

# Kort om tid og atomklokker

Harald Hauglin

Nytten av felles tid

UTC – verdens felles tid fra 400 atomklokker

Hvorfor atomklokker?

Klokkestabilitet og støytyper

Cs-klokker , hydrogen-maser , optiske klokker og Q-faktor

Bruk av atomklokker: GPS

Bruk av GPS: Nøyaktig tid

# Foreløpig plan for UNIK 4430

- 25/8 Oppstart (datasett og oppgave 1 legges ut)
- 1/9 Klokkesignaler og støykarakteristikker (Bregni ch 5)
- 8/9 Oscillatorer: Oppbygning og karakteristikk (Bregni ch 6 ++)
- 15/9 Oscillatorer: Karakteristikk og modellering
- 22/9 Lab 1: Tidsintervallteller, karakterisering av TCXO og CSAC
- 29/9 Høstferie
- Okt GNSS: To sesjoner med teori og øvelser (RTKlib) med Glenn Gjevestad (NMBU)
- Okt Lab 2: GPS-styrt klokke
- Okt GPS-styrte klokker, sårbarheter og mottiltak
- Nov Lab 3:
- Nov Anvendelser
- Nov Tidstransfer
- Des Optiske atomklokker – karakteristikk og anvendelser
- 8/12 Innlevering av lab-rapporter
- 15/12 Eksamen

# Foreløpig plan for UNIK 4430

Pensumlitteratur:

- Stefano Bregni 'Synchronization of Digital telecommunications networks' ch 5- 7
- ++ annen støttelitteratur

Software: TimeLab fra <http://www.ke5fx.com/timelab/readme.htm>

Regneoppgaver vil til dels kreve noe programmering i MatLab, Mathematica, Python eller lignende

# Nobelpriser og atomklokker

1943	Otto Stern	Magnetiske egenskaper til atomer
1944	Isidor Isaac Rabi	Atomstråle resonans
1955	Polykarp Kusch	Presisjonsmåling av hyperfinstruktur
1964	Nikolai Basov Aleksander Prochorov Charles Townes	Maser/laser
1966	Alfred Kastler	Optisk pumping
1989	Norman Ramsey Hans Dehmelt Wolfgang Paul	H-maser, Ramsey-kavitet Fanging og kjøling av atomer og ioner
1997	Steven Chu Claude Cohen-Tannoudji William Phillips	Teknikker for kjøling av atomer
2005	John Hall, Theodor Hansch	Optisk frekvenskam
2012	David Wineland	Kvantelogikk og optiske atomklokker

# Nytten av en felles tidsreferanse

Felles klokketid ble en nødvendighet med framveksten av tog, telegraf osv.

Det moderne samfunnet er slaver av en felles klokketid:

- Hva vi *kaller* klokkeslettene endrer umiddelbart adferden til Norges befolkning ved overgang til/fra sommertid

Felles tidsreferanse brukes bl.a. i

- GNSS: 3-4 atomklokker i hver satellitt + ca 100 på jorden
- Kryptering/autentisering ved pålogging (kerberos)
- Integritetssjekk av transaksjoner/styringskommandoer
- Synkronisering av høyhastighets datanett
- Tidsstempling av hendelser/feillogging/elektroniske dokumenter
- Høyhastighets handel av aksjer (hvert ms teller!)
- Overvåking av kraftnettet (milli- og mikrosekund)

<http://www.wired.com/wiredenterprise/2012/07/leap-second-bug-wreaks-havoc-with-java-linux/>

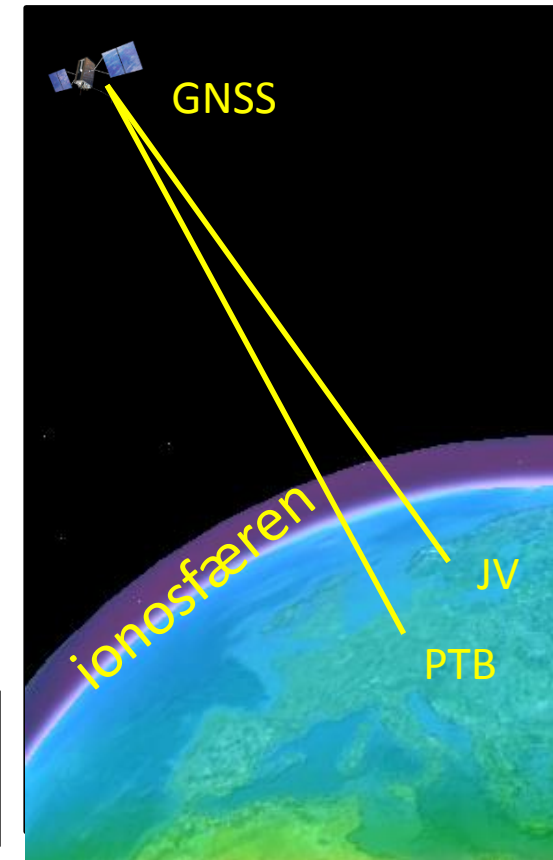
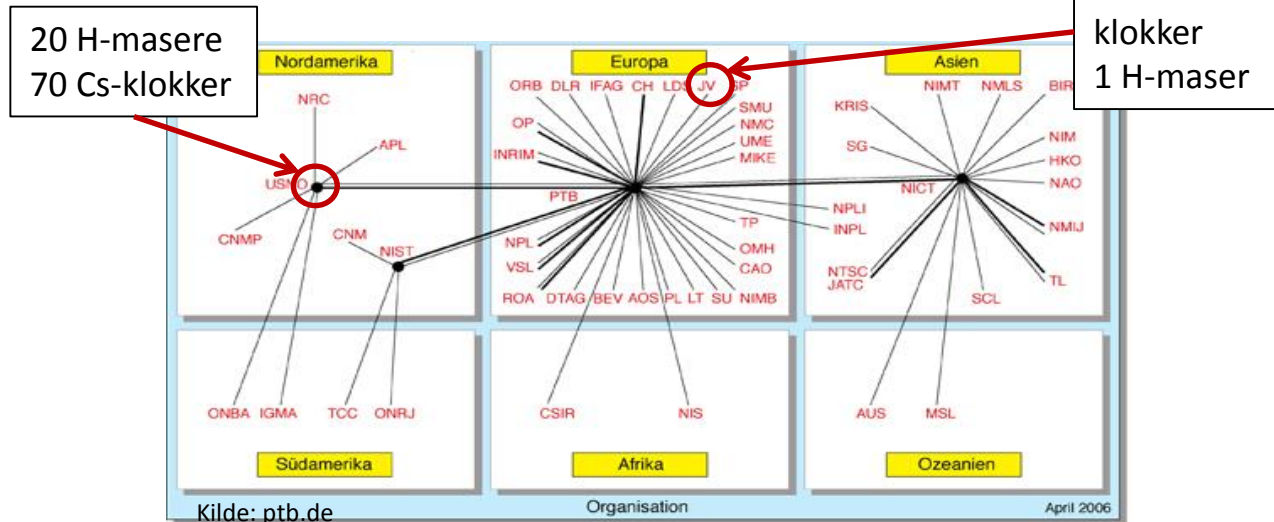
## 'Leap Second' Bug Wreaks Havoc Across Web

Feil tid kan skape krøll:

- Ved drapet på Anna Lindh i 2003 var største avvik i tidsstempel i innsamlet materiale 14 dager
- Bagasjesystemet til Quantas gikk i stå i en time ved siste skuddsekund
- Frankfurtbørsen stengt en dag ved skuddsekund
- Stopp i fjernstyring av industrielle anlegg ved klokkefeil

# UTC – verdens offisielle tid – fra 400 atomklokker

- 1 sekund = varigheten av 9 192 631 770 svingninger av strålingen til hyperfinovergangen i cesium.
- Kommersielle atomklokker: 1 s feil på 300 000 år (10 ns/dag).  
Superklokker: 1 s på 300 millioner år (10 ps/dag)
- UTC er en papirklokke: Et gjennomsnitt av ca. 400 atomklokker i 70 laboratorier + korrigert mot ca 10 primærklokker
- Justervesenet realiserer 'norsk tid' UTC(JV) og rapporterer 5 atomklokker hver 5. dag til 'hovedtidssentralen' BIPM
- BIPM beregner et gjennomsnitt av 400 bidrag og publiserer 'fasit' *Circular T* hver måned



# UTC – kun på papiret: Circular T fra BIPM gir fasit

CIRCULAR T 290  
2012 MARCH 08, 10h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE  
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of  $[UTC-UTC(k)]$  and uncertainties valid for the period of this Circular.  
From 2009 January 1, 0h UTC,  $TAI-UTC = 34$  s. From 2012 July 1, 0h UTC,  $TAI-UTC = 35$  s.

Date 2012 MJD	0h UTC	JAN 28 55954	FEB 2 55959	FEB 7 55964	FEB 12 55969	FEB 17 55974	FEB 22 55979	FEB 27 55984	Uncertainty/ns Notes		
Laboratory k		$[UTC-UTC(k)]/ns$							$u_A$	$u_B$	$u$
AOS (Borowiec)		0.3	-2.7	-5.4	-5.1	-4.5	-4.5	-2.9	0.3	5.2	5.2
APL (Laurel)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AUS (Sydney)		736.6	740.6	738.3	730.0	728.4	712.8	701.8	0.3	5.2	5.2
BEV (Wien)		72.0	72.4	73.7	78.4	74.3	62.3	50.9	1.5	3.3	3.6
BIM (Sofiya)		1380.1	1389.5	1404.6	1409.5	1420.9	1431.9	1429.5	1.5	7.2	7.3
BIRM (Beijing)		-2802.1	-2934.1	-3072.5	-3215.8	-3363.4	-3515.4	-3673.0	1.5	20.1	20.1
BY (Minsk)		69.1	76.1	78.4	-4.5	-9.7	-11.3	-16.2	1.5	7.2	7.3 (1)
CAO (Cagliari)		-6209.0	-6213.4	-6219.3	-6228.9	-6250.9	-6261.1	-6251.1	1.6	7.1	7.3
CH (Bern)		-11.1	-9.6	-11.7	-12.5	-13.7	-14.2	-12.8	0.3	5.1	5.1
CNM (Queretaro)		-13.4	-12.3	-14.1	-7.7	-5.4	-7.2	-9.1	2.0	5.2	5.6

CNMP (Panama)		43.3	46.0	60.5	57.0	60.6	-	61.8	3.0	5.2	6.0
DLR (Oberpfaffenhofen)		0.2	-1.7	-19.7	-32.9	-32.1	-12.1	12.8	0.3	5.2	5.2
DMDM (Belgrade)		-6.0	-10.7	-12.9	-19.5	-13.1	-11.7	-18.0	2.0	7.1	7.4
DTAG (Frankfurt/M)		31.9	27.5	17.1	13.6	5.3	4.1	0.3	0.3	10.0	10.0
EIM (Thessaloniki)		13.4	-	-	-	-	-	-	7.5	5.2	9.1
HKO (Hong Kong)		143.6	138.0	142.2	152.2	155.1	156.3	158.0	2.5	5.2	5.8
IFAG (Wetzell)		-578.0	-577.0	-580.8	-585.2	-592.9	-600.4	-605.4	0.3	5.2	5.2
IGNA (Buenos Aires)		-	6218.6	6281.1	6346.8	6406.8	6467.5	6526.4	1.5	5.2	5.4
INPL (Jerusalem)		-452.0	-457.7	-464.4	-472.0	-476.4	-478.7	-492.2	0.7	20.1	20.1
INTL (Buenos Aires)		124.8	118.3	83.0	60.1	28.4	10.2	-4.8	3.0	20.1	20.3

JV (Kjeller)		15.9	0.9	-1.3	12.5	-17.6	18.6	17.0	5.0	20.1	20.7
IPQ (Caparica)		-11.1	-16.0	-6.7	-9.2	-8.6	-23.9	8.2	0.4	7.1	7.2
IT (Torino)		-12.7	-13.1	-13.8	-13.7	-9.5	-6.3	-1.3	0.5	1.9	1.9
JATC (Lintong)		1.8	-2.0	-6.8	-11.6	-3.8	4.7	16.0	1.4	5.0	5.2
JV (Kjeller)		15.9	0.9	-1.3	12.5	-17.6	18.6	17.0	5.0	20.1	20.7
KEBS (Nairobi)		1730.0	1831.2	1934.0	2029.6	2141.0	2252.6	2373.4	1.5	20.1	20.1
KIM (Serpong-Tangerang)		-152.8	-154.6	-127.4	-110.4	-93.8	-84.2	-110.6	2.0	20.0	20.1
KRIS (Daejeon)		27.8	25.0	20.5	14.3	8.4	2.7	-0.2	0.3	5.1	5.1
KZ (Astana)		-281.7	-307.4	-389.3	-446.3	-470.3	-494.9	-513.5	1.5	20.0	20.1
LT (Vilnius)		70.8	72.8	55.1	56.3	28.6	40.8	33.9	2.0	5.2	5.6
MIKE (Espoo)		-5.4	-5.4	-5.6	-5.4	-5.3	-6.0	-5.1	0.3	7.1	7.1

UTC er kjent først inntil 40 dager i etterkant. Kontinuerlig kvalitetssikring med flere klokke. Hvor mange trenger man?

Justervesenet  
gir måling mening!



# Klokke = oscillator + telleverk: Hvorfor atomklokker?

## Oscillator

pendel + energikilde (1 Hz)

kvartskrystall (kHz - MHz)

maser (1.4 GHz)

laser (500 THz)

+ klokkeverk (teller og visere/display)

Vanlige klokker påvirket av temperatur, lufttrykk, magnetfelt, gravitasjonskraft, aldring, ...



Lombardi et al, Measure 2(4) 2007  
NIST Primary Frequency Standards



Figure 5. The first atomic frequency standard, based on the ammonia molecule (1949).  
Inventor Harold Lyons is on the right; Edward Condon, then the director of NBS, is on the left.

Ammoniakk-maser (NIST 1949).  
Bølgeleder /kavitet viklet rundt urskiven



5071A industriell Cs-klokke



# Tid 101: Alle klokker går i utakt

... noen mer enn andre

Klokketype	Relativ frekvensfeil*	Relativ frekvensdrift (1/dag)	Tid fra synkronisering til 1 ms tidsfeil	Tid fra synkronisering til 1 mikrosekund tidsfeil	Pris
PC-klokke	$10^{-4} - 10^{-5}$	10 s /døgn	minutter		\$ 0.1
TCXO -god kvarts	$10^{-6}$	$10^{-7}$ til $10^{-8}$	< 1 time	minuttter	\$ 1 - 10
OCXO – dyr kvarts temperaturstabilisert	$10^{-8}$ $10^{-10}$ **	$10^{-9}$ til $10^{-11}$	dager	timer	\$100 - 1 k
Rubidium-oscillator	$10^{-9}$ $10^{-12}$ **	$10^{-11}$ til $10^{-13}$	100 dager	1 – 30 dager	\$1k - 10 k
Chip scale atomic clock (CSAC)	$10^{-9}$ $10^{-12}$ **	$10^{-11}$ til $10^{-12}$	100 dager	1 - 10 dager	\$1k
Cesiumklokke	$10^{-12}$ $10^{-14}$ **	-	>> 10 år	år	\$100k

\*En klokke med en relativ frekvensfeil på  $10^{-5}$  går  $10^{-5} * 86400$  s = ca 1 sekund feil per døgn \*\* Etter kalibrering

# Atomklokker henter klokketakten fra energinivåer i atomer

1 sekund

=

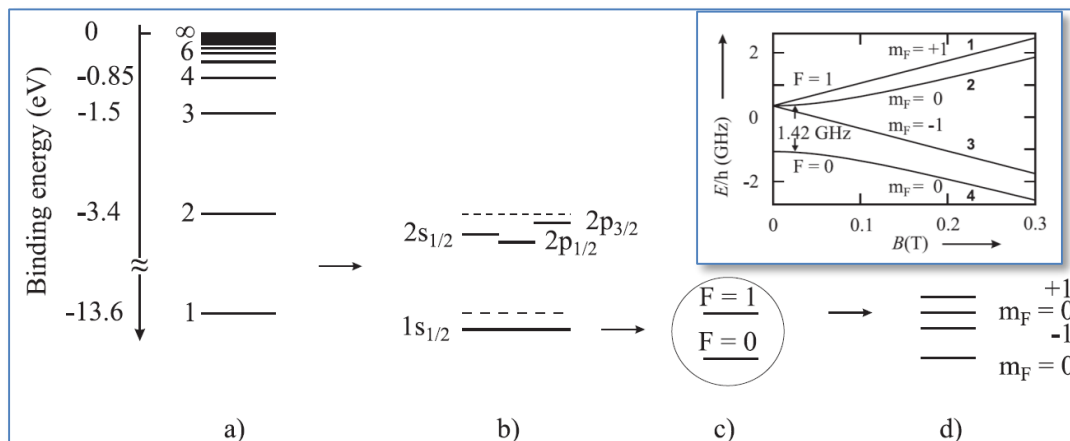
varigheten av

9 192 631 770

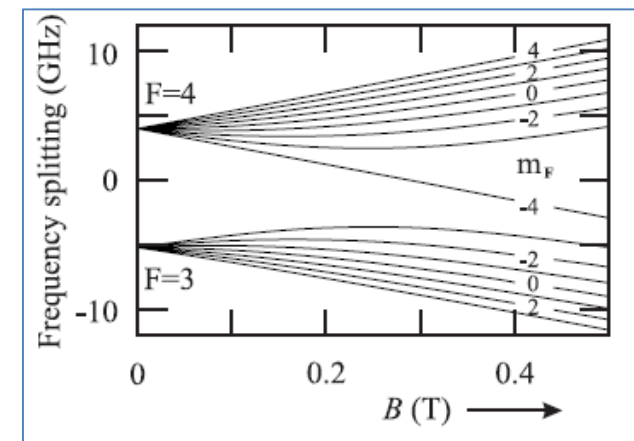
svingninger av radiobølgene som  
tilsvarer energiforskjellen til 0-0  
hyperfinoovergangen i grunntilstanden  
til Cs-133

Atom	Frequency (Hz)	Standard
$^1\text{H}$	1 420 405 751.770(3)	H-maser
$^{87}\text{Rb}$	6 834 682 610.904 29(9)	Rb-clock
$^{133}\text{Cs}$	9 192 631 770.0 (exact)	Cs-clock

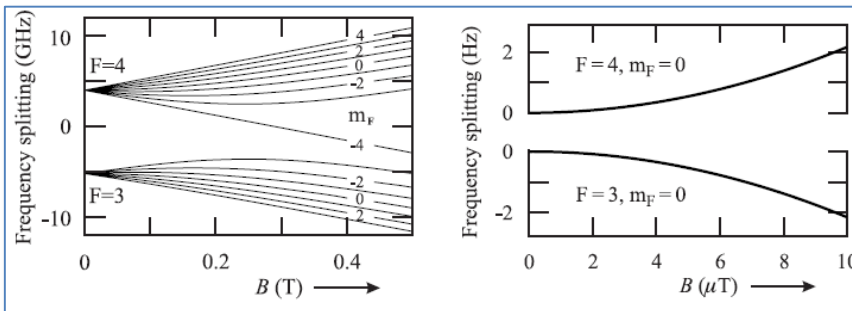
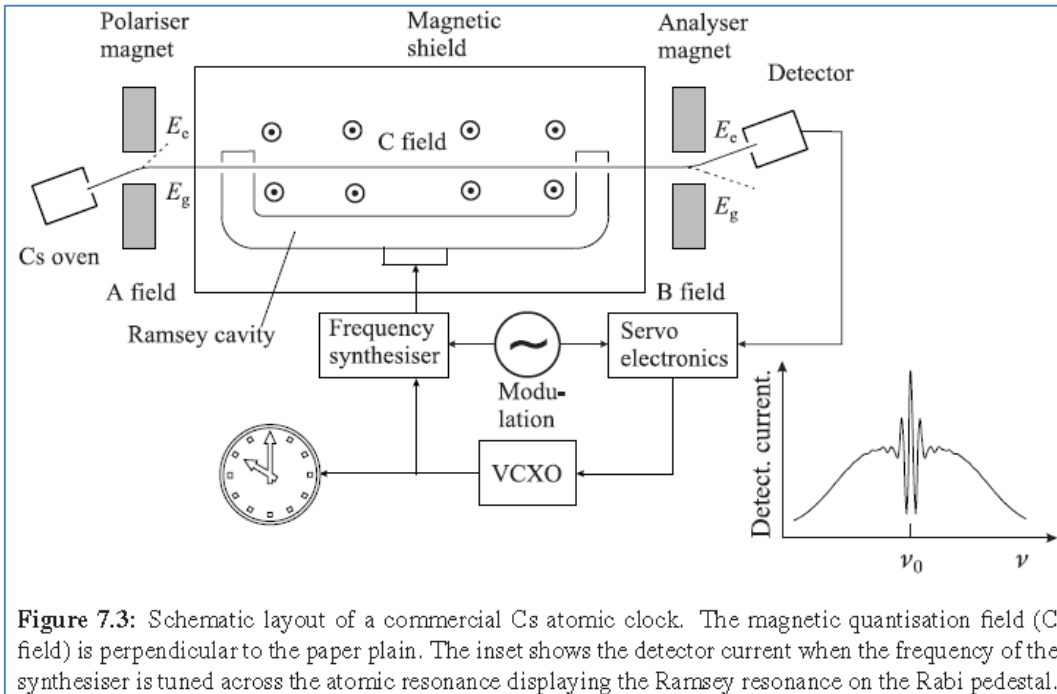
+ optiske frekvenser



**Figure 5.1:** Schematic energy diagram of atomic hydrogen. a) Central-field approximation. b) Inclusion of the spin-orbit interaction and QED effects. c) Interaction with the nuclear spin. d) Interaction with a magnetic field (Zeeman effect).



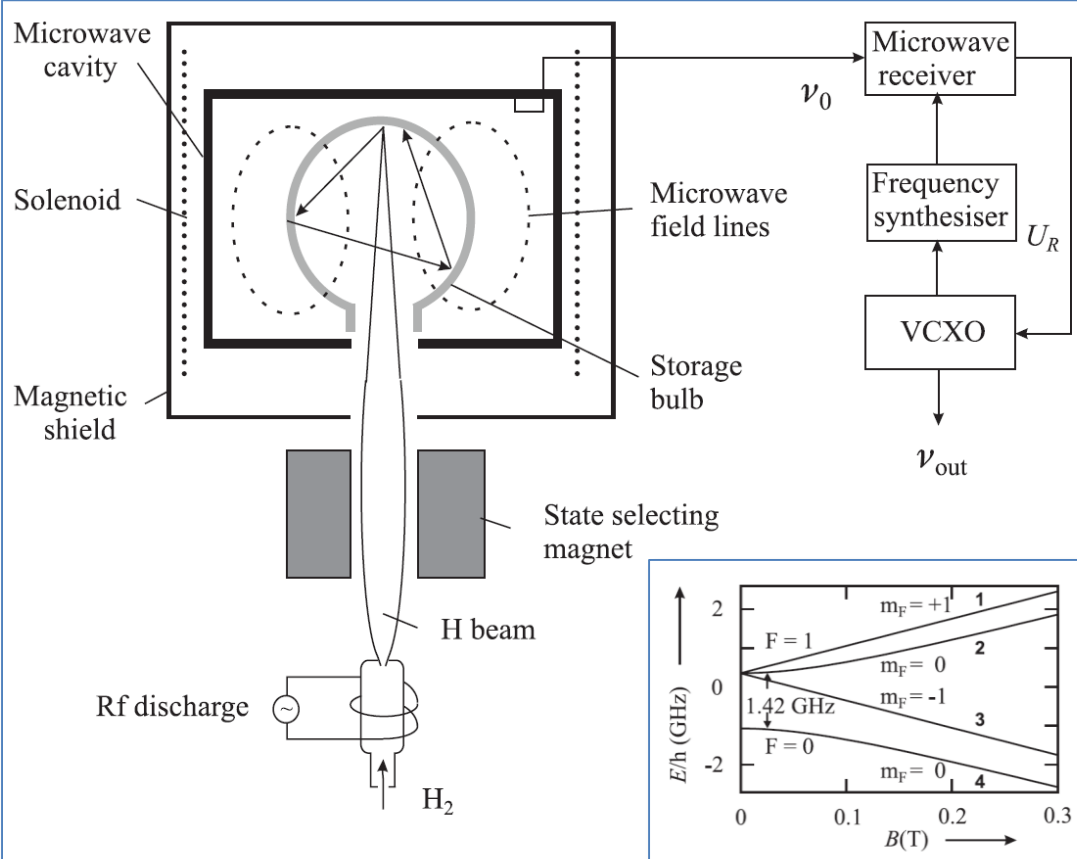
# Cesiumklokke



Fritz Riehle, *Frequency Standards – Basics and Applications*

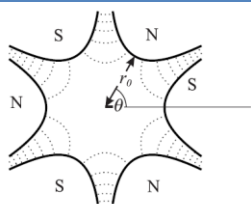
- Populasjonsinversjon via magnetisk seleksjon i Stern-Gerlach magneter
- Atomstråle ca 100 m/s
- Vekselvirkning med mikrobølgefelt nominelt 9 192 631 770 Hz
- Ramsey-kavitet virker som et interferometer og øker følsomheten
- Frekvensen til internoscillator VCXO styres slik at signalet på detektoren maksimaliseres.
- Kommersielle klokke:  
Systematiske skift  $10^{-13}$ , lang tids flicker stabilitet  $10^{-14}$ . Ingen frekvensdrift.

# Hydrogen-maser

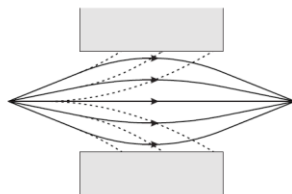


**Figure 8.1:** Schematic of an active hydrogen maser.

- Populasjonsinversjon via magnetisk seleksjon
- Hyperfintilstand har levetid 1 s i teflonbelagt kolbe (100000 kollisjoner)
- Kolbe i mikrobølgekavitet
- **Aktiv maser:** Over terskelnivå for masing. Mikrobølger fra H detekteres direkte og krystalloscillator faselåses til maser.
- **Passiv maser:** Under terskelnivå for masing. Mikrobølger med rett frekvens forsterkes. Oscillator frekvenslåses til maksimal forsterkning
- Større systematiske skift enn Cs-klokker + frekvensdrift



**Figure 8.3:** Hexapole magnet with alternating north (N) and south (S) poles. Dotted curves sketch the magnetic induction of (8.24).



**Figure 8.4:** Trajectories of low-field seeking (full lines) and high-field seeking (dashed lines) paramagnetic atoms in a hexapole focussing magnet.

# Stabilitet til atomklokker karakteriseres ved Allan-deviasjonen

Standard varians for frekvenser  $y_i$ :

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

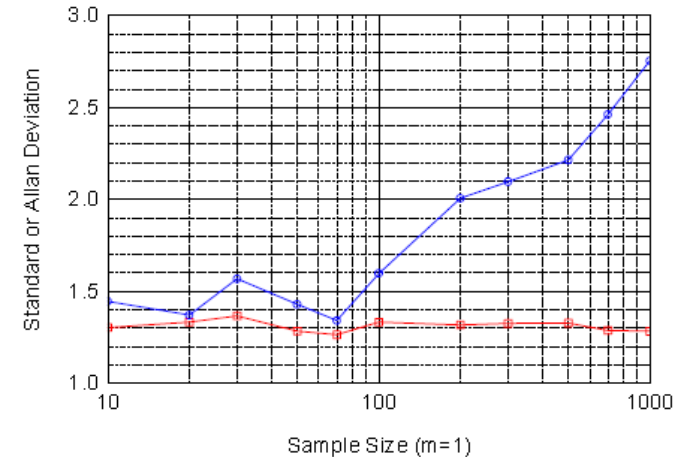
Standarddeviativet

*divergerer* for de fleste typer klokkestøy.

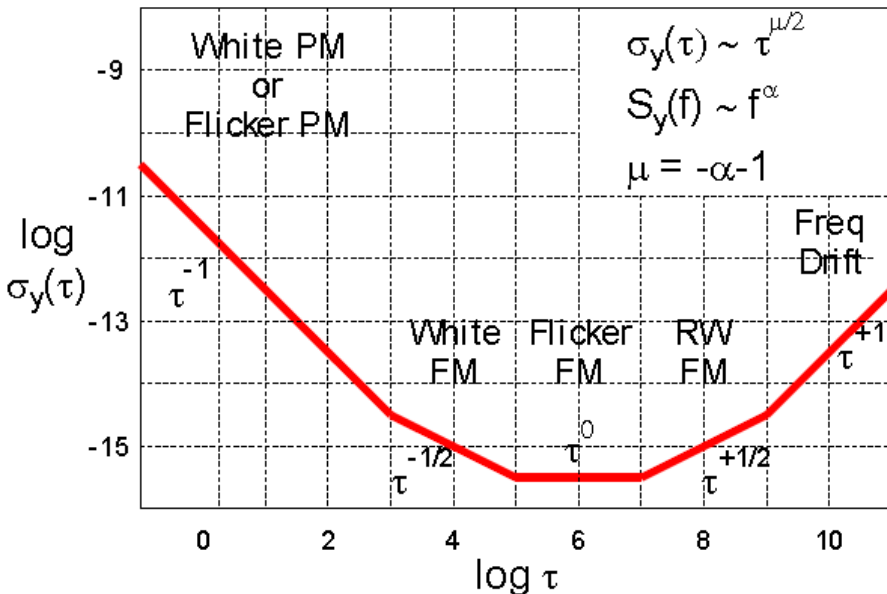
Allan-variens for påfølgende frekvens (observasjonstid  $\tau$ ):

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2$$

Convergence of Standard & Allan Deviation for F FM Noise



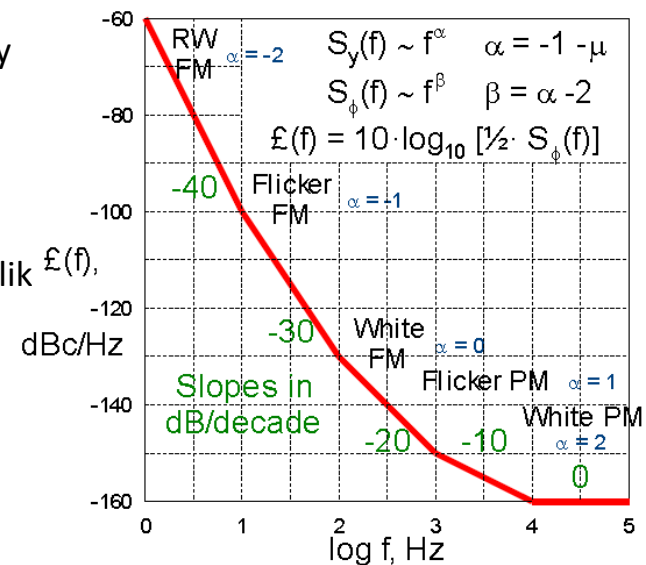
Sigma Tau Diagram



Ulike typer klokkestøy er karakterisert med ulike eksponenter i spektraltettheten.

Tilsvarende gir støy ulik avhengighet av midlingstid i Allan-deviasjonen.

SSB Phase Noise Diagram



Justervesenet

gir måling mening!

# Hva bestemmer stabiliteten til atomklokker?

**Korttidsstabilitet** bestemmes av relativ bredde på atomær resonans og signal/støy-forhold:

$$\sigma_y \sim \frac{0.2}{Q (S/N)} \tau^{-1/2} \quad \text{aktiv maser (hvit fasestøy) : } \tau^{-1}$$

Kvalitetsfaktoren  $Q$  sier hvor skarp den atomære resonansen er:

$$Q = f_0 / \Delta f_0$$

Den intrinsiske linjebredden  $\Delta f_0$  tilsvarer invers levetid  $T$ .

Hyperfin-tilstander lever lenge:  $\Delta f_0 \sim 1/(1000 \text{ år})$  eller  $10^{-11} \text{ Hz}$  eller  $Q = 10^{20} \dots$

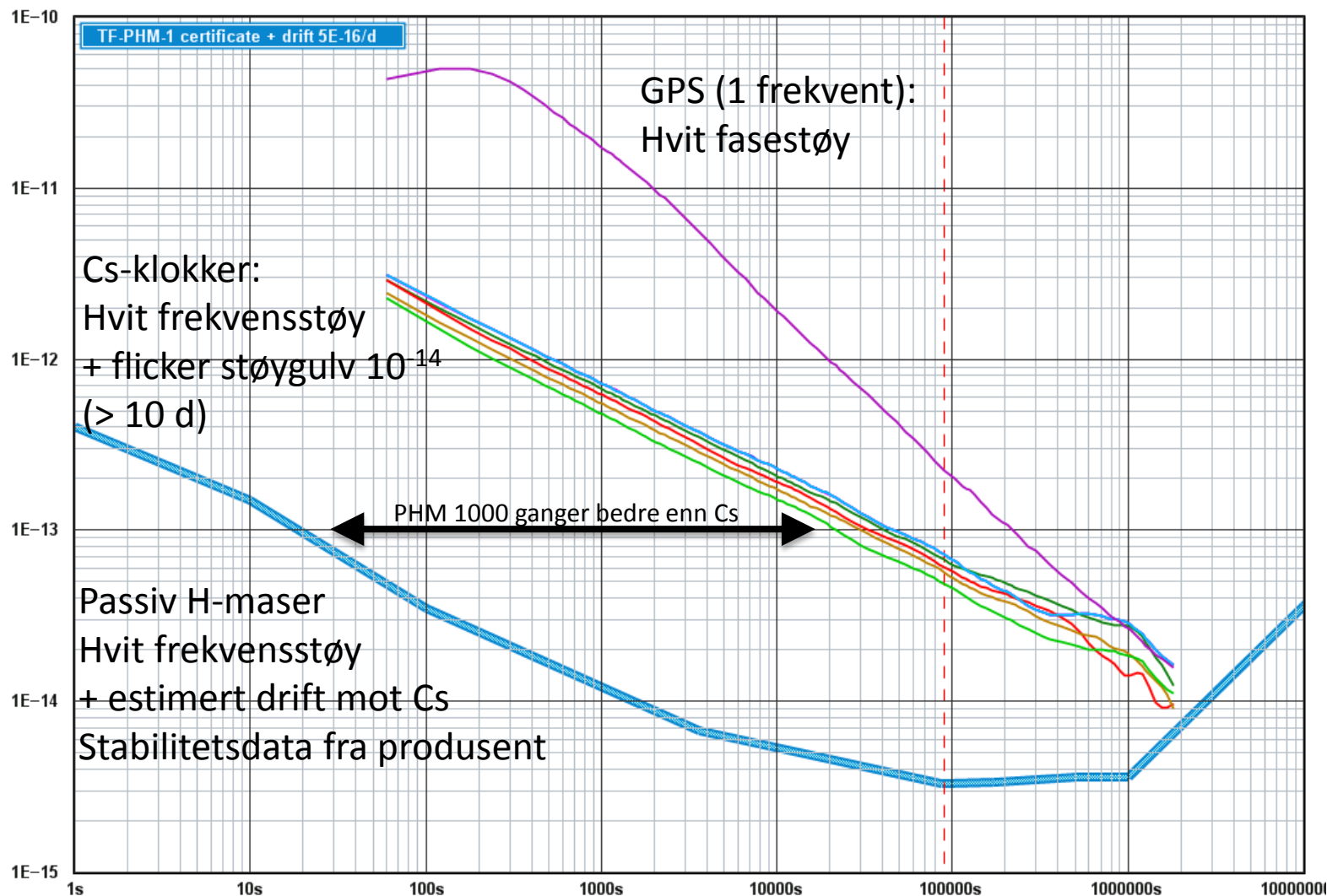
I praksis: Linjebredden begrenset av observasjonstid eller dekoherenstid ved kollisjoner etc

	$T$	$f_0 \text{ Hz}$	$Q$
Industriell Cs	1 ms (observasjonstid)	$10^{10}$	$10^7$
Cs fontene	1 s (observasjonstid)	$10^{10}$	$10^{10}$
H-maser	1 s (dekoherens pga kollisjoner)	$10^9$	$10^9$
Optisk klokke	1s (levetid)	$10^{15}$	$10^{15}$

**Langtidsstabilitet** bestemmes av dimensjonsstabilitet, endring i overflater, trykkstabilitet, temperaturstabilitet, ..., ..., til sist: stabilitet til naturkonstantene.

# 100 dager med klokkemålinger – Allan-deviasjon

## Allan Deviation



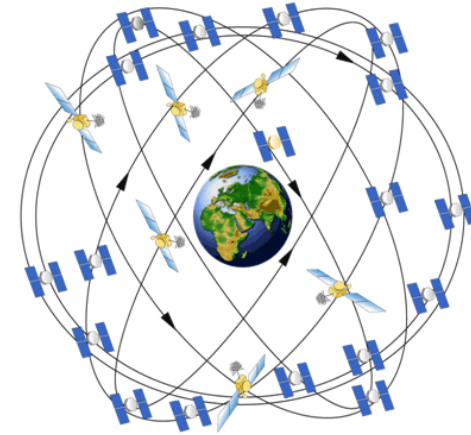
NIST Yb optisk atomklokke: Allan deviasjon  $3.2 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$





# Bruk av presis tid: GPS

# Bakgrunn: Hva er GPS?



- 24 satellitter i bane 22 000 km over jordens overflate. Har 3 – 4 atomklokker
- Satellitter sender tidsstemplede meldinger som dekodes av GPS-mottakere
- Tidsforsinkelsen mellom mottakstidspunkt og avsendertidspunkt bestemmer avstanden mellom mottaker og satellitt (pseudorange)  $\rho_k = c(t_r - t_T)$
- $c = 3 \times 10^8$  m/s. En klokkefeil på et mikrosekund gir 300 meter feil
- Klokkene i GPS satellittene oppdateres 1 – 2 ganger per døgn.

# Hvordan virker GPS?

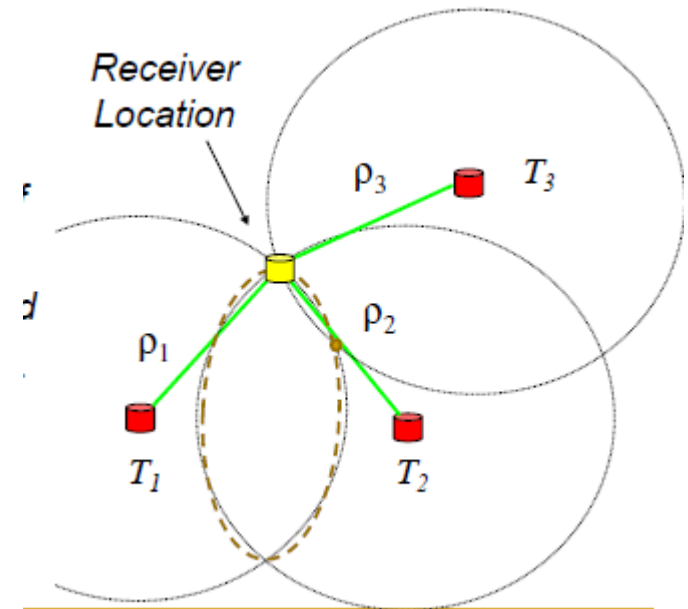
GPS baserer seg på at banedata og klokkene i satellittene er kjent.

GPS-mottakere måler for hver satellitt:

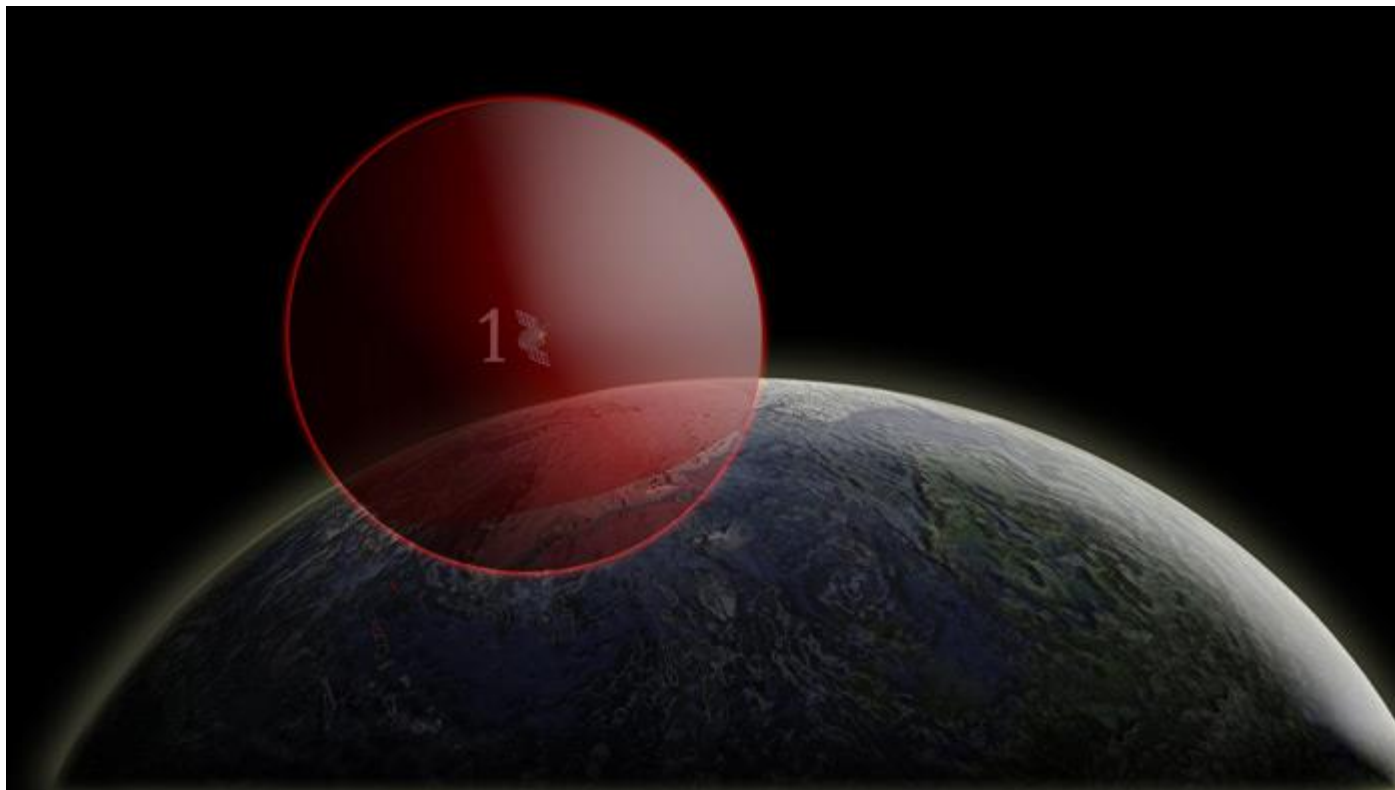
- Tidsforsinkelse
- Doppler-skift (dvs relativ hastighet)
- Bærebølgens faseskift

Mottakerklokken må være 'riktig' innenfor noen få nanosekunder. Ingen mottakere har slike klokker innebygget. En posisjonsløsning krever derfor minst fire satellitter.

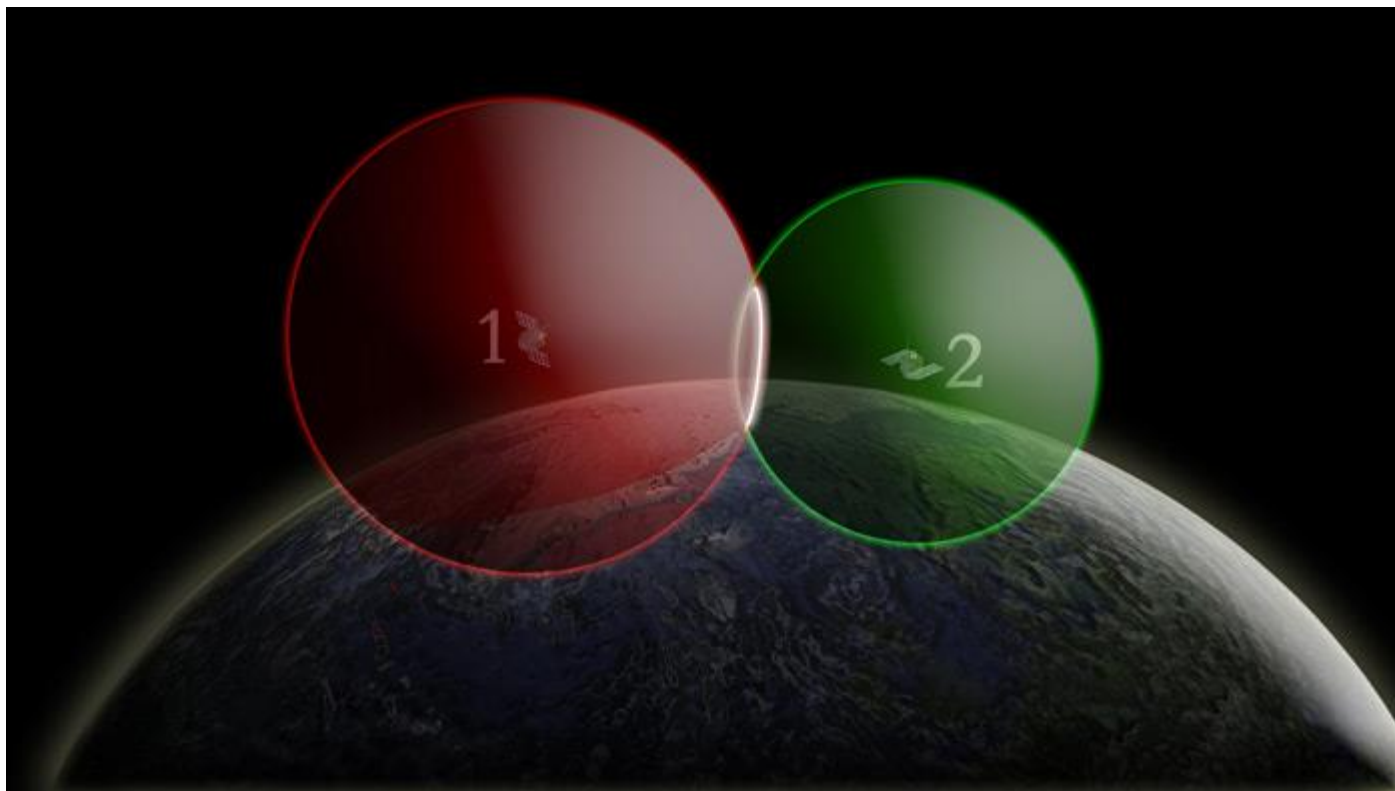
Hastigheten bestemmes av Doppler-shiftet, uavhengig av posisjonsløsningen.



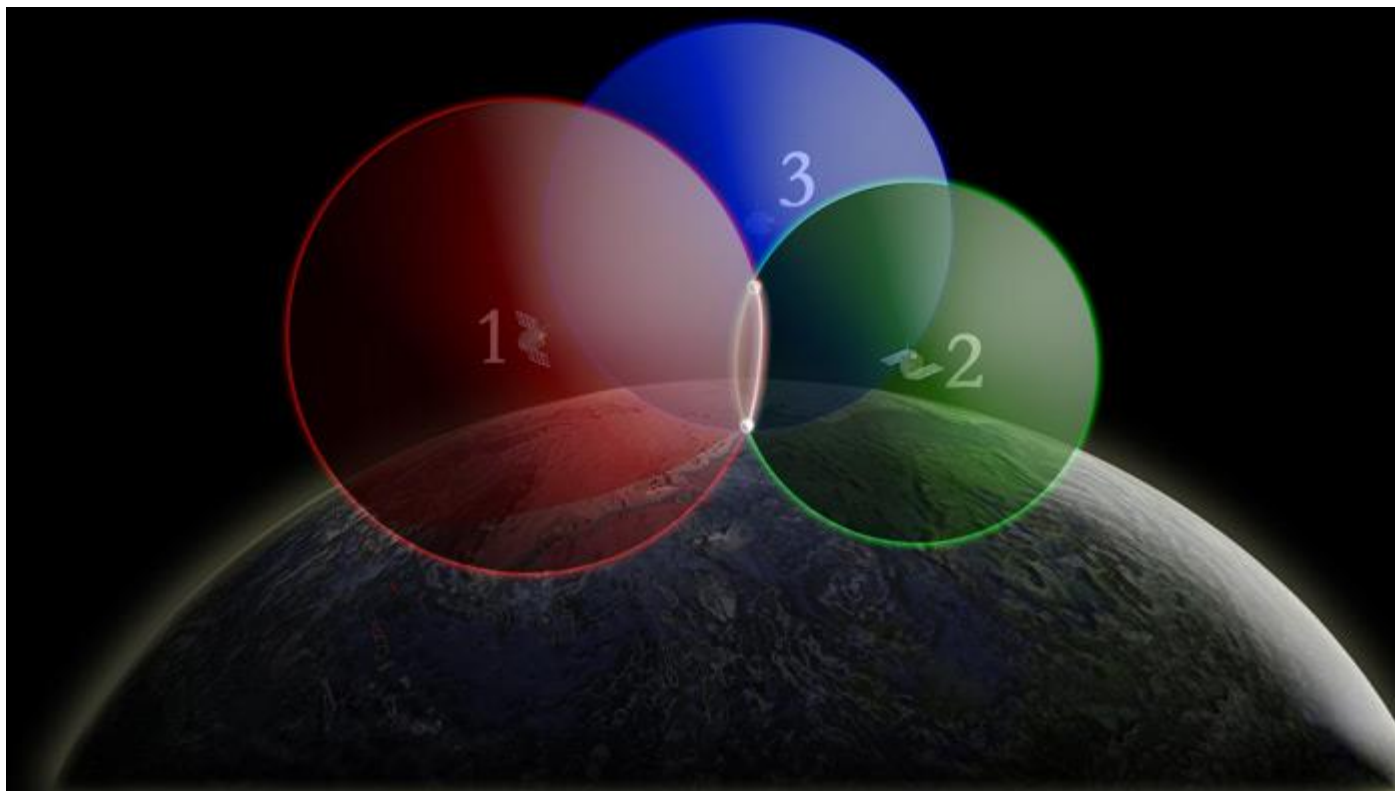
# Posisjonsbestemmelse ved gangtidsmåling



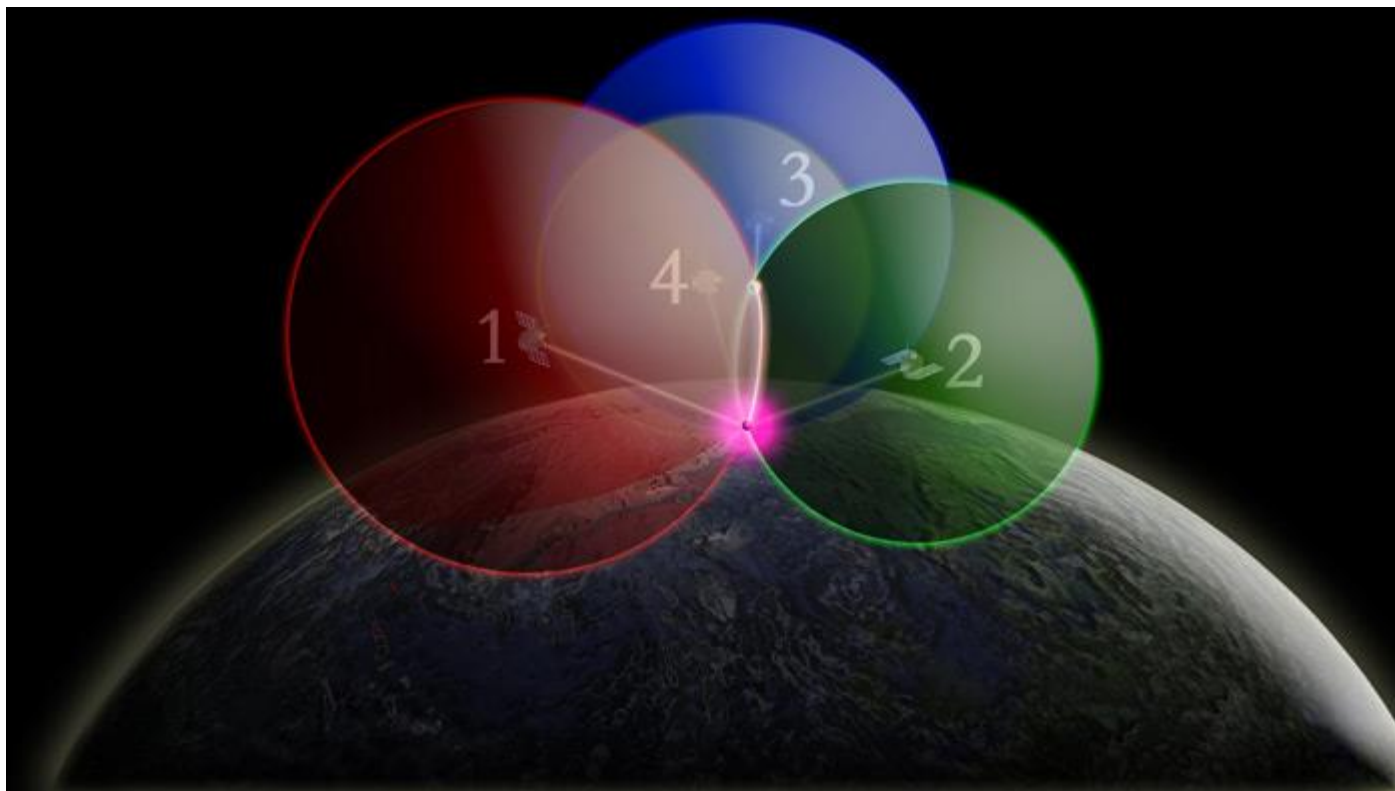
# Posisjonsbestemmelse ved gangtidsmåling



# Posisjonsbestemmelse ved gangtidsmåling



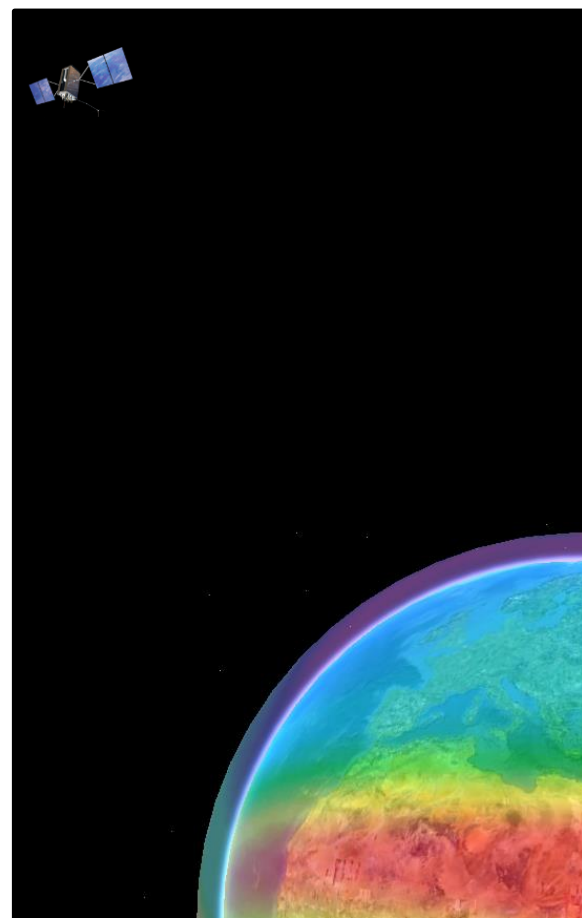
# Posisjonsbestemmelse ved gangtidsmåling





## Oversikt over typiske feilkilder i posisjonsbestemmelse

Error Source	Typical Error
Ionosphere (< 1000 km)	1-5 m (single frequency, using broadcast model)
Troposphere (< 20 km)	0.1-1 m
GPS orbits	2.0 m (RMS)
GPS clocks	2.0 m (RMS)
Multipath ("clean" environment)	0.5-1 m code 0.5-1 cm carrier
Receiver Noise	0.25-0.5 m (RMS) code 1-2 mm (RMS) carrier



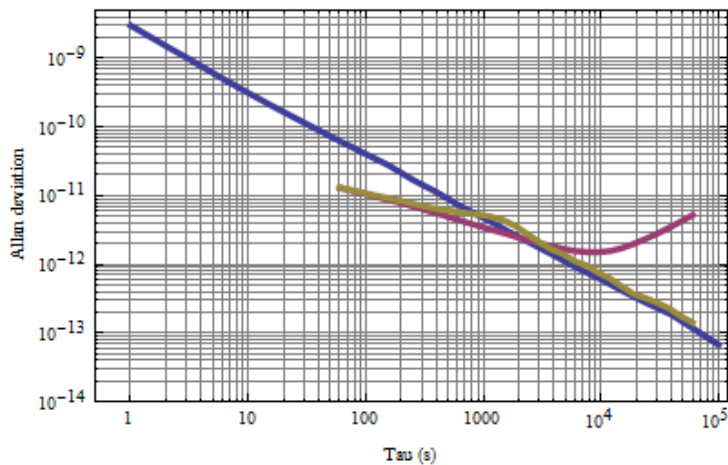
Kartverket leverer sanntidskorreksjoner via *cpos* og *dpos*-tjenestene som reduserer typiske posisjonsfeil til cm og dm.

Hastighetsbestemmelsen vil være upåvirket av de største feilkildene

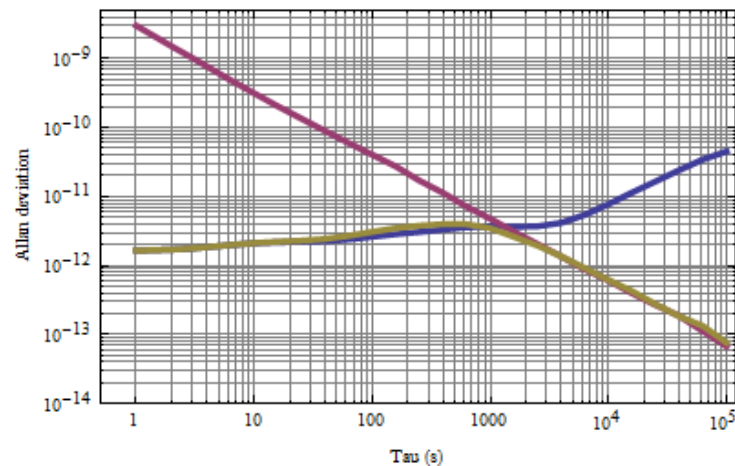
# GPS som kilde til presis tid

## Utbredte bruk av GPS: Ikke finne ut hvor, men når (synkronisering)

- Ustabile klokke kan korrigeres/styres mot tid fra GPS
- Optimal korreksjon gir korttidsstabilitet til lokal klokke + langtidsstabilitet til GPS
- Sårbarheter: GPS kan jammes (støysending) eller spoofes (forfalskes)
  - Hvordan kan GPS-styrte klokke beskyttes mot slike sårbarheter?



CSAC



OCXO