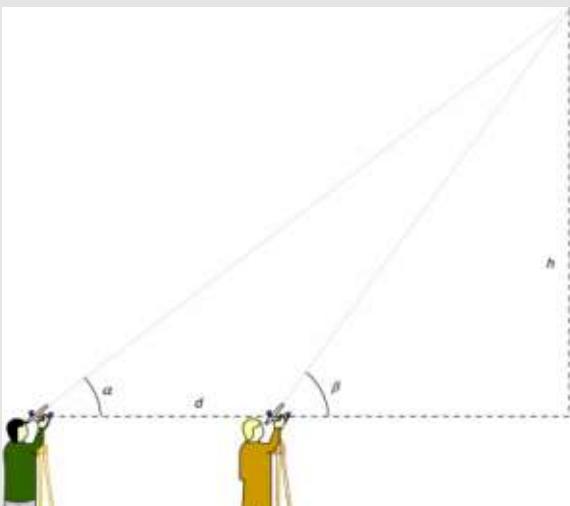
Neppe noe annet ved nordlyset er blitt mer inngående studert og diskutert enn dets høyde. Fra ca. 1700-tallet til begynnelsen av det 20. århundre var dette et kontroversielt spørsmål. Noen mente at middelhøyden for nordlys var omkring 1000 km, mens andre påstod at nordlyset kom helt ned til jordoverflaten.

Professor Carl Størmer bestemte høyden av nordlysene (basert på samtidige, parallaktiske fotografier av nordlyset fra to eller flere stasjoner) i tidsrommet 1910-40. Størmer innførte den fotografiske teknikk i nordlysstudiet. Sammen med sin medarbeider O. A. Krogness bygde han de første nordlyskameraene som hadde nok følsomhet til å ta gode bilder av nordlys med en eksponeringstid på noen få sekunder. Størmers metode tillot i prinsipp en rekonstruksjon av hver enkelt nordlysform. Høyden for maksimal intensitet; samt nordlysets underkant og overkant ble regnet ut. Nordlysets høyde varierer mye med form, tid og geografisk bredde (se tabell). Derfor var en nødvendig med kontinuerlig overvåking over flere solflekkperioder.

Geografiskt	Middelhøyde i km (målinger)	Middelhøyde i km (regnet)
Arktisk sirkel	100	100
65° N	100	100
60° N	100	100
55° N	100	100
50° N	100	100
45° N	100	100
40° N	100	100
35° N	100	100
30° N	100	100
25° N	100	100
20° N	100	100
15° N	100	100
10° N	100	100
5° N	100	100
0° N	100	100

Tabell - Nordlyshøyde

Middelhøyden av nordlyset basert på bakkemålinger i perioden 1910 til 1940. Høyden er gitt i km etterfulgt av antall målinger.



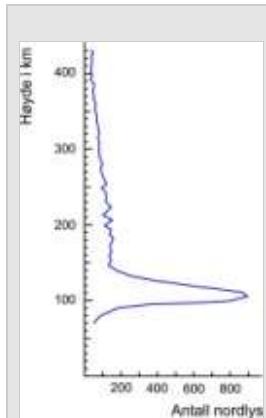


### Størmers trianguleringsmetode

To observatører med kjent innbyrdes avstand,  $d$ , måler samtidig retningen til et bestemt punkt i et nordlys. Det er viktig at samme stjernebilde sees i begge fotografiene. Da er det lett å regne ut høyden ved å benytte formelen i figuren. En må ta hensyn til at jordas overflate er krum. Hovedproblemet var å sikre at begge observatører måler på samme punkt i nordlyset til nøyaktig samme tid. Dette ble løst ved hjelp av telefonforbindelse.

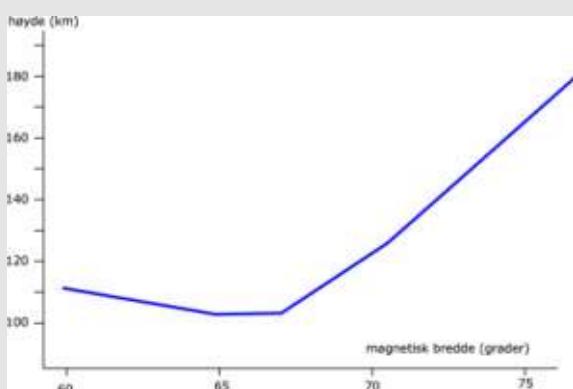
Høydefordelingen av omkring 20 000 parallaktiske målinger utført av Størmer og hans medarbeidere er vist i figuren. De aller fleste nordlys har maksimal intensitet i høydeintervallet 100–150 km. Nordlys kan helt unntaksvis nå ned til omkring 85 km, mens det relativt ofte forekommer mellom 200–300 km. En sjeldent gang strekker nordlysstråler seg mot 500 km.

Høyden av nordlyset varierer også med avstanden fra nordlyssonen. Dette er illustrert i figuren under. Diffuse flater og bånd har de laveste høyder, mens nordlysstrålene ligger lengst borte fra jordoverflaten (se figurene nederst på denne siden).



Nordlyshøyde

Den statistiske  
fordeling av de mer  
enn 20.000  
høydemålinger av  
nordlys som Størmer  
og hans medarbeidere  
utførte. Den vertikale  
skalaen angir høyden  
i kilometer, mens den  
horisontale skalaen  
angir antall  
observasjoner. Legg  
merke til at  
hovedmengden av  
nordlysene har  
maksimal intensitet  
mellan 90 og 200 km.



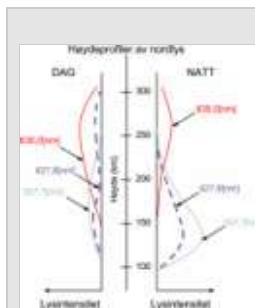
Middelhøyde

Kurven viser hvordan middelhøyden av nattnordlys varierer med de magnetiske breddegrader. Nordlyset er lavest midt i ovalen, og høyden øker raskt mot polene.

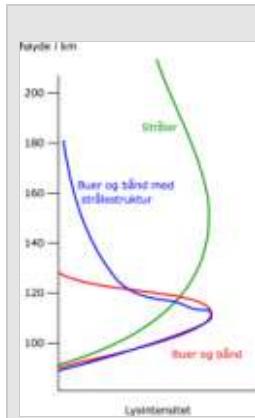
I 1926 oppdaget Størmer solbelyst nordlys. Det ble observert under spesielle forhold i demringslys; dvs. når sola belyser de øvre luftlag mens det er mørkt opp til ca. 2–300 km. De solbelyste nordlysstrålene kan nå opp til mer enn 1000 km. At nordlys kunne nå slike høyder stimulerte utforskningen av den ytterste atmosfære og ionosfære i betydelig grad. Dette førte til at oppfatningen om atmosfærrens sammensetning og tetthet over noen 100 km høyde måtte revideres fullstendig. Etter 1926 var derfor observasjoner av solbelyste nordlys en fast del av Størmers program.

Middelhøyden av dagnordlys er godt over 200 km (se figuren), mens de fleste nordlys innenfor polarkalottområdet har høyder over 150 km.

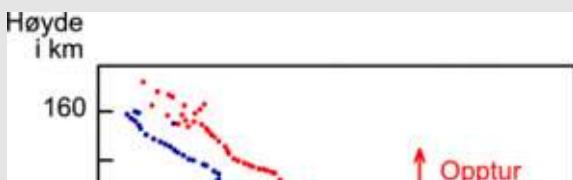
Bare ved bruk av instrumenterte raketter som flyr gjennom nordlyset er det mulig å få en nøyaktig høydeprofil av nordlysformene. Mange slike observasjoner av nattnordlys er utført siden 1960, mens ytterst få lignende registreringer er utført av dag- og polarkalottnordlys. Et typisk eksempel som viser et høydesnitt gjennom en nordlysglow (diffus nordlys) over Andøya Space Center er illustrert i følgende figur:

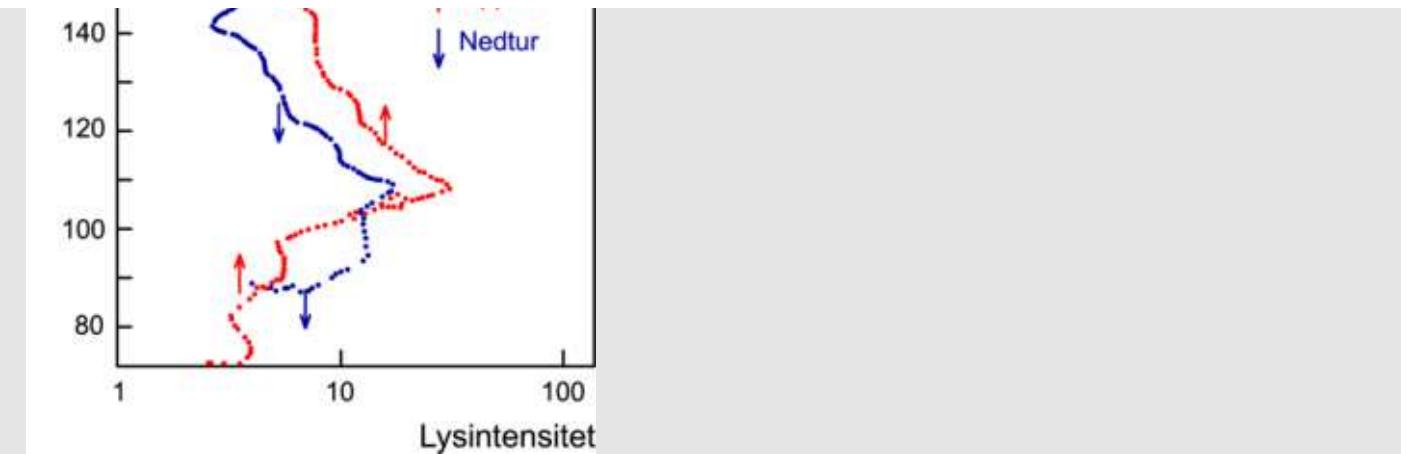


Høydeprofiler av nordlys  
Sammenligning av høydefordelingen av noen typiske nordlysemisjoner i dag- og nattnordlys.  
Generelt kan vi slå fast at dagnordlysene forekommer høyere opp i atmosfæren enn nattnordlysene, og høydeforskjellen er ca. 100 – 150 km. Det røde lyset ved 630 nm er mye sterkere i dagnordlyset enn i nattnordlyset.



Høydefordeling av nordlys  
Høydefordelingen av ulike nordlysformer bestemt fra rakettobservasjoner.





#### Rakettmåling

Vi ser her hvordan lyset, i en nordlysglow, varierer med høyden. Figuren er basert på fotometermålinger i en rakett. Kurvene med piler viser dataene fra opp- og nedturen til raketten. Høydefordelingen av lyset varierer en del i løpet av et par minutter. Legg merke til at vi har maksimum ved 110 km på både opp- og nedtur. Underkanten av nordlyset avtar hurtig.

# Nordlysets intensitet og fargespektrum

Forfatter: Narom

[Nordlysets intensitet og fargespektrum \(61082\)](#)

Nordlyset er et lyssvakt fenomen. Den vanlige styrken er 10 til 100 ganger øyets terskelverdi en mørk, stjerneklat natt (se tabell 9.3). Intensiteten av det synlige nordlyset kan variere over mer enn tre størrelsesordener. Ved maksimal intensitet kan belysningen på bakken sammenlignes med månelyset, og det er ca. 1000 ganger sterke enn stjernelyset. I Kongespeilet (fra ca. år 1230) står at man kunne gå på jakt når nordlyset var på det sterkeste.

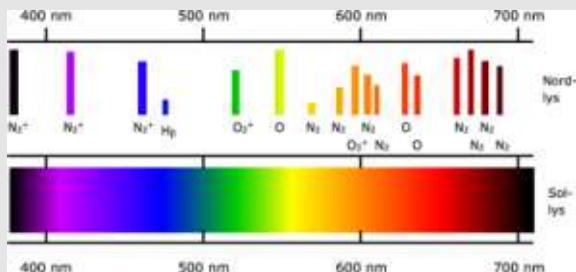
Nordlysets intensitet angis i Rayleigh (R). En R er lyset fra  $10^6$  fotoner/cm<sup>2</sup> og sekund. Lyset sett fra bakken er lyset i bunnen av en kolonne (rør) gjennom atmosfæren. Lyset kommer derfor fra et volumelement som stråler i hele nordlyshøyden.

Det svakeste nordlys vi kan se med det blotte øye er ca. 1000 R (1 kR) (jfr. den grønne nordlyslinjen). Det betyr at det må sendes ut ca.  $10^9$  fotoner pr. cm<sup>2</sup> overflate av nordlyset pr. sekund (eller ca. 400 fotoner pr. cm<sup>3</sup> og sekund) ved 557,7 nm. Selv om nordlyset er svakt, blander det av de fleste stjernene; dvs. en kan ikke se disse gjennom sterkt nordlys. Når nordlyset er på det aller sterkeste, kan belysningen på bakken bli betydelig. Sjekk tabellen for å sammenligne nordlysets intensitet med andre naturlige lyskilder.

Lyskilder	Lyseffekt [mW/m <sup>-2</sup> ]
Sola	$1,4 \cdot 10^6$
Fulmånen	3
Mye sterkt nordlys	1
Synlig nordlys	1/1000
Totalt stjernelys	2/1000
Natthimmellys	2/100

Tabell - Nordlysintensitet

Nordlysintensiteten i relasjon til sola, månen og stjernelys.



Nordlysspekter

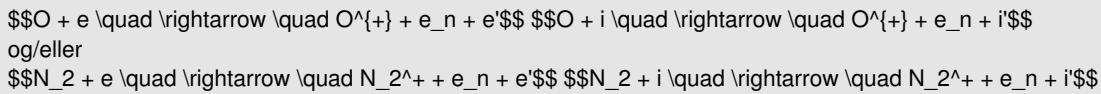
Noen viktige deler av det optiske spektrum i det synlige området av spektret. De viktigste nordlyslinjer og -bånd i denne figuren har følgende bølgelengder: 391,4; 427,8; 470,9; 486,1 ( $H_\beta$ ); 557,7; 630; 636,4 og 656,3 ( $H_\alpha$ ) nm.

Fargene i nordlyset består av en rekke spektrallinjer og -bånd i det synlige området, samt i den ultrafiolette og i den infrarøde del av spektret (se figuren over). Spektrallinjene (båndbredde < 0,1 nm) kommer fra elektronoverganger i atomer. Molekylene er kilden til de brede båndene i spektret.

For å forklare spektrene må vi gå til atomenes og molekylenes indre, hvor elektroner svever omkring tyngre kjerner. Lyset oppstår når energirike, ladde partikler i solvinden bombarderer atmosfæregassene og overfører noe av sin energi til disse. Ved direkte støt mellom solvindpartiklene og atomer, ioner eller molekyler i atmosfæregassene blir energi overført. En del av energien kan tas opp som indre energi av elektronene som sirkler rundt kjernen. Dette skjer ved at et elektron hopper opp i en bane med høyere energi. Når atomet, ionet eller molekylet har fått et slikt energitilskudd, sier man at det er eksitert. I kjemiske former markerer vi det med en stjerne (\*). Bare ca. 1 til 2 % av energien til solvindpartiklene går til eksitasjon. I kollisjonsprosessen kan gassen bli både ionisert og eksitert samtidig og mer enn 40 % av energien går med til ionisasjon av nøytrale atomer og molekyler i atmosfæregassene.

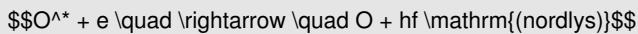
## Fordypning: Ionisasjon av nøytrale atomer og molekyler

Ionisasjonen kan vi symbolisk skrive



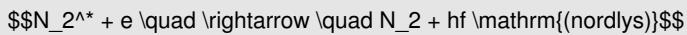
hvor  $e$  og  $i$  er henholdsvis elektroner og ioner som bombarderer gassen.  $e'$  og  $i'$  er elektronet og ionet etter kollisjonen. Deres energi er  $eV$  og  $eV$ .

Ioneparene som dannes er enten  $\text{O}^+ + e^-$  eller  $\text{N}_2^+ + e^-$ , fordi vi valgte gassene  $\text{O}$  og  $\text{N}_2$ . Alle gassene i atmosfæren kan på lignende måte delta i ioniseringsprosessen. Likningene over viser at ved kollisjoner mellom solvindpartiklene og atmosfæregassene kan elektroner ( $e$ ) rives løs fra atomet eller molekylet.  $e$  er et fritt elektron med liten (termisk) energi. Laboratoriestudier har vist at i middel går det med ca. 36 eV til produksjon av hvert ionepar, uavhengig av initiell energi til partiklene fra solvinden. Ved støtprosessen som er skissert i likningene over, blir atomene og molekylene eksitert. Symbolisk skrives dette på følgende måte ( $hf$  er ett nordlysfoton, dvs. ett lyskvant):  $\text{\$O} + e \rightarrow \text{O}^* + hf$ .  $\text{O}^*$  er ustabil. Den går tilbake til grunntilstanden eller et lavere energinivå ved å sende ut lys, nordlys.



Nordlys ved 557,7 og/eller 630,0 nm blir produsert. På lignende måte får vi for molekylært nitrogen  $\text{\$N}_2 + e \rightarrow \text{N}_2^* + e$

Levetiden for  $\text{N}_2^*$  er meget kort ( $\sim 10^{-7}$  sekund). Molekylet går derfor hurtig til grunntilstanden ved å sende ut lys.



Vi får nordlys ved 391,4 og/eller 427,8 nm og flere svakere bånd.

Et eksitert atom, molekyl og/eller ion vil normalt være mindre enn  $10^{-7}$  sekund i en slik tilstand før det må avgi sitt energioverskudd. Dette skjer ved et kvantesprang fra høyere til lavere energitilstander. Da sendes ett eller flere fotoner ut. Et eksitert atom, molekyl eller ion sender alltid ut fotoner med en bestemt bølgelengde og farge. Fra laboratorieforsøk kjänner vi spektrene for de forskjellige gassene. Ved å sammenligne disse med spektra av nordlys, kan vi derfor finne ut hvilke gasser som sender ut lys i den øvre atmosfære.

Den sterkeste linjen i den synlige del av spektret er den grønne oksygenlinjen ved 557,7 nm. Det er denne linjen som gir nordlyset dets karakteristiske grønne (gulgrønne) farge. I det røde området av spektret har vi to sterke oksygenlinjer på 630 og 636,4 nm (figuren over) og en rekke nitrogenbånd. Rød overkant betyr at nordlyset opptrer i store høyder, og denne rødfargen kommer mest fra 630 nm.

## Fordypning: Nordlyset brukt som termometer.

Nordlyset inneholder også informasjon om temperaturen i den gassen som sender ut lyset. Temperaturen kan bestemmes på følgende to måter:

1. Nøyaktige målinger av bredden på enkelte nordlyslinjer
2. Nøyaktig bestemmelse av intensitetsforholdet mellom de forskjellige emisjonsbåndene fra nitrogen.

Fra slike observasjoner kan en få informasjon om temperaturen for den atmosfæregassen som sender ut nordlyset. Det var professor L. Vegard som først brukte denne metoden for temperaturmålinger. For at metoden skal ha generell nytte må en anta at de atomene og molekylene som sender ut lys er i temperaturlikevekt med resten av gassen i dette høydeområdet.

Som nevnt har den røde nordlyslinjen ved 630 nm en levetid på ca. to minutter. Antakelsen om termodynamisk likevekt (se punkt 1) er derfor rimelig. De fleste nitrogenbåndene har levetider på mindre enn en milliondels sekund. På så kort tid kan ikke temperaturen i de emitterende molekylene forandre seg mye fra den omgivende gassen. Derfor bør også målingene referert til i punkt 2 gi realistiske temperaturer for atmosfæren i nordlyshøyden. Før rakter og satellitter ble tatt i bruk, var nordlysobservasjonene den eneste måten en kunne få informasjon om temperaturen i høydeområdet 100 – 300 km som normalt varierer mellom 400 og 1500 K.

# Nordlyspartikler

Forfatter: Narom

[Nordlyspartikler \(61168\)](#)

Kilden til nordlyset er partikler med energi mellom 10 eV og noen få 100 keV. Det er elektroner og ioner som kommer fra solvinden. På grunn av jordas magnetfelt bombarderer disse partiklene den øvre atmosfære på polsiden av ca. og ofte magnetisk bredde. Nordlyspartiklene er meget variable både i antall og i energi. Disse partiklene er også direkte og indirekte kilden til magnetiske stormer og forstyrrelser i ionosfæren. Aktiviteten er nært knyttet til hva som foregår på sola.

På sin vei nedover i atmosfæren vil partiklene dels frembringe lys og dels ionisere gassene. I et visst nivå vil partiklene være fullstendig absorbert. Dette nivået bestemmer underkanten på nordlyset. Ingen av disse nordlyspartiklene når ned til jordoverflaten. Bare de mest energirike partiklene når under 100 km før de pga. kollisjoner har mistet sin energi. Da blir de partikler med lav energi (populært kalt kalde) og inngår i den regulære ionosfære. Skal vi få detaljerte kunnskaper om nordlyspartiklene må vi derfor bruke instrumenterte raketter og satellitter. Partikkelenergien i forbindelse med nordlys er meget stor.

For å kunne regne detaljert på partiklene må vi kjenne

- energien til partiklene,
- antall partikler (dette kaller vi fluksen) som bombardere den polare atmosfære,
- retningen til partiklene relativ til jordas magnetfelt, det vi kaller pitchvinkel og
- sammensetningen av nedbøren, dvs. fordelingen mellom elektroner og ioner.

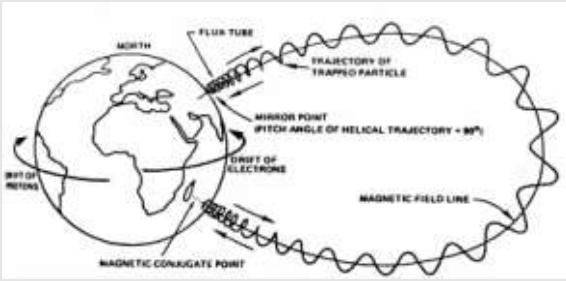
I et typisk nordlys vil i middel 1-2 % av partikkelennergien avgis som lys. Nordlyspartikkelenedbøren kan gå opp til  $10^{12}$  partikler/cm<sup>2</sup> og sekund.

For elektroner med energi høyere enn ca. 20 keV foregår mesteparten av eksitasjonen under 90 km. I dette høydeområdet er tettheten og dermed kollisjonsfrekvensen meget høy. De eksisterte partiklene mister sin energi pga. kollisjoner, og dermed blir lysutbyttet praktisk talt null.

Nordlysovalen er det beste mål for hvor brorparten av nordlyselektronene med energi mindre enn 20 keV treffer ionosfæren. Men nordlyset er ikke noe godt mål for hvor elektroner med energi over ca. 20 keV og ioner > 200 keV vekselvirker med den polare atmosfæren. Om vi fra bakken skal finne ut hvor de treffer ionosfæren må vi bruke radiobølger. Det enkleste og mest brukte instrumentet er da et riometer.

## Fordypning: Generelle egenskaper for nordlyspartiklene i magnetosfæren.

En generell behandling av de ladde partiklene i magnetosfæren er komplisert. Det var professor Carl Størmer som først studerte bevegelsen av elektrisk ladde partikler i et dipolfelt. Partiklenes spiralbevegelse ble møysommelig integrert for hånd i årene etter 1904. Det var ikke mulig for Størmer å finne en analytisk løsning på bevegelseslikningene. Mer enn 18 000 timer brukte Størmer og hans studenter på dette arbeidet. Professor H. Alfvén forenklet i 1940-årene utregningene ved å innføre gyrosenter-tilnærmelsen, dvs. i stedet for å beregne partikkelenes bane regnet han først ut hvordan sentrum i banen til partikkelen beveget seg. Etterpå la han over gyrobevegelsen.



Bevegelse av nordlyspartikler

Figur: De tre adiabatiske invariantene i jordas magnetosfære - gyrobevegelser, speilbevegelser og driftbevegelser.

Figuren illustrerer karakteristiske partikkelbevegelser i jordas magnetfelt. Bevegelsene av elektrisk ladde partikler er karakterisert ved de tre såkalte adiabatiske invariantene, nemlig:

- gyrobevegelsen
- speilbevegelsen
- driftbevegelsen

En invariant betyr i de fleste tilfellene en konstant, men i enkelte tilfeller en tilnærmet konstant. Partikkelbevegelsene i elektriske- og magnetiske felt, slik vi har i magnetosfæren, utgjør til sammen et komplisert bevegelsesmønster. De tre adiabatiske invariantene er kort omtalt i det følgende:

### Gyrobevegelsen

Nordlyspartikkelen (med masse  $m$ ) roterer (ofte kalt gyrerer) rundt magnetfeltet. Partikkelens hastighetsvektor,  $v$  dekomponeres langs og på tvers av magnetfeltet. Partikkelens magnetiske moment,  $\mu$ , er gitt ved den første adiabatiske invarianten.

$$\mu = \frac{m v^2 \sin^2 \alpha}{B} = \text{konstant}$$

Siden partikkelens energi er bevart, har vi at

$$v^2 = v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 = \text{konstant}$$

Om partikkelen beveger seg mot jorda øker intensiteten av magnetfeltet. Da må også  $\sin^2 \alpha$  øke for at  $\mu$  skal være konstant. Dette fører til at vinkelen mellom  $v$  og  $B$  øker. Maksimal verdi for uttrykket får vi når  $\sin^2 \alpha = 1$ ; da er  $\alpha = 90^\circ$ . Partikkelens fartsvektor står da normalt på magnetfeltet. Da er  $v_{\parallel} = 0$  slik at

$$\mu = \frac{m v^2}{B_m} = \text{konstant}$$

hvor  $B_m$  = feltet som svarer til at vinkel  $\alpha = 90^\circ$ ; dvs. feltet på det stedet hvor partikkelen snur. Dette punktet kalles speilingspunktet. Konklusjonen er at det magnetiske momentet til elektronene og ionene i det nære verdensrommet er konstant.

## Speilbevegelsen

Nordlyspartiklene beveger seg fram og tilbake langs magnetfeltet, mellom speilingspunktene på den nordlige og sørlige halvkule som illustrert i figuren. Vi kan regne ut  $B_m$  ved speilingspunktet. Tiden partiklene bruker fra det ene speilingspunktet (fra den nordlige halvkule til den motsatte) til det andre, er konstant. Det er på grunn av Lorentz-kraften at partikkelen snur i speilingspunktene. Vinkelen til partikkelen i ekvatorplanet, er gitt ved

$$\sin \alpha_0 = \left( \frac{B_0}{B_m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

der  $B_0$  = B-feltet i ekvatorplanet, mens  $B_m$  er B-feltet i speilingspunktet.

Tabellen nedenfor viser typiske verdier for gyringstid, speilingstid og tid for drift rundt jorda. Det er antatt at vinkelen  $\alpha = 6^\circ$  i ekvatorplanet og at elektronene og ionene (protoner) beveger seg langs en feltlinje som ligger  $\approx 6 R$  ut i ekvatorplanet; dvs. feltlinjene har ett fotpunkt nær ARS.

	Gyringstid	Speilingstid	Driftstid
Elektron (80 keV)	0,0003 s	1,3 s	2,2 timer
Proton (110 keV)	0,4 s	33 s	58 minutter

Tabell - Adiabatiske invarianter

Hvis  $\sin^2 \alpha$  er mindre enn 1 i speilingspunktet finnes det ikke noen  $B_m$  som er stor nok til å snu partikkelen. Partikkelen vil da lekke ut av den "magnetiske flasken", dvs. fra magnetosfæren. Dette er jo tilfelle med alle partiklene som genererer nordlys og produserer ionosfæriske og magnetiske forstyrrelser. I praksis betyr det at partiklene som har speilingspunkt lavere enn ca. 200 – 300 km over jordoverflaten, ikke lenger er fangst dvs. ikke invariante. De går tapt i den polare ionosfæren.

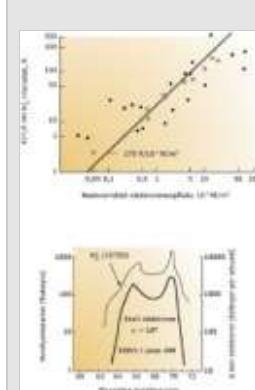
## Driftbevegelsen rundt jorda

Samtidig som partiklene gyrerer rundt magnetfeltet og roterer fram og tilbake mellom speilingspunktene, vil driftstrømmen i magnetosfæren ta med seg partiklene rundt jorda. Dette er den tredje adiabatiske invarianten og den er forbundet med azimutaldriften rundt jorda (pga. graderinger og krumning av  $B$ ). Den magnetiske fluksen som driftbanen omslutter er konstant. Elektronene og ionene driver i motsatt retning.

Forutsetningen for at invariantene skal være oppfylt er at  $B$ -feltet varierer lite i løpet av den tiden partikkelen bruker for å utføre disse bevegelsene. For å få en følelse for hvor gode; dvs. hvor konstante invariantene er, har vi tatt med noen konkrete tall, i tabellen. Om  $B$  varierer i løpet av de tidene som er gitt i tabellen, er invarianten ikke oppfylt. Bare om alle tre invariantene er oppfylt er partiklene tvunget til å holde seg innenfor magnetosfæren – dvs. de er innfanget (engelsk: trapped) som i en magnetisk flaske.

Nordlyspartiklene i det nære verdensrom vil derfor ofte – i enkelte tidsperioder – ikke være innfanget. Da sier vi at partiklene er quasi-trapped (delvis-innfanget).

Hvis ikke elektronene og ionene beveger seg sammen, representerer bevegelsene en elektrisk strøm. Det er denne driftbevegelsen rundt jorda som er kilden til ringstrømmen i jordas magnetfelt. Den ligger typisk mellom 3 til 6  $R_j$  fra jordoverflate. Elektronene beveger seg en vei, mens ionene beveger seg i motsatt retning.



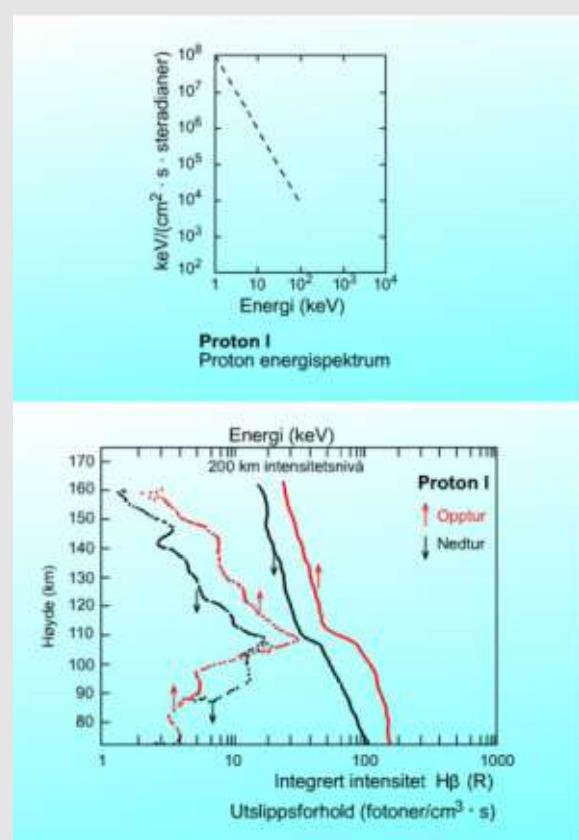
Nordlysintensitet  
Forholdet mellom nordlysintensiteten av 427,8 nm -båndet og energinedbøren, basert på rakett og satellittobservasjoner. De åpne sirklene refererer seg til nattnordlys innenfor ovalen, mens de svarte prikkene er fra observasjoner på polsiden av ovalen. Den heltrukne kurven representerer forholdet 270 R pr  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>.

### Fordypning: Lysutbytte som funksjon av partikkelnedbøren

Sammenhengen mellom partikkelnedbøren og intensiteten av nordlyset er viktig. Om den er kjent, kan vi fra bakkestudier av nordlyset beregne partikkelenergien; dvs. energien av partiklene som avsettes i atmosfæren. Basert på et større antall målinger av båndene 391,4 og 427,8 nm, har man funnet at disse to emisjonene egner seg godt som referanser for lysintensitet og energinedbøren i form av partikler. Bruken av dette båndsystemet i N<sub>2</sub><sup>+</sup> som mål for effekt tilført ionosfæren i form av partikkelfrekvens bygger også på laboratorieforsøk.

Den beste måten å finne lysutbyttet som funksjon av partikkelnedbøren er ved samtidige, koordinerte rakettobservasjoner. Basert på mange, nøye planlagte rakettforsøk (se figuren) har man fått et tilnærmet konstant forhold mellom partikkelnedbør og nordlys ved 427,8 nm. Konstanten er om lag  $(250 \pm 30)$  R per  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>. Proporsjonalitetsfaktoren mellom energi og 427,8 nm nordlys intensiteten er konstant for elektroner mellom ca. 0,5 og 20 keV.

Fordi eksitasjonen av disse emisjonene til en viss grad skyldes protoner, er separate observasjoner av protonnordlyset nødvendig for å skille ut bidraget fra protonene i N<sub>2</sub><sup>+</sup>-emisjonene. Derfor vil man registrere både elektron- og protonnedbør samtidig i de fleste undersøkelsene med rakter.



#### Protospekteret

Protospekteret i keV/(cm<sup>2</sup> sek og steradianer) (figuren øverst) som produserer det hydrogenlyset som vises i kurvene nederst, er basert på samtidige, koordinerte rakettobservasjoner. Selve observasjonene for opp- og nedtur er vist med piler i den nederste figuren. Om vi deriverer disse får vi høydeprofilen, med maksimal intensitet omkring 112 km.

#### Eksempel: Beregne effekten av nordlys.

Basert på faktoren 250 R ved 427,8 nm for en energitilførsel på  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup> kan vi beregne effekten av et nordlys. Vi antar en nordlysbutte som er 10 km bred og 1000 km lang som har en homogen intensitet på 10 kR ved 427,8 nm. For å produsere denne buen går det med:

$$\$ \$ 10^6 \text{ m} \cdot 10^4 \text{ m} \cdot 4 \cdot 10^{-2} (\text{W} / \text{m}^2) = 4 \cdot 10^8 \text{ W} \$ \$$$

Da bare ca. 2 % av energien til partiklene som bombarderer atmosfæren går med til å produsere lys, forstår vi at det er enorme mengder energi som trenges til å produsere nordlys hver kveld. Både lysintensiteten og dimensjonene av nordlyset kan være mye større enn i eksemplet ovenfor. Partikkelenedbøren for en sterk nordlysbutte kan gå opp mot  $10^{10}$  W, ja helt opp mot  $10^{12}$  W. At det kreves mye energi for å produsere nordlys går også fram av det faktum at den midlere elektrisitetsproduksjon i Norge er ca.  $10^{10}$  W.

Forholdet mellom H $\alpha$  og H $\beta$  fotoner og protonnedbør varierer mye med energien. Sammenlignes H $\alpha$  intensiteten med den innfallende protonenergien, har man funnet at lysutbyttet var ca. 70 R per  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>. Denne faktoren er ca. 4 ganger mindre enn for elektronenergi i relativ til 427,8 nm emisjoner.

Konklusjon: Intensiteten av nordlyset fra elektron- og protonnedbør er kjent innenfor en usikkerhet på ca. 25 %. Derfor er nordlys og H-emisjonene de aller beste bakkeobservasjonene av elektron- og protonnedbør. For å oppnå større nøyaktighet, er det nødvendig med flere samtidige, koordinerte satellitt- og rakettobservasjoner av lys- og partikkelenedbøren.

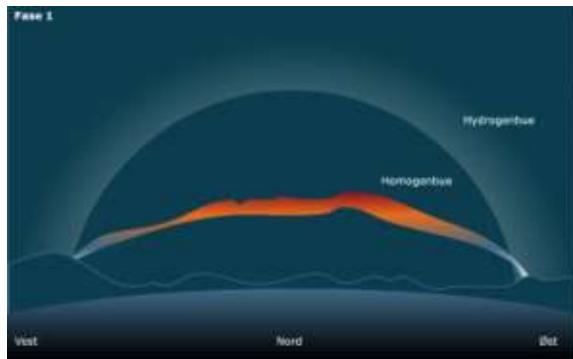
# Rytmen i et nordlysutbrudd

Forfatter: Narom

[Rytmen i et nordlysutbrudd \(61187\)](#)

Hvert stort nordlysutbrudd har en bestemt karakter og rytme, som kan deles inn i fire hovedfaser. Det er som i et skuespill hvor scenene følger etter hverandre i en bestemt orden. Alle fasene er nært forbundet med fysiske prosesser ute i det nære verdensrom. Et typisk nordlysutbrudd, slik en oftest ser det fra Nord-Norge, er skissert i figurene nedenfor.

## Fase 1



Fase 1: Homogene buer

Den første fasen begynner tidlig på kvelden, og varer ofte i én til et par timer. En eller flere svake, rolige, gulgrønne eller melkehvite nordlysbuer sees på nordhimmelen som illustrert i figuren.

Buene strekker seg tvers over himmelen, fra øst til vest. Intensiteten er typisk 0,5 til 10 kR ved 557,7 nm. Nordlysbuene ligger nærmest i ro, eller de driver meget langsomt mot ekvator uten at det skjer noen merkbare forandringer med formen, intensiteten eller fargene.

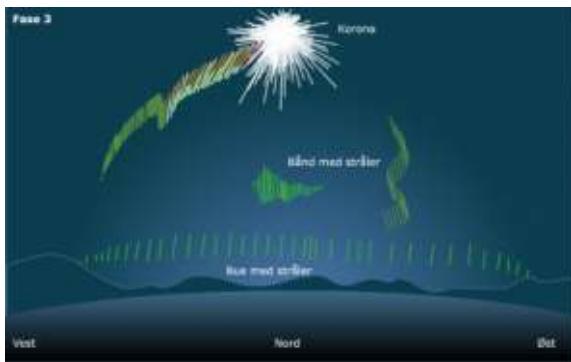
## Fase 2



Fase 2: Stråler og bevegelse

Neste fase begynner med en økning i lyset, ofte med en svak rødlig tone over det grønne lyset. De homogene buene viser nå strålestruktur, dvs. tynne, vertikale stråler er synlige. Buene går nå ofte over til nordlysbånd. I tillegg beveger nordlyset seg hurtig mot syd, inntil det når nesten senit over Nord-Norge. Fase to (vekstfasen) varer i gjennomsnitt 30 minutter.

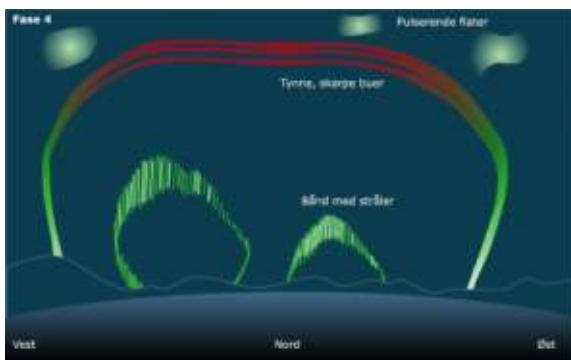
## Fase 3



Fase 3: Eksplosjonsfasen

Etter denne scenen kommer utbruddet (eksplosjonsfasen) da dramatiske forandringer foregår i løpet av ca. 10-15 minutter. Nordlyset mister sin regelmessige form; det folder seg ut som brede bånd eller draperier. Nordlysene krøller og bukter seg, samtidig som meget hurtige bevegelser foregår, både mot nord og syd. Undertiden flammer hele himmelen opp. Nordlyset kan anta de mest fantastiske former. I tillegg til nord-syd bevegelsene farer små bølger av lys langs formene i øst-vest retning. Disse kan ha en enorm hastighet, opp til 100 km/s. Spillende nordlys sees over store deler av himmelen. Selv om den gulgrønne fargen fortsatt dominerer, ser en ofte intense nyanser i rødt og fiolett, spesielt i underkanten av nordlyset. Ofte dannes det kroner av meget lange stråleknipper høyt på himmelen.

#### Fase 4



Fase 4: Diffuse former

I siste fase av nordlysutbruddet, som varer omkring en time, løser dette praktfulle skuespillet seg opp. De distinste formene avtar langsomt i intensitet, blir roligere og sprer seg utover himmelen som et diffust, gråliggrønt slør.

Samtidig eller litt senere kan en ny bue opptre på nordhimmelen, og et nytt nordlysutbrudd starter igjen. Disse utbruddene, sett fra Nord-Norge, vil praktisk talt alltid forekomme mellom kl. 18 og 02 lokal tid, dvs. spesielt før, men også litt etter magnetisk midnatt – som i Nord-Norge er ca. kl 22 lokal tid.

# Karakteristiske egenskaper ved dagnordlys

Forfatter: Narom

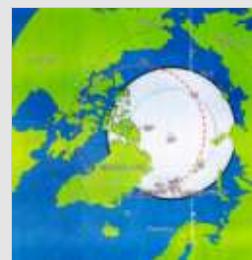
[Karakteristiske egenskaper ved dagnordlys \(61243\)](#)

I romalderen ble det klart at nordlyset ikke er begrenset til nattsiden av jorda, men også forekommer om dagen. Det var ikke kjent før fordi dagnordlyset er svakt i den synlige delen av spekteret. Det røde nordlyset med bølgelengde 630 nm, som dominerer, kan bare sees når sola står mange grader under horisonten.

Skal vi observere dagnordlys fra bakken, må vi være  $10-15^\circ$  fra magnetpolen. I tillegg må sola være minimum  $10^\circ$  under horisonten. På den nordlige halvkule er det bare mulig å observere dagnordlys fra Svalbard og Frans Josefs Land fra landfaste stasjoner. Alle faktorer tatt i betrakning gjør at Svalbard har en helt unik beliggenhet for studier av dagnordlys.

Systematiske undersøkelser av dagnordlyset fra Svalbard begynte først omkring 1980. Observasjonsprogrammet er blitt betydelig utvidet, og omfatter i dag Norsk Polarinstittuts forskningsstasjon i Ny-Ålesund, Nordlysstasjonen nær Longyearbyen, den polske forskningsstasjonen i Hornsund og de magnetiske stasjonene på Bjørnøya, Hopen og Jan Mayen. Norske forskere sammen med grupper av utenlandske kollegaer fører an i denne forskningen.

Optiske målinger av dagnordlyset pågår hvert år i perioden november-februar. De sentrale observasjonene foregår med ulike optiske instrumenter, som spesialbygde nordlyskameraer med 180 graders synsfelt, og meget følsomme lysmålere, fotometre, med forskjellige interferensfiltre som skanner himmelen i det magnetiske meridianplanet. I tillegg måles fargene i lyset med spektrometre.



Den røde stippled sirkelen er området hvor man ved høyest sansynlighet har dagnordlys. Det hvite området angir hvor det er helt mørkt på himmelen i desember og januar. Som man kan se av figuren ligger Svalbard ideelt til for studier av dagnordlyset.

Forfatter: [Narom](#)

Dagnordlyset ble først observert fra satellitter og raketter i den ultrafiolette (UV) delen av spekteret. UV-strålingen fra nordlyset absorberes i atmosfæren og kan ikke registreres fra bakken, men fra raketter og satellitter. Nordlysbeltet om dagen dekker en smalere sone enn om natten. Ofte har det en utstrekning i nord-syd-retning på mindre enn 100 km. Middelhøyden av det røde dagnordlyset er mellom 200 og 400 km, dvs. ca. 2 ganger høyere enn hva som er typisk for nattnordlys (se figuren). Tabellen under oppsummerer noen karakteristiske egenskaper ved dagnordlyset.

	Dagnordlys		Nattnordlys	
	Intensitet (kR)	Høyde (km)	Intensitet (kR)	Høyde (km)
Rødt nordlys (630 nm)	0,1 – 10	over 300	0,1 – 10	200
Gult nordlys (557,7 nm)	0,05 – 1	under 200	1 – 100	120
Blått nordlys (427,8 nm)	0,01 – 0,1	langt under 150	0,5 – 50	100
Intensitets-forhold mellom rødt og gult nordlys	Rødt er ca. 10 ganger sterkere		Gult er ca. 10 ganger sterkere	
Middelenergi til elektronene i solvinden	ca. 100 eV		ca. 5 keV	
Posisjon av nordlyset (sentrum)	ca. $77^\circ$ magnetisk bredde		ca. $67^\circ$ magnetisk bredde	

Tabell - Dag- og nattnordlys

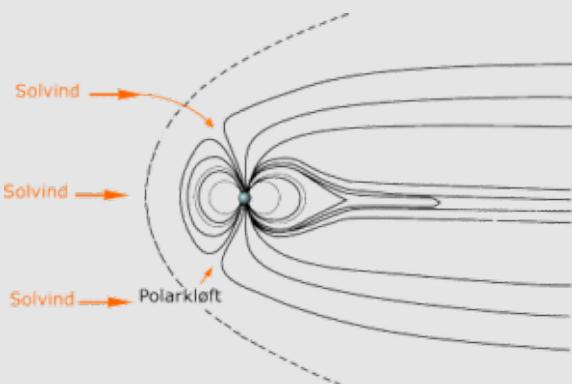
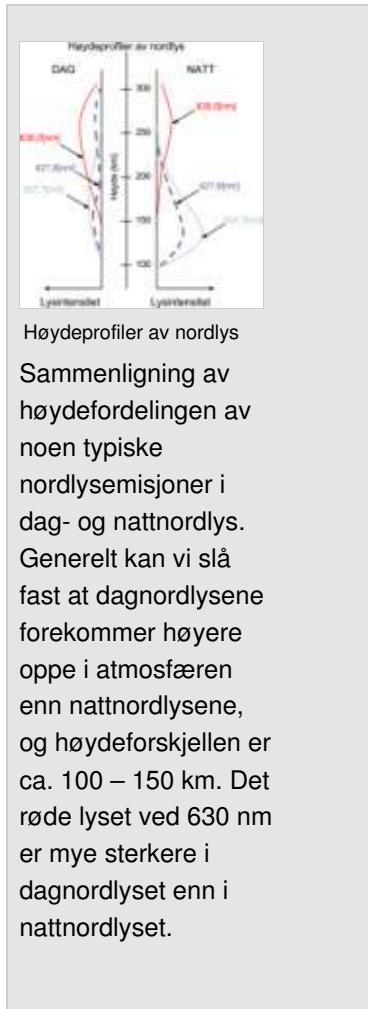
Oksygenatomene, som gir den røde linjen, kan være eksistert i  $\approx 100$  sekunder før fotoner sendes ut. På den tiden kan de eksisterte atomene bevege seg langt bort fra det stedet hvor de ble dannet ved kollisjon med nordlyspartiklene. Det røde lyset ved 630 nm spres derfor utover et større område og er mer diffus.

Den grønne linjen har en levetid opp til 0,7 s. Det eksiterte atomet som sender ut grønt nordlys kan ikke bevege seg langt på 0,7 s før fotonet må sendes ut. Det grønne lyser danner derfor relative skarpe former.

Eksiterte atomer som har en levetid på mer enn 0,01 s, kan kolidere med andre partikler i atmosfæren før fotoner sendes ut. Jo lengre levetid et eksitert atom har, desto større er muligheten for at det skal kollidere. Dermed mister de evnen som lyskilde. I de høydeområder hvor tettheten i atmosfæren er stor, normalt under ca. 150 til 200 km, er kollisjonsfrekvensen høy. Derfor er det røde nordlyset fra oksygen svakere enn det grønne ved lavere høyder enn 200 km.

Bevegelsene i nordlyset og andre globale trekk i lyset synes å være styrt av spesielle betingelser i solvinden. Målinger fra Svalbard, kombinert med samtidige og identiske målinger langs nordlysovalen, samt satellitt og rakett observasjoner, er viktige for undersøkelser av slike sammenhenger. Samtidige observasjoner fra flere stasjoner langs og på tvers av nordlysovalen er målet. Endringer i ovalens posisjon og utstrekning kan dermed registreres.

Nordlysets spektralfordeling gir informasjon om sammensetningen av luften i nordlyshøydene. For eksempel er forholdet mellom intensitetene av den røde nordlyslinjen ved 630 nm og det blå bånd fra nitrogen ved 427,8 nm avhengig av konsentrationsforholdet av atomært oksygen og molekulært nitrogen der lysutsendelsen skjer. Dette konsentrationsforholdet gjenspeiler seg i en karakteristisk forskjell i dag- og nattnordlysspektrene.



Dagnordlyskilde

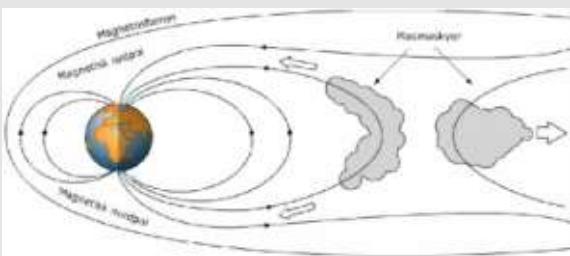
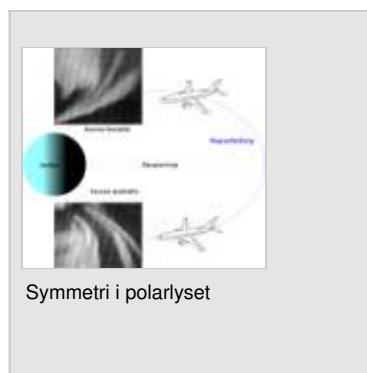
Kildeområdet til dagnordlyset er hovedsakelig polarkløftene.

## Bedre kunnskap om nordlyset øker vår forståelse..

Forfatter: Narom

[Bedre kunnskap om nordlyset øker vår forståelse av universet \(61287\)](#)

Om en sammenligner nordlyset med flares, de enorme lysutbruddene på sola, kan en se en del felles trekk. Som nordlyset opptrer i jordas atmosfære med sitt nesten identiske følge, sydlyset (se figur), forekommer flarene i to parallelle lysende bånd. Nordlyset stråler i en fargeprakt bestemt av gassene i atmosfæren. Lyset på sola er dominert av hydrogengasser. Jordas magnetfelt tvinger nord- og sydlysene mot de magnetiske polene. Det er geometrien i magnetfeltet rundt solflekkene som bestemmer formen på de lysende flarebåndene. Fellestrekkene i nordlyset og flare er mange. Vi tror prosessene som skaper nordlys også opptrer på en tilsvarende måte på sola. Våre kunnskaper om nordlyset øker vår forståelse for flareprosessene på sola og lysfenomenet på andre stjerner og planeter.



Plasmaskyer

Kilden til nordlysene og sydlysene er plasmaskyene som finnes langt bak i halen av magnetosfæren. Dette plasmaet fører til intense elektriske strømmer som forandrer jordmagnetfeltet. Jordmagnetfeltet er derfor en kombinasjon av "hovedfeltet" fra jorda selv, og felter som skyldes en strøm av partikler i den øvre atomsfære. Jordas magnetfelt danner et hulrom i det interplanetariske rom som kalles "magnetosfæren". Den er sammentrykket på solsiden (dagsiden, til venstre på figuren) og strekker seg ut i en lang Hale på nattsiden. På figuren er feltet vist i et plan, men i virkeligheten er det tredimensjonalt. På dagsiden er det nærmest en halvkule og på nattsiden en lang sylinder.

# En moderne nordlysteori i populær form

[En moderne nordlysteori i populær form \(61301\)](#)

Nordlyset skyldes elektrisk ladde partikler fra sola som styres av jordas magnetfelt inn i polområdene.

Nordlysets høyde bestemmes av partiklenes hastighet. Intensiteten av lyset er direkte proporsjonal med den totale partikkelnedbøren. Forekomsten og intensiteten av lyset er nært korrelert med solaktiviteten. Nordlys og sydlys opptrer på hver sin halvkule. De kan observeres samtidig og ha samme form. Fargene i nordlyset bestemmes av atmosfærens sammensetning. Nordlysets geografiske fordeling skyldes formen på og intensiteten av jordas magnetfelt. Vekselvirkningen med solvinden har ført til at jordas magnetfelt er forskjellig fra et dipolfelt.

Kilde: NASA

Solvinden er supersonisk. Den beveger seg med overlydhastighet. Når den treffer jordas magnetfelt ca. 10 – 12 jordradier fra jorda, oppstår det et sjokk. Solvinden blåser kontinuerlig, men intensiteten varierer. Den er som vindene i atmosfæren, fylt av byger og stormkast. Selv om tettheten av solvinden bare er ca.  $10^7$  partikler per  $m^3$ , finnes hele tiden en parabelformet sjokkfront på den siden av jorda som vender mot sola. Jordas magnetfelt presses sammen på dagsiden, mens det blir dratt ut i en lang hale på nattssiden.

Det er store forskjeller mellom natt- og dagnordlyset, både i beliggenhet, fargesammensetning, høyde, form og intensitet. Solvinden kommer inn i magnetosfæren hvor magnetfeltet er meget svakt. På dagsiden kalles disse områdene polarkløftene, en på den nordlige og en på den sørlige halvkule. De ligger mellom  $\sim 10$  og  $\sim 15^\circ$  fra magnetpolene. Her deler magnetfeltlinjene seg i to grener og mellom dem oppstår en åpning mot verdensrommet. Solvinden som kommer inn her, produserer nordlys på dagen. Dagnordlyset oppstår dermed mye nærmere magnetpolene enn nordlyset på nattssiden.

Partiklene som produserer lyset på natten må først passere jorda. Langt ute i halen er B-feltet tilnærmet null. Der blir de ført inn i plasmasjiktet. Ved nattnordlys har det skjedd en "eksplosjon" i sjiktet. Elektronene drives tilbake mot jorda, mot polområdene, ned til de to ovalene, som ligger  $\sim 25^\circ$  fra de geomagnetiske polene. Pga. store elektromagnetiske krefter har partiklene som genererer nordlys om natten mye større energi (10 til 100 ganger), og trenger dypere ned i atmosfæren, enn de partiklene som er ansvarlig for dagnordlyset. Derfor er høyden av dagnordlyset mye større enn det vi observerer på natten. Den detaljerte teori som forklarer dette er komplisert og fortsatt bare delvis forstått.

## Nordlysstudier - et middel til å øke våre kunn..

Forfatter: Narom

[Nordlysstudier - et middel til å øke våre kunnskaper om den øvre atmosfæren \(61304\)](#)

Nordlysstudier er, foruten å være et mål i seg selv, blitt et middel til å oppnå mer generelle informasjoner om naturen. Etter hvert som våre kunnskaper om den øvre atmosfære og det nære verdensrom øker, og vi forstår de reaksjoner og prosesser som foregår der, vil dette i økende grad være tilfelle. Vi skal her bare nevne noen sentrale punkter:

- Den øvre atmosfære kan betraktes som et gigantisk lavtrykkslaboratorium med et tilnærmet kollisjonsfritt plasma. I dette utfører naturen selv mange typer eksperimenter som det er praktisk umulig å simulere i ordinære laboratorier. På denne måten er nordlysstudier blitt et viktig supplement til studier av gasser som påvirkes av magnetiske og elektriske felt.
- Fra historiske studier av nordlysforekomsten har vi fått viktig informasjon om hvordan solaktiviteten har vært for mange hundre år siden.
- Den store mengde plasmainstabiliteter, fysiske prosesser og reaksjoner som man har funnet i den øvre atmosfære, har gitt mange nyttefulle resultater, spesielt innen plasmafysikken.
- Studier av den øvre atmosfære, magnetosfæren og jordas magnetfelt har lært oss hvordan vi kan utnytte radiokommunikasjonen og navigasjonen til praktiske formål.
- Den eksplosjonsartede ekspansjonen innen moderne elektronikk, data teknikk og kommunikasjon, skyldes for en stor del rakett- og satellittforskningen. Våre kunnskaper og forståelsen av hva som foregår i den øvre atmosfære og i det nære verdensrom, har øket enormt de siste 10–20 årene.

## Astrofysikk

Forfatter: Narom

[Astrofysikk \(59572\)](#)

Astrofysikken er per definisjon fysikken om himmellegemene og verdensrommet – som vi også kaller universet.

Mennesker har gjennom årtusener vært opptatt av sola, stjernene og planetene – ja hele universet. Nysgjerrigheten har vært drivkraften til studier som har ført til ny viten. Takket være nye teleskoper og spesielt moderne romforskning har vi i de siste tiårene fått et nytt verdensbilde som er i stadig forandring. Vår eneste kontakt med verdensrommet før romalderen var den stråling vi kunne måle på jorda. I dag kan vi ved hjelp av satellitter og romskip også studere strålingen som jordas atmosfære og magnetfelt skjermer oss for. Mennesker har vært på Månen og tok med seg prøver tilbake. Romsonder har landet på Mars, Titan og andre himmellegemer hvor de har foretatt kjemiske analyser. Romsonder gjør det mulig å få et nøyaktig, detaljert bilde av vårt solsystem. Det som driver denne forskningen er ønsket om svar på noen grunnleggende spørsmål: Hvordan oppstod livet på jorda? Finnes det liv andre steder i universet? Hvordan oppstod universet? Hvordan vil universet utvikle seg videre?

## Kildene til informasjon om universet

Forfatter: Narom

[Kildene til informasjon om universet \(59581\)](#)

Hovedkilden til våre kunnskaper om universet er dets elektromagnetiske stråling. Fra strålingen får vi informasjon om kjemisk sammensetning, temperatur, avstander, magnetfelt og farten til himmellegemer.

I tillegg til optiske teleskoper, brukes også radioteleskop i bølgelengdeområdet 0,1 mm til 10 cm for studier av det store universet. Radiobølger i frekvensområdet  $3 \cdot 10^{12}$  til  $3 \cdot 10^9$  Hz, også kalt mikrobølgeområdet, er et viktig verktøy for studier av universet. Mikrobølger forplanter seg gjennom verdensrommet og jordas atmosfære uten å bli særlig svekket. Mikrobølger brukes også i moderne radare, mobiltelefoner, satellitt-tv, osv. Ved hjelp av mikrobølger kan man også bestemme strukturen til de store, fleratomære molekylene. Fortsatt er optiske teleskoper viktige. For å redusere informasjonstap pga. absorpsjon lokaliseres disse ofte på toppen av høye fjell.

I 1990 ble Hubble Space Telescope plassert i bane rundt jorda. Det registrerer stråling over hele spekteret mellom ultrafiolett og infrarødt. De nye instrumentene er veldig lysfølsomme. Dette har ført til oppdagelser av mange nye objekter og flere detaljer om kjente objekter. Satellitten Chandra X-ray Observatory, som også går i bane rundt jorda, måler røntgenstråling fra verdensrommet.

Vi har tidligere diskutert egenskapene til vår viktigste stjerne, sola. Studiet av de fysikalske prosessene i vårt solsystem kan hjelpe oss til å finne og forstå informasjon om fjerne objekter. Kilden til informasjon om både sola og mer eksotiske objekter, som galakser, kvasarer, svarte hull, er strålingen fra disse.



To astronauter utfører reparasjonsarbeid på Hubble Space Telescope under romfergeflyvningen STS-61 i 1993. I bakgrunnen ser man Australias vestkyst. Foto: NASA  
Opphavsmann: [NASA](#)

# Hovedtrekkene i stjernenes utvikling

Forfatter: Narom

[Hovedtrekkene i stjernenes utvikling \(59609\)](#)

Stjerner forandrer seg lite fra år til år, men over lange tidsrom ( $> 10^6$  år) kan det være store forandringer. Også stjerner fødes og dør. Vi vil i det følgende kort omtale hovedtrekkene i stjerners livsløp, karakterisert ved de fire hovedfasen: fødsel, hovedseriefasen, kjempestjernefasen og sluttfasen.

## Stjerner fødes

Det interstellare rommet er så tomt at partikkeltettheten er mindre enn i et høyvakuum laboratorium på jorda. Fordi verdensrommet er så stort finnes det enorme mengder støv og gass mellom stjernene. Materien påvirker lyset som passerer gjennom og inneholder nok stoff til å danne nye stjerner. Spektralanalyse viser at støvet inneholder karbon, men ellers vet man lite om den kjemiske sammensetningen. Kun ca. 10 % av interstellar materie er støv, resten er gass. Gassen er dominert av hydrogen, men også helium og noen andre gasser er påvist. Man regner med at hele universet består av ca. 74 % hydrogen og 24 % helium.



Tettheten i kosmos varierer. I interstellare skyer er tettheten ca.  $10^6$  partikler per  $m^3$ . Dette er meget lav sammenlignet med jordatmosfæren ved havnivå, som har ca.  $2 \cdot 10^{25}$  molekyler per  $m^3$ . I det store univers kan tettheten i begrensede områder av en interstellar gasssky øke enormt – opptil en million ganger. Slike fortetninger kalles tåker. At gasser og støv fortetter seg er en vanlig kosmisk prosess. Selv om også tettheten i tåker er liten, er tåkene så store (diameter mange titalls lysår) at de utgjør gigantiske gassansamlinger. Store tåker kan inneholde en masse tilsvarende 1 million ganger solmassen ( $m_S$ ). Til å begynne med er temperaturen i tåken lav, bare ca. 10 K. Et eksempel på en tåke er vist i Spiralgalaksen M33.

Gravitasjonskraftene fører til at tåken begynner å trekke seg sammen og får etter hvert kuleform. Sammentrekningen frigjør energi som fører til temperaturstigning. Massen i sentrum blir stadig større, tettere og varmere. Etter hvert vil bare en liten del av strålingen slippe ut som varmesstråling, det meste av strålingen blokkeres av de ytre lag, som trekkes sakte inn mot senteret. En protonstjerne er blitt dannet. Den kan observeres som en liten infrarød kilde. Hvor lenge denne fasen varer er avhengig av massen. (Se figuren.)

Sammentrekningen og temperaturøkningen fortsetter. Når temperaturen i sentrale deler av gasskulen når ca. K starter kjernereaksjonen, der helium dannes ved fusjon av hydrogen, som på sola. En stjerne er født.



Venstre bilde viser Spiralgalaksen M33 sett fra Mount Palomar Observatoriet i California. I den ene armen til spiralen er tåken NGC 604 som er et område der stjerner fødes. Det høyre bildet er tatt av Hubble Space Telescope i 1995 fra det stjernedannende området i tåken NGC 604. Fortetningen av gassene har ført til at temperaturen i dette området har kommet opp til 10 000 K. Opphavsmann: [NASA](#)

## Stjerneutvikling i et H-R-diagram

H-R-diagram

Opphavsmann: [NAROM](#)

Dette H-R diagrammet viser utviklingen fra protostjerner til hovedseriestjerner. Når massen er liten vil fasen som protostjerne vare lengst. En protostjerne med solas masse tilbringer ca. 30 millioner år i denne fasen, mens en protostjerne med  $15 m_S$  trenger bare ca. 150 000 år til temperaturen er høy nok for at kjernreaksjonen starter.

## Stabile stjerner

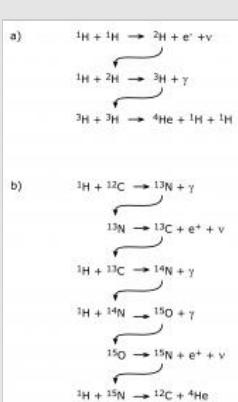
Den nye stjernen, hvor energiproduksjonen ved fusjon har kommet i gang, ligger på hovedserien i H-R-diagrammet. Her vil den tilbringe det meste av sitt liv. Massen er avgjørende for hvor på hovedserien den ligger. Jo større masse den har desto høyere plotter stjernen i diagrammet. I sentrum av en hovedseriestjerne dannes kontinuerlig helium ved fusjon av hydrogen. Det som skjer på sola, skjer ved proton-proton-kjeden. I stjerner som har masse mer enn  $1,5 m_S$  skjer det ved karbon-syklusen, som vist i figuren. Nettoreaksjonen i begge prosessene er at 4 hydrogenkjerner blir til et helium atom. Når hydrogenet i stjernens sentrum er brukt opp ender livet på hovedserien.

I en protostjerne med mindre enn ca.  $0,08 m_S$  vil fortetningen ikke kunne frigi nok energi til å starte kjernreaksjoner. Slike protostjerner blir aldri hovedseriestjerner. De ender opp som kalde, brune dverger. Når de har avgitt varmen som sammentrekningen førte til, ender de til slutt som svarte dverger. De sender ikke ut noe stråling.

En protostjerne med  $> 100 m_S$  vil ikke bli en hovedseriestjerne. Først kollapser den og så frigjør den så mye energi at den blir sprengt. Likevekt mellom sammentrekning og utvidelse vil den ikke oppnå.

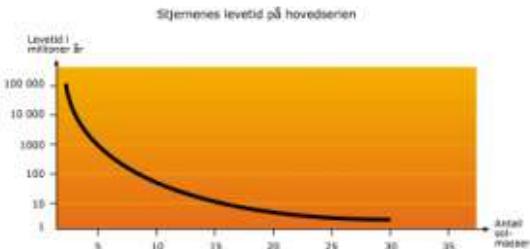
## Stjerner dør

Ca. 90 % av sin levetid tilbringer stjernene på hovedserien i H-R-diagrammet. Levetiden til en stjerne er avhengig av massen. En stjerne med stor masse forbruker mye hydrogen til fusjon og vil relativt fort bruke opp brenselet. En stjerne med  $30 m_S$  vil leve ca. 2 millioner år på hovedserien, en stjerne med  $4 m_S$  ca. 300 millioner år og en stjerne som sola vil ha en levetid på ca. 10 milliarder år. Sola har omrent halve sin levetid bak seg. Forholdet mellom levetid og masse er illustrert i figuren under.



Fusjon i stjerner

Fusjon av hydrogen til helium i sentrum av hovedseriestjerner kan skje på to måter. Nettoreaksjonen er i begge tilfellene at 4 hydrogenkjerner danner en heliumkjerne a) Proton-proton-kjeden som er fusjonsprosessen i stjerner med masse  $< 1,5 m_S$ . b) Karbonsyklus som dominerer i stjerner med masse  $\geq 1,5 m_S$ .



Levetid for stjerner på hovedserien avhengig av deres masse.

Massen er angitt i forhold til solmassen.

Opphavsmann: [Narom](#)

## Kjempestjerner

Alle stjerner, uavhengig av massen, gjennomgår den samme innledende "aldringsprosess". Når det er mangel på hydrogen i sentrum vil gravitasjonskraften dominere over utvidelseskraften og stjernen trekker seg sammen. Da forlater stjernen hovedserien, idet den stråler med høyere effekt og lavere temperatur. Sammentrekningen frigjør potensiell energi, som for protostjernene. Denne energi setter i gang fusjon i et lag lenger ute. Energiproduksjonen er så stor at stjernen ekspanderer og blir til en kjempestjerne. Når en gass utvides fører det til avkjøling. Derfor blir fargen rød. Når sola blir til en rød kjempe om ca. fem milliarder år vil den bli så stor at den vil sluke jorda. Siden volumet vil øke så enormt vil overflatetemperaturen avta til tross for en høyere energiproduksjon. I stjernens sentrum kan temperaturen bli så høy at fusjon av helium til tyngre grunnstoffer kan begynne. Ved  $10^8$  K dannes karbon ved fusjon av heliumatomer. I sluttstadiet til en kjempestjerne vil fusjonen i ytre lag skape så stort trykk at overflatelagene sprenges bort og danner en planetarisk tåke, se figuren under. Når kjernreaksjonene slutter vil det som er igjen av stjernen ende opp som en hvit dverg/svart dverg, nøytronstjerne eller svart hull. Vi skal kort omtale disse gruppene.

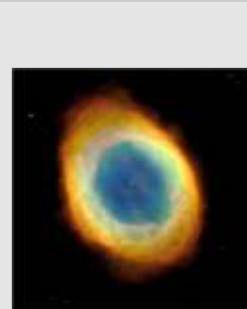
## Hvite og svarte dverger

Stjerner med masse opptil ca.  $6 m_S$  ender opp som hvite dverger. Når kjernreaksjonene til slutt stopper, vil gravitasjonen presse stjernen mer og mer sammen til en massetetthet på omlag  $10^9$  kg/m<sup>3</sup>. (Om sola ble presset sammen til en så høy tetthet, ville den bli på størrelse med jorda). Hvite dverger produserer ikke energi. Deres høye temperatur skyldes restvarmen etter fusjon og kontraksjon. De kjøles sakte ned, og etter milliarder av år ender de opp som svarte dverger. Svarte dverger er ikke blitt observert. Dette kan skyldes både at de er små og ikke sender ut noe stråling. Men det er også mulig at universet er for ungts slik at ingen hvite dverger har hatt nok tid til å avkjøles helt.

## Fra rød superkjempe til supernova

Hovedseriestjerner med ca.  $6 m_S$  utvikler seg til røde superkjemper når de forlater hovedserien.

Fusjonen i stjernens sentrum fortsetter også etter at karbon er blitt dannet. Enda tyngre grunnstoffer dannes, blant annet jern. (Jern er det grunnstoffet som har lavest masse per nukleon.) Jern er det tyngste grunnstoffet som frigjør energi ved fusjon. Når energiproduksjon ved fusjon tar slutt, vil gravitasjonen dominere. Senteret til superkjempen kollapser og sammentrekningen frigjør så mye energi at også tyngre grunnstoffer enn jern dannes ved fusjon. Samtidig oppstår en voldsom sjokkbølge som sprenger vekk mesteparten av stjernemassen. Denne stjerneksplosjonen kalles en supernova. Navnet nova, som betyr ny, skyldes at stjernen ikke ble oppdaget før eksplosjonen. På et døgn kan en supernova stråle ut mer energi enn sola på millioner av år.



Den planetariske tåken  
Ring Nebula M57  
fotografert av Hubble  
Space Telescope. I  
sentrum sees den døende  
stjernen som har en  
temperatur på  $120\,000$  °C  
og varmer opp gassene  
omkring med sin  
ultrafiolette stråling.

Fargene er kunstige, men  
tilsvarer omrent de  
naturlige fargene. Ulike  
farger betyr ulik temperatur.  
Tåken er ca. 1 lysår i  
diameter og har en avstand  
på ca. 2000 lysår fra oss.  
Opphavsmann: [NASA](#)



Supernova 1987A omgitt  
av tre mystiske ringer av  
glødende gass. Bildet er  
tatt av Hubble Space  
Telescope i synlig lys (H)  
Opphavsmann: [NASA](#)

I 1987 oppdaget astronomene en supernova i den store Magellanske Sky, ca. 160 000 lysår fra oss. Den var synlig med det blotte øye. For første gang ble en supernova studert med moderne måleinstrumenter. Bare noen ytterst få supernovaer er sett. Dette skyldes at de aller fleste er gjemt i store støv- og gasskyer. Det var en blå superkjempe som eksploderte den 23. februar 1987. Man tror at ca. 5  $m_S$  ble slynget ut med en fart på mange tusen kilometer per sekund. I tillegg mener forskerne at mesteparten av den frigjorte gravitasjonsenergien ble sendt ut som nøytrinoer. Figuren viser et bilde tatt fra Hubble Space Telescope av denne supernovaeksplosjonen.

### Nøytronstjerner og pulsarer

Sammentrekningen som utløser supernovaeksplosjoner skaper så ekstreme krefter at elektroner presses inn i atomkjernene. Der smelter de sammen med protonene og danner nøytroner. Derfor har denne restmassen som stammer fra senteret til supernovaer fått betegnelsen nøytronstjerne. Nøytronene roterer om sin egen akse og beveger seg med stor fart inne i stjernen. Magnetfeltet rundt nøytronstjernen øker fordi feltet følger med i sammentrekkingen. Derfor har nøytronstjernene et ufattelig sterkt magnetfelt, i størrelsesordenen  $10^8$  T.

De fleste nøytronstjerner roterer hurtig, opptil flere hundre omdreininger per sekund. Magnetfelt roterer med. Dette fører til store elektronhastigheter og en laserliknende stråling gjennom to kjepler, en langs hver magnetpol. Hver gang denne strålingen treffer jorda kan vi registrere en kortvarig puls. En roterende nøytronstjerne kalles derfor en pulsar. Den første pulsaren ble oppdaget i 1967. I dag er flere hundre slike objekter kartlagt.



#### Prinsippet for en pulsar / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/59635>

Prinsippet for en pulsar. Langs magnetfeltaksen sendes det ut laserliknende stråler. Rotasjons- og stråleretningen er ulike. Strålene sveiper gjennom rommet, som lyset fra et fyrtårn. Hver gang strålen peker mot jorda, mottar vi en strålingspuls.

### Svarte hull

Er den kompakte restmassen etter en supernovaeksplosjon større enn ca. 3 solmasser dannes det et svart hull. Svarte hull er meget spesielle objekter hvor klassisk mekanikk ikke kan anvendes. Einsteins generelle relativitetsteori må taes i bruk. Tyngdekraften er så dominerende at massen til et svart hull er koncentrert i tilnærmet et punkt med enorm massetetthet. Unnslipningsfarten for et svart hull er større enn lyshastigheten. Det betyr at ikke engang lys slipper ut. Derfor er disse objektene svarte. Radius til en kule rundt det svarte hullet kalles Schwarzschild-radius ( $R_S$ ) eller kritisk radius.

Vi har tidligere funnet følgende formel for unnslipningsfart:

$$\$\$v = \sqrt{2\gamma \frac{M}{r}}\$$$

Ved den kritiske radius der unnslipningsfarten er lik lyshastigheten får vi følgende formel:

$$\$\$R_S = r \gamma \cdot \frac{c^2}{M}\$$$



Illustrasjon av et svart hull. Tyngdekraften fra

der  $\gamma$  er gravitasjonskonstanten ( $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$ ), M: massen til det svarte hull,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Setter vi inn  $3 m_S$  ( $6 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ) for massen til det svarte hullet, blir den kritiske radius ca. 9 km.

Svarte hull kan bare observeres indirekte gjennom det ekstremt sterke gravitasjonsfeltet. Et legeme i nærheten av et svart hull vil bli trukket mot hullet med stor kraft.

På 1960-tallet observerte man en blå superkjempe i stjernebildet Cygnus. Dopplereffekten viste at den hadde en omløpstid på ca. 6 dager rundt et annet legeme. Beregninger viste at det andre objektet måtte ha en masse på mer enn  $3 m_S$ . Men det andre himmellegeme var usynlig. Man tolker det som et svart hull. Også observasjon av røntgenstråling fra stjernen støtter tolkningen som et svart hull. Materiale vil bli trukket ut av superkjempen og vil bevege seg i spiralbane inn mot det svarte hullet. Til slutt, før partiklene forsvinner helt i det svarte hullet, opplever man en sterk rødforskyvning i spekteret som illustrert i figuren. Denne forskyvningen mot rødt skyldes den sterke gravitasjonen som gjør at tiden går saktere. Dette hadde forskerne forutsagt da de på 1930-tallet la fram sin teori om eksistensen av svarte hull.

det svarte hullet suger gassene fra en stjerne i nærheten til seg. Det oppstår en spiralbevegelse inn mot det svarte hullet omrent som vann renner ned i et sluk. Når gassen nærmer seg grensen til det svarte hullet – dvs. den kritiske radius - observerer man en kraftig rødforskyvning. Når gassen krysser grensen til det svarte hull slukes ikke bare gassen, men også lyset.  
Opphavsmann: [NASA](#)

# Himmellegemenes kjemiske sammensetning

Forfatter: Narom

[Himmellegemenes kjemiske sammensetning \(59685\)](#)

Den elektromagnetiske strålingen arrangert som funksjon av frekvens eller bølgelengde, kalles det elektromagnetiske spekteret. En gass/stoff sender ut et så karakteristisk spektrum at det kan sammenlignes med et fingeravtrykk. Vi sammenligner spektre – både emisjons- og absorpsjonsspektre, av en ukjent gass, med spektre av kjente grunnstoffer målt i laboratorier. Da kan vi med 100 % sikkerhet si hvilke grunnstoff prøven inneholder. Ikke bare grunnstoffer, men også ioner, molekyler, sot, osv. har karakteristiske spektre.

De mørke linjene i spektrene skyldes at atomer, molekyler eller ioner og støv. I stjernenes atmosfære absorberer lys av en bestemt bølgelengde,  $\lambda$ . Fra slike registreringer får vi informasjon om både sammensetning og tetthet i atmosfæren. Basert på et stort antall observasjoner kan en konkludere at også stjernene inneholder mange av de samme grunnstoffer som finnes på jorda. Det var en viktig oppdagelse. En eldgammel gåte var løst. Det var ett viktig unntak, helium. Det ble funnet i verdensrommet før det ble gjenfunnet på jorda. Spektralanalyser er derfor en både nøyaktig og viktig analysemetode. Det er den viktigste metode for å få kunnskaper om sammensetningen til fjerne himmellegemer.

# Bestemmelse av stjernenes overflatetemperatur

Forfatter: Narom

[Bestemmelse av stjernenes overflatetemperatur \(59687\)](#)

## Wiens forskyvningslov

I strålingen fra et legeme er bølgelengden avhengig av temperaturen. Jo kortere bølgelengden er desto varmere er stjernen. Derfor forteller fargen på stjernen mye om dens temperatur. En blå stjerne er varmere enn røde stjerner. Wiens forskyvningslov beregnes fra Plancks strålingslov. Max Planck utledet i 1900 teorien for hvordan stråling fra svarte legemer oppfører seg. Fra det kunne han beregne energispekteret til strålingen fra et legeme med en gitt temperatur.

Fra følgende likning kan vi bestemme overflatetemperaturen  $T$  når vi kjenner bølgelengden med størst intensitet, dvs.  $\lambda_{\text{maks}}$ :

$$T = \frac{2,90 \cdot 10^{-3} \text{ K m}}{\lambda_{\text{maks}}} \text{ (1)}$$

### Eksempel: Wiens forskyvningslov

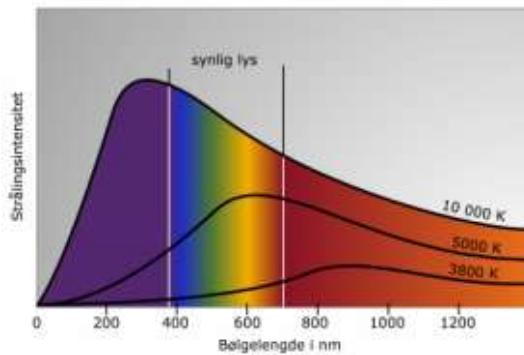
Regn ut bølgelengden  $\lambda_{\text{maks}}$  for utstrålt effekt fra sola fra likningen over når overflatetemperaturen er 5800 K.

Svar:

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2,90 \cdot 10^{-3} \text{ K m}}{5800 \text{ K}} = 500 \text{ nm}$$

Solas emisjonsspektrum med maksimum ved 500 nm gir en overflatetemperatur på 5800 K. På lignende måte kan vi finne bølgelengden eller temperaturen til andre himmellegemer. Fordi fiksstjernene er lyssvake, er de vanskeligere å studere enn sola.

## Stefan-Boltzmanns lov



Grafisk framstilling av Plancks strålingslov. Bølgelengden med størst intensitet (utstrålingstetthet) er relatert til overflatetemperaturen til legemet som sender ut strålingen.  
Opphavsmann: [Narom](#)

Som framgår av figuren over sender et svart legeme ut stråling over et spektrum av bølgelengder. Arealet under kurven blir større jo høyere temperaturen er. Det betyr at den totale utstrålingstettheten, integrert over alle bølgelengder, øker. Dette kommer til uttrykk i Stefan-Boltzmann loven (avsnitt 5.4) som relaterer utstrålingstettheten  $E$  til overflatetemperaturen:

$$E = \sigma T^4$$

der  $\sigma$  er Stefan-Boltzmann-konstanten,  $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

### **Eksempel: Solas overflatetemperatur**

Beregn solas overflatetemperatur med Stefan-Boltzmann-loven. Solas effekt er  $4,0 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , solas radius er  $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ .

Svar: Strålingstetthet er effekt per areal. Arealet er her solas overflate.

$$E = \frac{P}{A} = \sigma T^4 \quad \Rightarrow$$

$$T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{P}{\sigma A}} = \sqrt{4 \frac{4 \pi R_S^2 \sigma}{W/m^2} \cdot 10^{-8}}$$

$$= \sqrt{4 \frac{4,0 \cdot 10^{26} \text{ W}}{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2} \cdot (6,96 \cdot 10^8 \text{ m})^2} = 5800 \text{ K}$$

$$= 5800 \text{ K}$$

Temperaturen på solas overflate er 5800 K.

# Avstander i verdensrommet

Forfatter: Narom

[Avstander i verdensrommet \(59705\)](#)

## Måleenheter for avstander i verdensrommet

Universet er så stort, det består av milliarder stjerner, at det er vanskelig å ha noen forestillinger om dets dimensjon. I romfysikken arbeider vi med både små objekter som atomer og store dimensjoner som galakser. Figuren viser avstandene i universet, både de ekstremt små og de ekstremt store.

Hvis vi skulle angi avstander i verdensrommet i meter ville tallene bli veldig store. Derfor bruker man ofte andre måleenheter med større "målestokker".

### Astronomisk enhet

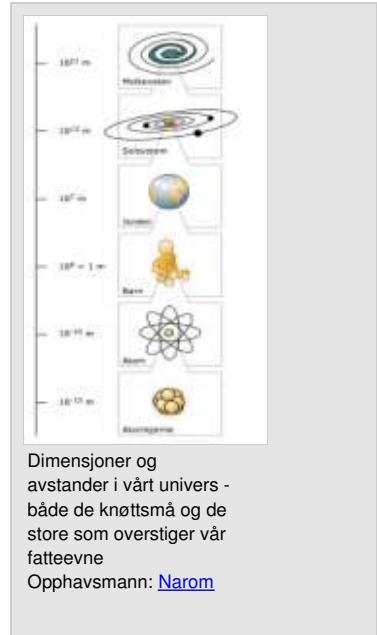
En astronomisk enhet (1 AU) er middelavstanden mellom jorda og sola, som er  $1,49 \cdot 10^{11}$  m.

### Lysår

Avstanden som lyset tilbakelegger i løpet av et år kalles et lysår. Når vi bruker formelen for konstant fart  $s = v \cdot t$ , setter inn lysfart for  $v$  og regner år om til sekunder, så finner vi at ett lysår tilsvarer  $9,46 \cdot 10^{15}$  m.

### Parsekund

Når vi fjerner oss fra jorda og ser avstanden jord-sol med en vinkel på 1 busekund ( $1''$ ) har vi avstanden 1 parsekund fra jorda. Ett busekund er en vinkel på  $1/3600^\circ$ . Ett parsekund tilsvarer 3,26 ly eller  $3,09 \cdot 10^{16}$  m. Når du har lest om avstandsbestemmelse i verdensrommet lenger ned på siden vil du forstå følgende definisjon: Et parsekund (1pc) er avstanden til et objekt som har en parallaksevinkel på ett busekund, som i figuren under.



### Parsec

Parsec

Opphavsmann: [NAROM](#)

Når vi ser den midlere avstanden mellom jord og sol (1 AU) med en vinkel på  $1'' = 1/3600^\circ$  har vi avstanden 1 parsekund (pc).

## Eksempler på dimensjoner i verdensrommet

Middelavstanden fra sola til Mars og Jupiter er henholdsvis ca. 1,5 og 5 AU, mens Pluto er mer enn 40 AU borte. Gjennomsnittsavstanden til Månen er bare ca. 60 jordradier ( $R_J$ ) eller 384 000 km. Stjernen Proxima Centauri er solas nærmeste nabo. Lyset fra den bruker ca. fire år til jorda. Om vi tenker oss sola forminsket til en ert med diameter 1,5 cm ville Proxima Centauri ligge 400 km unna. Diameteren i vår galakse, Melkeveien, er ca.  $10^5$  ly.

Det finnes mange milliarder, noen har antydet  $10^{11}$ , galakser i universet. Deres diameter varierer fra 2 000 til 200 000 ly, mens deres masser er fra  $10^6$  til  $10^{12} m_S$ . Galakser som ligger 10 milliarder lysår fra oss er blitt observert. Deres lys trenger 10 milliarder år for å nå oss. Vi ser altså langt tilbake i tiden. Rotasjonsfarten til en galakse er proporsjonal med dens masse og med utstrålt effekt. Man kan få informasjon om rotasjonen fra studier av galaksens spektrum. Fra jorda kan vi kun se to galakser, Melkeveien og Andromedagalaksen, med det bare øye. Galaksene kan ha forskjellig form. Vår galakse, Melkeveisystemet, er en spiralgalakse. Avstanden til Andromedagalaksen er ca.  $2 \cdot 10^6$  ly.

Takket være moderne romplattformer, som for eks. Hipparcos, har vi kartlagt avstandene til et stort antall stjerner meget nøyaktig.

### Avstandsbestemmelse i verdensrommet

#### Den trigonometriske parallaksemetoden

Når vi strekker ut armen, holder en finger i været og lukker øylene vekselvis, flytter fingeren seg tilsynelatende i forhold til bakgrunnen. Dette fenomenet kalles parallaxe. Årsaken er at vi ser på fingeren med litt forskjellig vinkel med høyre eller venstre øye. Beveger vi fingeren nærmere ansiktet blir forflytningen større. Den tilsynelatende forflytningen blir enda større om vi flytter hodet til sidene. Dette prinsippet utnyttes til å bestemme avstanden til nære stjerner. Øyeavstanden er diameteren i jordas bane rundt sola. Så foretar man nøyaktige bestemmelser av vinkelen  $p$ , parallaksen til stjernen, som er halve vinkelen til den observerte forflytningen. Som referanse ved vinkelmålingene bruker man fjerne stjerner som ikke har noen synlig parallaxe.

#### Whirlpool-galaksen.

Whirlpool-galaksen.

Opphavsmann: [NASA](#)

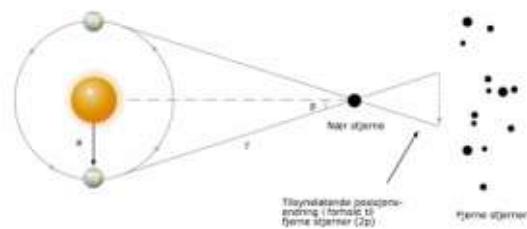
Den fotogene

Whirlpool-galaksen

M51 (=NGC 5194) har en diameter på ca. 30 000 lysår. Galaksen ligger i ca. 30 millioner lysår avstand fra oss.

Bildet er en kombinasjon av flere bilder tatt av Hubble Space Telescope. Det viser unge lyse stjerner. I

galaksearmen er det mørke støvskyer som er fødestedet til nye stjerner. Foto: NASA.



Bestemmelse av avstander med parallaksemetoden. Vinkelen til en nær stjerne bestemmes i forhold til fjerne stjerner fra jordas ytterposisjoner i sin bane rundt sola.

Opphavsmann: [Narom](#)

Av figuren kan vi bestemme parallaksevinkelen ( $p$ ) fra formelen:

$$\sin p = \frac{a}{r}$$

der  $a$  = den store halvaksen i jordas bane rundt sola,  $r$  = avstanden til stjernen.

Avstanden er altså:

$$r = \frac{a}{\sin p}$$

#### Eksempel: Avstandsbestemmelse med parallaksemetoden

Hvor langt er det til Proxima Centauri, solas nærmeste stjerne. Parallaksen er  $0,000211^\circ$ .

Svar:  $a = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ,  $p = 0,000211^\circ$

$$\$ \$ r = \frac{a}{\sin p} = \frac{1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}}{\sin 0,000211^\circ} = 4,07 \cdot 10^{16} \text{ m} = 4,3 \text{ lysår} \$ \$$$

Avstanden til Proxima Centauri er 4,3 lysår.

Parallaksevinkelen er veldig liten, selv for den nærmeste nabostjernen. Jo lengre borte en stjerne er desto mindre blir parallaksevinkelen. Dette setter begrensninger for denne metoden for avstandsbestemmelse. ESA-satellitten Hipparcos, som var i drift fra 1989 – 1993, foretok de mest nøyaktige parallaksemålinger hittil – med en nøyaktighet på 0,002 busekunder. I 2012 skal ESA skyte opp satellitten Gaia, som skal levere atskillig mer detaljerte data om posisjon og bevegelser til enda fjerne objekter.

### Eksempel: Parallaksevinkel

Den trigonometriske parallaksemетодen kan fra jordoverflaten kun brukes på stjerner med en avstand på inntil 400 lysår. Hvor stor er parallaksevinkelen til disse stjerner?

Svar:

$$\$ \$ \sin p = \frac{a}{r} = \frac{1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}}{100 \cdot 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}} = 3,96 \cdot 10^{-8} \$ \$ \quad \Rightarrow \\ p = 2,27 \cdot 10^{-6}^\circ = 8,18 \cdot 10^{-3} \text{ busekunder} \$ \$$$

Parallaksevinkelen er  $2,27 \cdot 10^{-6}^\circ$  eller  $8,18 \cdot 10^{-3}$  busekunder.

### Avstandsbestemmelse med parallaksemетодen 2

Du oppdager en stjerne som har en parallaksevinkel på 1 busekund. Hvor stor avstand er det til stjernen? Angi svaret i parsekunder, meter og lysår.

Svar: Avstanden er 1 pc. Det er på denne måten 1 parsekund er definert. Vi har tidligere sett at

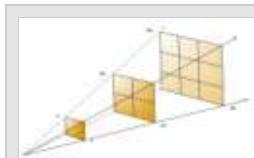
$$\$ \$ 1 \text{ pc} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,2 \text{ lysår} \$ \$$$

### Lysstyrkemetoden

Om to kuler lyser med samme styrke vil kilden som er lengst borte virke mørkere. Denne minskingen i lysintensitet kan vi utnytte til å bestemme avstanden til stjerner. Figuren til illustrerer at lysstyrken avtar med kvadratet til avstanden. Hvis den ene stjernen er dobbelt så langt borte som den andre vil lysstyrken bare være en fjerdedel. Ved tredobbelts avstand blir lysstyrken kun en niendedel, osv.

Effekten av stjernelyset er  $P_S$ . Intensitet ( $E$ ) er effekt per areal ( $A$ ). Lyset sprer seg radielt. Med økende avstand fordeler den utstrålte effekten seg på en stadig større kuleflate der kulens radius gir avstanden ( $r$ ) til stjernen.

$$\$ \$ E = \frac{P_S}{A} = \frac{P_S}{4 \pi r^2} \$ \$$$
$$\$ \$ r = \sqrt{\frac{P_S}{4 \pi E}} \$ \$$$



Belysningen avtar med kvadratet til avstanden fra kilden. En viss mengde lys går gjennom en rute med areal  $A$  i avstand  $r$  fra lyskilden. Den samme lysmengden vil fordele seg på  $4 \cdot A$  i avstand  $2r$ . Hver rute mottar da kun  $1/4$  del av lyset. I avstand  $3r$  fordeler lyset seg på  $9 \cdot A$ . Hver rute mottar kun  $1/9$  del av lysmengden. Opphavsmann: [Narom](#)

Det finnes nøyaktige instrumenter til å måle intensitet. Men for å løse likningen må vi også kjenne den utstrålte effekten, dvs. luminositeten til stjernen. Dette kan vi gjøre med å bestemme overflatetemperaturen til stjernen. Når vi så bruker H-R-diagrammet kan vi avgjøre hvor på hovedserien stjernen ligger og vi kan lese av den utstrålte effekten, innenfor en betydelig feilmargin. Med hjelp av spektralanalyser kan vi avgjøre om en stjerne tilhører hovedserien, er en kjempe eller en hvit dverg.

Hvis stjernen er en cepheide kan vi bestemme den utstrålte effekten på en enklere og mer nøyaktig måte.

### Eksempel: Avstandsbestemmelse med lysstyrkemetoden

Sola stråler med en effekt på  $4,0 \cdot 10^{26}$  W. Utenfor jordas atmosfære måler vi en lysintensitet på  $1400 \text{ W/m}^2$ . Finn avstanden til sola.

Svar:

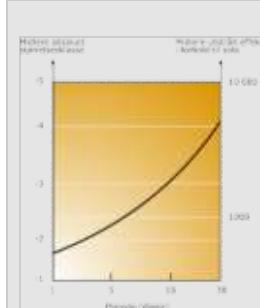
$$\text{Svart} = \sqrt{\frac{P_S}{4\pi E}} = \sqrt{\frac{4,0 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi \cdot 1400 \text{ W/m}^2}} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

Avstanden til sola er  $1,5 \cdot 10^{11}$  m.

### Cepheidemetoden

Mot slutten av det 18. århundre ble det oppdaget en stjerne som viste periodiske svingninger i utstrålt effekt. Etter hvert fant man flere stjerner som viste det samme fenomenet. Disse stjerner kalles cepheider. Med hjelp av dopplereffekten kunne man vise at disse stjerner pulserer, dvs. at de endrer sin størrelse i takt med endringene i luminositeten. Cepheidene har forskjellige perioder, fra omtrent en dag til tre måneder. Hver cepheide har sin faste svingeperiode. Det viste seg at periodelengden er korrelert til luminositeten. Store cepheider med høy utstrålt effekt har en lang svingeperiode, mens de små har en høyere frekvens. Figuren under viser sammenhengen mellom lengden på perioden og den absolutte magnituden/luminositeten. Cepheidene gir oss dermed en mulighet for å bestemme utstrålt effekt på en elegant måte. Når vi måler lysstyrken kan vi bestemme deres avstand som beskrevet i forrige avsnitt. Cepheidemetoden eigner seg til å finne avstanden til fjerne stjerner og galakser.

Avstanden til galakser kan også bestemmes med hjelp av dopplereffekten og Hubbles lov. Denne metoden omtales senere.



Sammenhengen mellom perioden til lysintensitetsendringer for cepheider og deres midlere utstrålte effekt og absolutte magnitude.

Opphavsmann: [Narom](#)

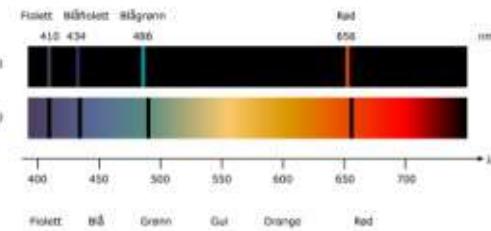
## Bestemmelse av fart: Dopplereffekten

Forfatter: Narom

[Bestemmelse av fart: Dopplereffekten \(59752\)](#)

Dopplereffekten opptrer også for lyskilder i bevegelse. Hvert grunnstoff har sitt karakteristiske emisjons- og absorpsjonsspektrum. For en lyskilde som fjerner seg, vil de karakteristiske linjene ha en lavere frekvens, dvs. at de vil være forskjøvet mot rødt i spekteret. Tilsvarende vil vi registrere linjene ved en høyere frekvens for en lyskilde som nærmer seg. Da får vi en blåforskyvning. Forskyvningen er avhengig av stjernens fart  $v$  i synsretningen.

Dopplereffekten er illustrert i figuren under. Uansett i hvilken retning man ser, observerer man en rødforskyvning i spektrene for fjerne galakser. Dette betyr at galaksene beveger seg fra oss, noe som tolkes som en utvidelse av universet. Størrelsen på forskyvningen er et mål for farten.



b) Absorpsjonsspekteret til hydrogen for en galakse. Alle linjer er forskjøvet mot rødt; det betyr at stjernen beveger seg fra oss.a)

Emisjonsspekteret til hydrogen for en kilde som er i ro.

Opphavsmann: [Narom](#)

Hydrogen er grunnstoffet det finnes mest av i universet, dessuten har det et forholdsvis enkelt linjespektrum som brukes ofte til å måle forskyvningen i spekteret. Dopplereffekten kan uttrykkes matematisk på følgende måte:

$$v = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot c$$

$c$  = lysfart,  $\lambda_0$  = bølgelengden til en spektrallinje målt i laboratorier,  $\lambda$  = bølgelengden til spektrallinen fra det observerte himmellegemet og  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  = bølgelengdeforskyvningen.

# Universets utvikling

Forfatter: Narom

[Universets utvikling \(59831\)](#)

Fysikken om universets tilblivelse og hvordan det har utviklet seg, kalles kosmologi. Ordet er gresk og betyr "læren om orden". Etter å ha studer stjernenes livsløp, vil nok de fleste akseptere at universet er i stadig forandring. Vårt store verdensrom har ikke noen romlig avgrensning. Selv om kosmologi er en ny vitenskap, kan den i dag gi svar på mange sentrale spørsmål. Men det finnes fortsatt mye om universet vi ikke forstår.

## Standardmodellen for universets tilblivelse: Big Bang

Modellen som i dag er akseptert av de fleste kosmologene er at universet oppstod ved det store smellet, "the Big Bang", for  $13,7 \pm 0,2$  milliarder år (etter data fra 2003) siden. I starten var hele universet samlet i et "punkt". "Punktet" var universet, noe "utenfor" fantes ikke, ikke engang vakuum. Siden har universet utvidet seg.

## Hubbles lov

Den amerikanske astronomen Edwin Hubble (1889-1953) observerte en rødforskyvning i hydrogenspekteret til galakser. Denne forskyvningen var sterkere jo større avstand galaksen har til oss. Forklaringen på observasjonen er at galaksene beveger seg fra oss. Jo større avstanden til galaksen er, desto større er farten den beveger seg med. Denne sammenhengen er kjent som Hubbles lov:

$$v = H \cdot r$$

$v$ : radialfarten til galaksen (dvs. farten fra oss),  $r$ : avstanden til galaksen,  $H$ : Hubbles konstant.  $H$  ansees som en konstant, men verdien er fremdeles noe usikker. Verdien som er oftest brukt er  $(20 \pm 3)$  km/s per  $10^6$  ly.

Radialfarten til en galakse bestemmes fra dopplereffekten. Fra Hubbles lov kan vi anslå avstanden til galaksen ved å kombinerer likningen med likningen for dopplereffekt:

$$r = \frac{v}{H} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \cdot c$$



## Eksempel: Dopplereffekt og Hubbles lov

For spektrallinen  $H\beta$ , den røde linjen i Balmerserien, måler vi i laboratoriet en bølgelengde på 486 nm. For den samme linjen måler vi 489 nm i spekteret til en galakse.

- Med hvilken radialfart beveger galaksen seg og i hvilken retning i forhold til oss?
- Hvilken avstand har galaksen?

Svar:

- Av rødforskyvningen i spekteret kan vi se at galaksen beveger seg fra oss. Rødforskyvningen er 3 nm. Med dopplerformelen finner vi farten:

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot c = \frac{489 - 486}{486} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Galaksen beveger seg med en fart på  $1,8 \cdot 10^6$  m/s fra oss.

b) Vi setter svaret fra a) inn i Hubbles lov, og får:

$$r = \frac{v}{H} = \frac{1,8 \cdot 10^6 \text{ m/s}}{20 \frac{\text{km/s}}{10^6 \text{ ly}}} = 90 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Observasjoner av galakser som stadig fjerner seg, ga Hubble ideen om at universet en gang var samlet. Hvis man bruker en rosinbolledeig som hever seg, vil man se at alle rosiner får større avstand fra hverandre og at avstanden til dem som er lengst borte øker mest – analogt til det som ble observert med galaksene. Mens bolledeigen utvider seg i et eksisterende rom, eksisterer det ikke rom omkring universet. Det er selve universet som utvider seg.



### Rosinbollemodellen / flashnode

<http://ndla.no/nb/node/59827>

Rosinbolledeigen som modell for det ekspanderende universet. Når deigen hever seg til det dobbelte vil avstanden mellom alle rosiner øke til det dobbelte. Dette innebærer at farten øker proporsjonalt med avstanden.

### Eksempel: Modell for universets utvidelse

Anta at du har en rosinbolledeig som står til heving. Du har 4 rosiner A, B, C, D. Avstand AB er 10 mm, AC 20 mm, AD 30 mm. Etter 20 minutter har avstanden mellom alle rosiner fordoblet seg. Med hvilken fart beveger rosinene seg fra hverandre? Hva er proporsjonalitetsfaktoren mellom farten og avstanden (tilsvarende Hubbles konstant)?

Svar:

Avstand før heving (mm)	Avstand etter heving r (mm)	Tilbakelagt vei s (mm)	Fart (mm/min)	Proporsjonalitetsfaktor H = v/r (min <sup>-1</sup> )
AB	10	20	10	0,5
AC	20	40	20	1
AD	30	60	30	1,5

Hubbles lov

Forfatter: [Narom](#)

Proporsjonalitetsfaktoren ved utvidelse av rosinbolledeigen i vårt eksempel er 0,025 og tilsvarer Hubbles konstant for universets utvidelse.

Vær oppmerksom på at vi i eksemplet har antatt at farten hvert punkt beveger seg med en konstant i det valgte tidsintervallet. Dette er en forenkling fordi modellen ellers forutsetter at farten øker med avstanden. Når det gjelder utvidelse av universet er vi ikke i stand til å måle en økt fart for en bestemt galakse, selv om målingene tas med flere års mellomrom.

Ved hjelp av Hubbles lov kan også universets alder anslås.

### Eksempel: Universets alder

Bruk Hubbles lov til å bestemme alderen til universet.

Svar: Vi bruker følgende formelsymboler:  $r$  = avstand mellom 2 galakser,  $v$  = farten galaksene fjerner seg fra hverandre,  $t$  = tiden for utvidelsen, dvs alderen på universet,  $H$  = Hubbles konstant = 20 km/s per  $10^6$  l.y.

I vår forenkla modell antar vi at universet har utvidet seg med konstant fart:  $r = v \cdot t$ .  
Da blir universets alder

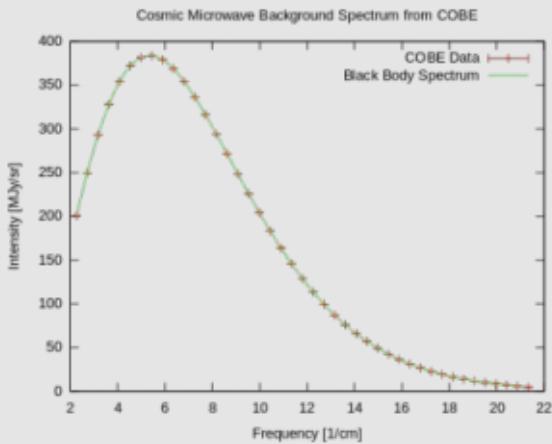
$$t = \frac{r}{v}$$

Vi kombinerer denne formelen med Hubbles lov:  $v = H \cdot r$  og får

$$t = \frac{r}{H} = \frac{1}{H} = \frac{1}{\frac{20 \text{ km/s}}{10^6 \text{ ly}}} = \frac{1}{\frac{20 \cdot 10^3 \text{ m/s}}{10^6 \cdot 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}}} = \frac{1}{2,1 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}} = 4,8 \cdot 10^{17} \text{ s} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ år}$$

### Universets utvikling

I grove trekk forestiller man seg utviklingen etter Big Bang-modellen på følgende måte: Det store smellet skapte universet – en masseklump med ekstrem høy temperatur og tetthet. For selve starten på skapelsen av universet mangler vi fremdeles forklaring. Tettheten var så stor at fotoner som ble skapt ved de høye temperaturene ikke kunne bevege seg fritt. Universet var ujennomsiktig. Universet utvidet seg, noe som førte til at temperaturen sank, akkurat som i en gass. Elementærpartikler ble dannet. Fusjonsprosessen der hydrogenkjerner danner helium kom i gang. Denne prosessen stoppet opp da nøytronene var brukt opp og temperaturen ikke var høy nok til fusjon av tyngre grunnstoffer. Universets sammensetning var da ca. 75 % hydrogen- og 25 % heliumkjerner. Etter ca. 300 000 år, da temperaturen hadde sunket til 3000 K, dannet atomkjernene og elektroner nøytrale atomer av hydrogen og helium. Da ble universet gjennomsiktig. Universet var fylt med elektromagnetisk stråling som tilsvarte en temperatur på 3000 K. Men universet utvidet seg og ble kaldere. Den elektromagnetiske strålingen gjennomgikk en rødforskyvning. Vitenskapsfolk hadde forutsagt at dersom Big Bang-modellen var riktig, måtte hele universet være fylt med termisk stråling i mikrobølgeområdet, med en bølgetopp tilsvarende en temperatur på 3 K. Da ideen ble lagt fram i 1948 fantes det ikke instrumenter til å måle slik svak stråling. Men senere, da bedre måleinstrumenter var utviklet, observerte man denne kosmiske bakgrunnsstrålingen. Måleresultatene fra satellitten COBE (Cosmic Background Explorer), som ble skutt opp av NASA i 1989, var i samsvar med den beregnede kurven i figuren under.



Kosmisk bakgrunnsstråling

Linjen viser intensiteten som funksjon av bølgelengden for kosmisk bakgrunnsstråling slik den er beregnet og måleresultatene. Beregningen og måleresultater er sammenfallende.

De sentrale observasjoner som støtter Big Bang-modellen er:

1. Lyset fra galaksene er rødforskjøvet. Forskyvningen er størst for galaksene som er lengst borte.
2. Massen i universet består hovedsakelig av hydrogen og helium.
3. Hele universet er fylt med kosmisk bakgrunnsstråling – elektromagnetisk stråling i mikrobølgeområdet, som har sin maksimale intensitet ved 1,1 mm som tilsvarer en temperatur på 2,7 K.

## Universets framtidige utvikling

Etter dagens viden finnes det tre muligheter for universets videre skjebne:

1. Utvidelsen overvinner gravitasjonskraftene, slik at universet fortsetter å ekspandere i all evighet. Vi snakker da om et åpent univers.
2. Gravitasjonskraftene vil til slutt overvinne utvidelsen. Universet vil trekke seg sammen og ende opp i et "Big Crunch". I denne modellen har vi et lukket univers. Det er mulig at den blir etterfulgt av et nytt Big Bang, slik at universet pulserer.
3. Utvidelsen vil balansere gravitasjonskraftene, slik at utvidelsen stopper opp uten at noe sammentrekning finner sted. Dette betegnes om et flatt univers.

Hva som kommer til å skje er avhengig av massetettheten i universet. Er det høyere massetetthet enn en viss grenseverdi, som kalles kritisk massetetthet, vil tyngdekraften til slutt seire over utvidelsen. Astronomene har anslått massetettheten med utgangspunkt i himmellegemer de er i stand til å se, men regner med høye "mørketall". Det finnes indikasjoner på at mørk materie kan utgjøre ca. 90 % av universet. Fordi materien er mørk, er den usynlig. Slik materie kan bare observeres gjennom deres virkninger. Farten til et himmellegeme er begrenset av systemets masse. Hvis farten var større ville legemet bli revet løs fra systemet. Man har observert stjerner som har en høyere fart enn hva som er forenlig med den observerte massen. Forklaringen er at det finnes usynlig masse, dvs. mørk materie. Mørk materie er et spennende forskningsfelt, men det ligger langt utenfor pensum.

## De klassiske spørsmålene

Forfatter: Narom

[De klassiske spørsmålene \(59753\)](#)

Når og hvorledes oppstod livet på jorda? Er det liv andre steder i universet? Moderne romforskning har ført oss et stykke på vei til noen av svarene.

Alt liv, slik vi kjenner det fra jorda, er basert på vann og organiske molekyler. Finnes det vann og organiske molekyler i det store verdensrom som kan være byggesteiner for proteiner og DNA-molekyler? Det første molekylet som ble funnet utenfor vår atmosfære var ammoniakk. Deretter fant man vann. Etter hvert har man funnet mye vann i universet. Som eksempel kan nevnes at kometen Hale-Bopp, som var godt synlig vinteren 1997/98, inneholder mer vann enn hele Østersjøen. Det er i dag mange kjente forskere som hevder at vannet på jorda er transportert hit av kometer.

Hva med organisk materiale? Pr. 1. januar 2000 er det funnet mer enn 100 forskjellige molekyler som inneholder karbonforbindelser i Melkeveien. Også i andre galakser er mange av de samme molekylene observert. Man har registrert store molekyler som har mer enn ti atomer. Også molekyler som man ennå ikke har klart å fremstille på jorda er observert.

Det vil ta noen tid før vi kan svare på spørsmålet om det finnes liv andre steder i universet. Det store spørsmålet i dag er om det har vært liv på Mars for noen hundre millioner år tilbake. Analyser av materiale på overflaten, bilder fra Mars, studier av meteoritter, og funnet av alger som klarer seg under helt ekstreme forhold i Antarktis, kan tyde på muligheten for at slikt liv fantes.

For 50 år siden var det få som kunne forestille seg en bemannet ferd til månen. Men allerede i 1969 satte det første mennesket sine spor på måneoverflaten. Den teknologiske og vitenskapelige utviklingen skjer raskt. Det er gode grunner til å tro at romforskningen en dag vil gi svar på mange av spørsmålene.