

Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

Institutt for Informatikk

# IN1080 Mekatronikk

Motorer: AC/DC-stepper

Yngve Hafting  
Universitetslektor  
Robotikk og intelligente systemer

2022-03-10



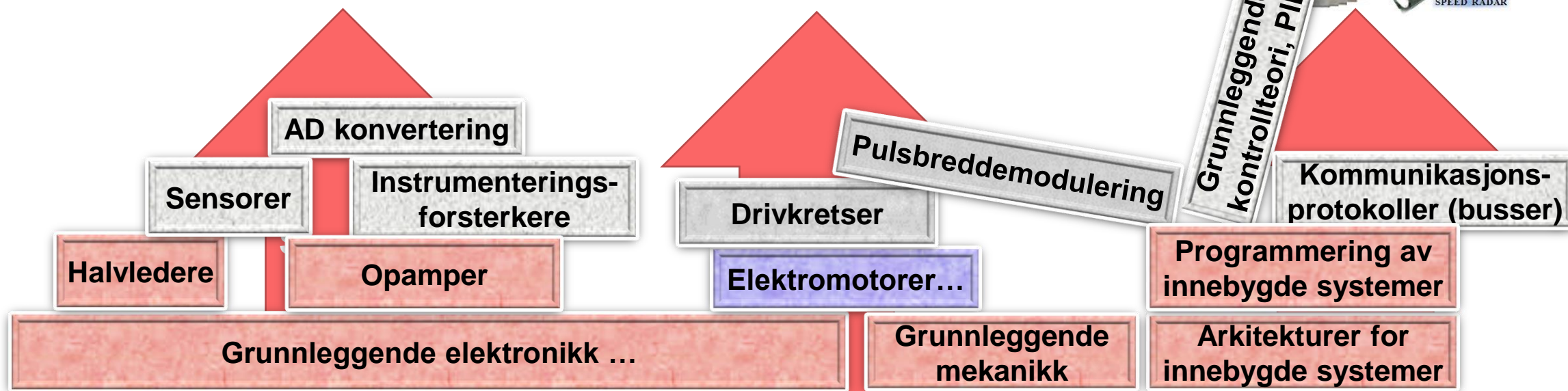
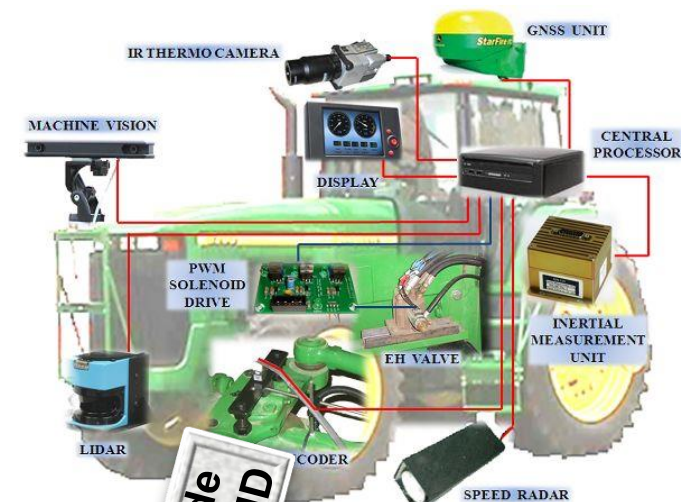
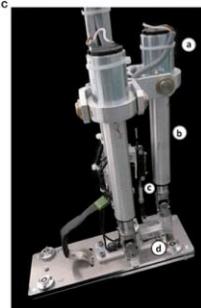
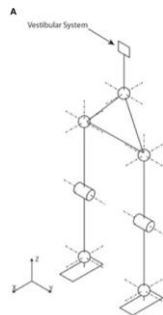
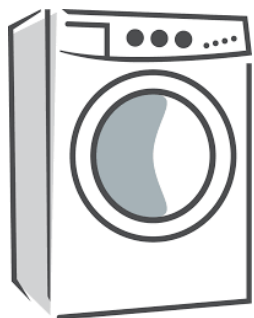
UNIVERSITETET  
I OSLO





# Hvor står vi – hvor går vi...

Formål: Å lage og programmere mekatroniske systemer



# Motorer

## Mål

- Å kunne velge og benytte elektriske aktuatorer i mekatronikksystem.
  - Kjenne til ord, begreper og deres betydning
  - Kjenne til prinsippene for virkemåte til forskjellige typer aktuatorer (elektromotorer)
  - Kunne beregne om elektromotorer kan benyttes til spesifikke oppgaver.

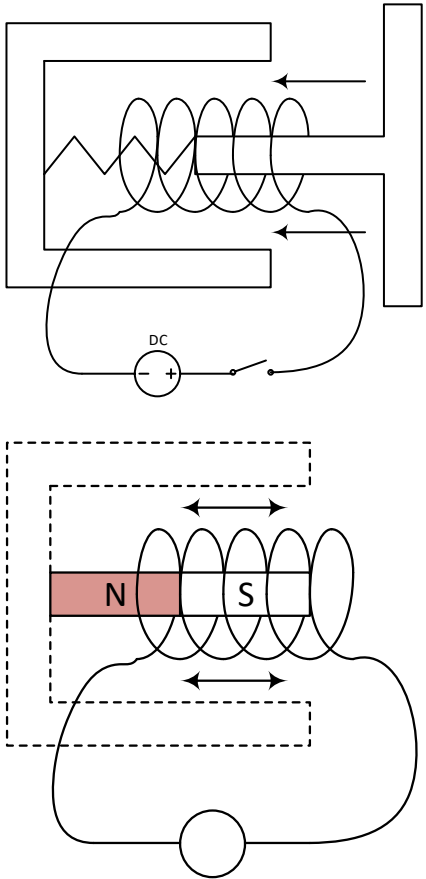
# Motorer

## Oversikt

- Aktuatorer med enkeltspoler
  - Solenoide
  - Relé
  - *Homopolare motorer*
- Elektriske motorer
  - Prinsipp og begreper
  - Eksempel- dronemotor
  - Elektrisk modell
    - Regneeksempel dag2
  - Hovedtyper elektromotorer
  - Induksjonsmotor prinsipp
  - «Likestrømsmotorer»
    - Børstemotor - prinsipp
    - Prinsipp for børsteløse motorer
  - Universalmotorer
  - Steppermotorer

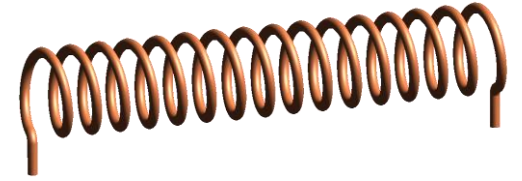
# Motorer

Elektriske aktuatorer basert på enkeltspoler (*ikke*-motorer..)



- En **solenoid** er en tettviklet spole med elektrisk ledende tråd.
  - Uttrykket brukes også (mest) om *spolebaserte transdusere/ aktuatorer*.
  - Eks: Magnetventil (solenoid valve), relé (relay)
- I en solenoidebasert aktuator beveger man et magnetiserbart materiale (/magnet) i forhold til spolen når det går strøm i den.
- **Magnetventiler** brukes til å styre hydrauliske og pneumatiske systemer.
- **Reléer** brukes til å styre strømmer.
  - Gir galvanisk skille (høy vs lav spenning)
  - Kan brukes til både DC og AC
  - Langsomme ifht transistorer
  - Slites ut mekanisk.
  - *Monostabile* eller *bistabile*
- **Høytalere**...
- **Tennplugg** – lager gnister for å tenne drivstoff.
- *Homopolare motorer*
  - Lite effektive, mest typisk brukt til demonstrasjonsformål

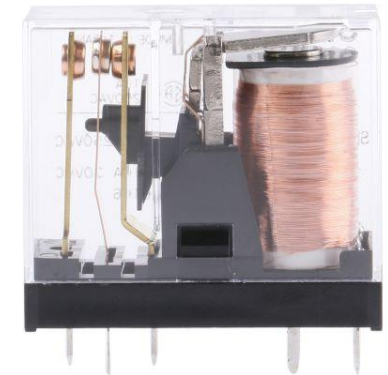
<https://www.youtube.com/watch?v=LcyqJWvZioM> (Anbefales å se frem til 2.15)



Av Zureks - Eget verk, Offentlig eiendom,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17624128>



[Solenoid actuator, RS-components](#)



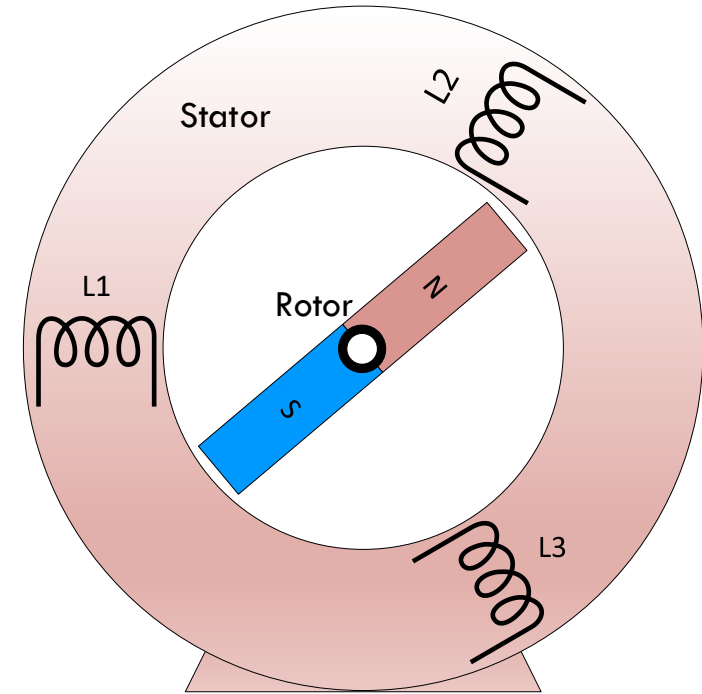
[Bistabilt relé, RS-components](#)

# Motorer

## Elektromotor prinsipp og begreper

En elektromotor består i hovedsak av to deler, Rotor og Stator

- **Rotor** (delen som roterer)
  - består av en eller flere magneter og eller noe magnetiserbart.
- **Statoren** er den delen som står stille,
  - elektromagneter i ring rundt aksen
    - *kan også være permanentmagneter dersom rotoren er en elektromagnet.*
- Rotoren trekkes rundt ved veksle på hvilke spoler som er strømførende
  - Styringen av strømmen kalles **kommutering**.
  - Magnetfeltet er proporsjonalt med strømmen i spolene.
- **Poler** – antallet spoler i stator og magnetpoler i rotor.
  - *DC motorer* har oftest et multiplum av 3 statorpoler
  - *Steppermotorer* har ofte et multiplum av 4 statorpoler.
  - Rotor har gjerne et multiplum av 2 (*permanentmagneter kan ikke ha noe annet*)
- Kommuteringen og oppbygningen til rotor og stator avgjør navn og type motor
  - I en «**Inrunner**» er rotoren på innsiden av motoren
    - best for høy hastighet og lavt dreiemoment
  - I en «**Outrunner**» er rotoren på utsiden
    - best for lavere hastighet og høyt dreiemoment
  - *Vi skal kikke på AC, DC og Steppermotorer...*



Skissen viser en N3P2 «inrunner»  
(DC-motor med 3 poler i stator og 2 i rotor).  
*Vi teller kun spolepoler som vender mot rotor.*

# Motorer

## Hovedtyper elektromotorer

- Vi skal kikke nærmere på prinsippet bak tre hovedtyper elektromotorer:
  - AC motor
  - DC motor
  - Steppermotor
- IN1080: *hovedfokus* på DC- og steppermotorer.
  - AC motorer er mye brukt => vi bør ha en ide om hva det er til forskjell fra alternativene
- Andre motorer
  - Nevnes/ kort intro.

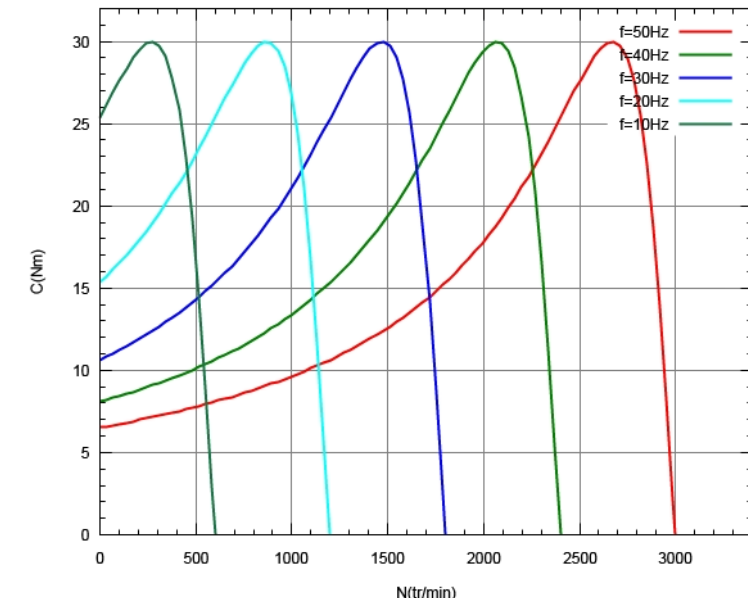
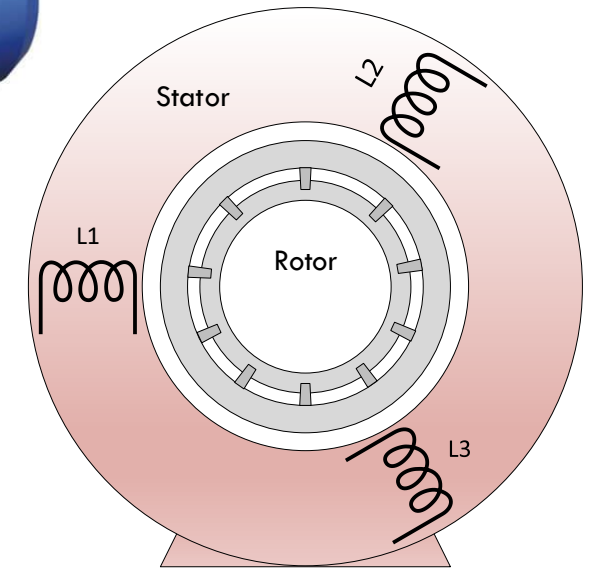
# Motorer

## Induksjonsmotor (AC asynkron motor)

- Induserer strøm i rotor ved hjelp av magnetfelt til stator
- Rotor består typisk av et hamsterhjul «squirrel cage»  
[https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP\\_3o](https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o) (6:45)
- *Billig konstruksjon*- trenger ikke permanentmagneter eller sensorer.
- *Trekker mye strøm ved start!*
- Hastigheten til rotor blir noe lavere enn synkronhastighet (magnetfeltets rotasjon)

$\text{slip} = \frac{n_{\text{stator}} - n_{\text{rotor}}}{n_{\text{stator}}}$ , der  $n_{\text{stator}}$  er frekvensen til statorfeltet og  $n_{\text{rotor}}$  er frekvensen til rotoren

- Ved å øke antallet spolepar («poles»), kan man senke hastigheten og øke dreiemomentet.
- Lages typisk både i enfas og trefas varianter.
  - Flerfase/ flerpols motorer er selvstartende.
  - Enfas- motorer må ha en form for starter, ellers vil den kjøre i vilkårlig retning.
- Hastigheten til en AC motor kan endres ved å variere frekvensen på strømkilden (inverter).





# Motorer

<https://www.youtube.com/watch?v=XUO7D4s-0Pc>

## AC synkron motor

Synkronmotorer har typisk

- **Permanentmagneter i rotor** eller
- **børster** eller en **roterende transformator** rundt aksen for å gi strøm til spolen(e) i rotor.

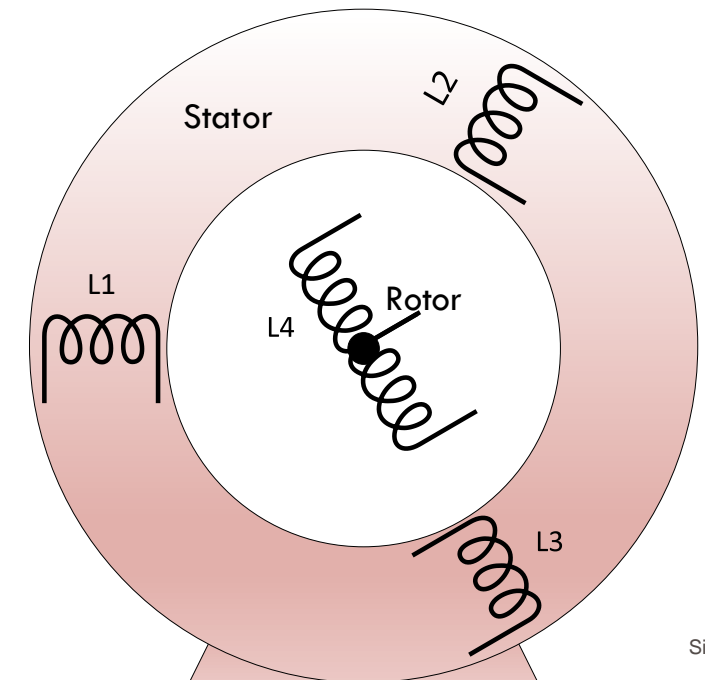
**Hastigheten til rotor lik hastigheten til magnetfeltet.**

Oppgitt i RPM (Runder per minutt) blir hastigheten

$$N_{RPM} = \frac{120f}{P},$$

der P er antall poler i stator og f er frekvensen til strømmen.

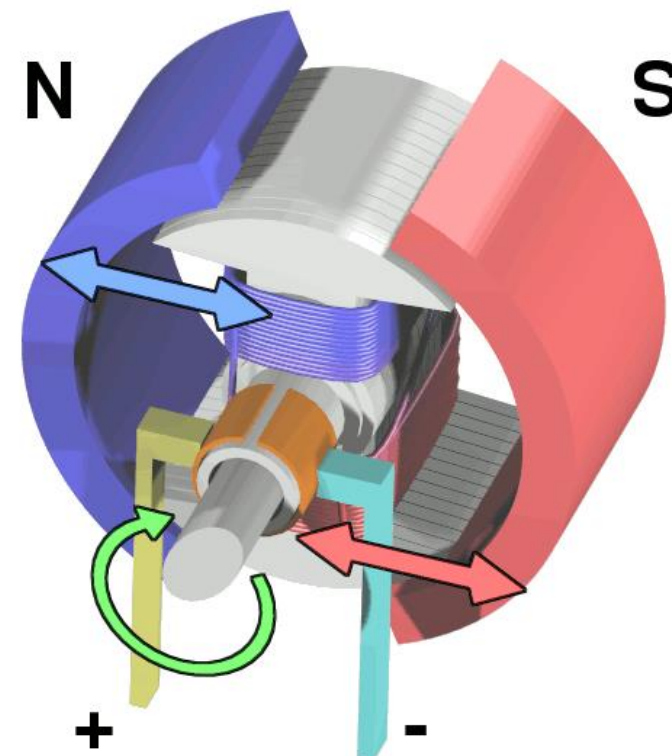
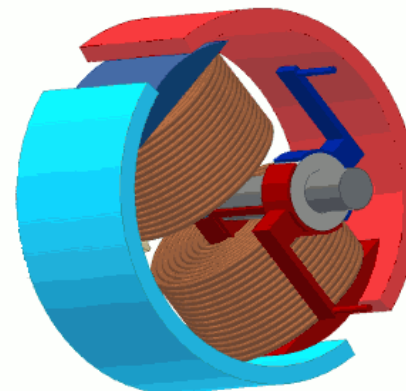
- Synkronmotorer er mer effektive enn asynkrone motorer, men også dyrere.
- En synkronmotor *kan* kombineres med et hamsterhjul
  - Starter lettere pga hamsterhjul
  - Synkronmotoren tar over når man nærmer seg asynkron-hastighet.
- Alternativt kan man bruke motoren sammen med en inverter for å starte langsomt.
- .



# Motorer

## DC Børstemotor

- **Kommuteres mekanisk** ved hjelp av et sett med «børster».
  - Børstene er gjerne en grafittkloss montert med fjær slik at det presser mot kobberet i akselen
- Mye brukt i lette billige produkter med begrenset levetid
  - Leketøy
  - Elektroverktøy
  - Vaskemaskiner
    - Om lag 5 års levetid på børster...



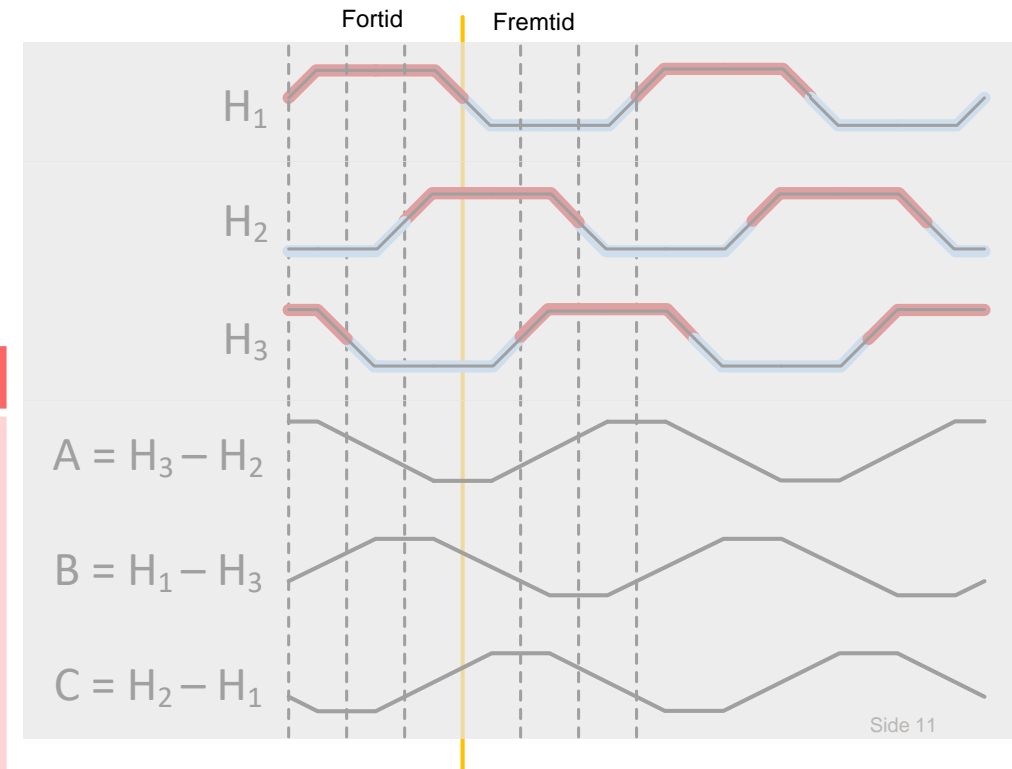
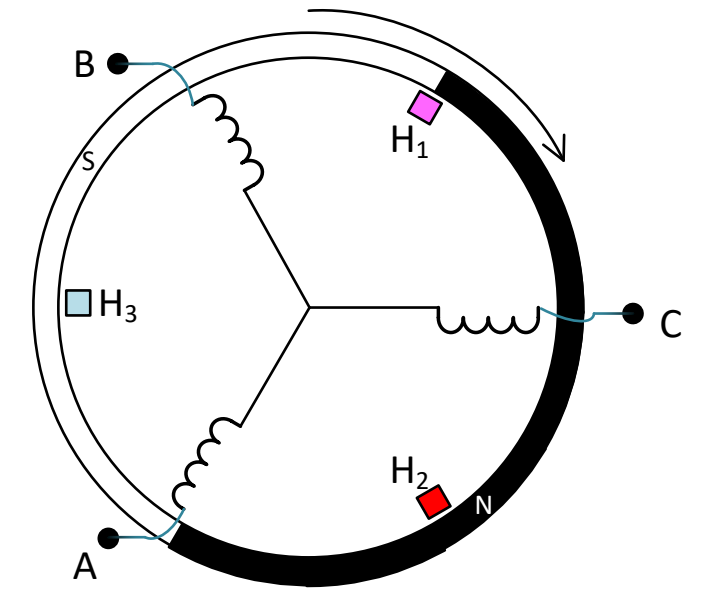
+	-
<p>Billige så lenge magnetene er små / svake</p> <p>Enkel konstruksjon, ikke behov for elektronikk</p>	<p>Børster</p> <p>Begrenset levetid på børster</p> <p>Gnister/ Elektromagnetisk støy (EMI) (EMI = <i>electromagnetic interference</i>)</p> <p>Hørbar støy pga mekanisk skraping</p> <p>Rotoren blir varm (luftkjøles)</p> <p>Stort sett bare lav-effekts motorer.</p>

# Motorer

## Børsteløse motorer (BLDC) – Kommutering og bruk

- Trenger en egen drivekrets (*inverter*) for å kommutere
  - Egne sensorer må benyttes for å vite posisjon
    - Magnetfeltsensorer (Hall-sensor) mye brukt
- Typisk bruk
  - Dyrere vaskemaskiner
  - Elektriske kjøretøy
    - Fly, biler, båter, motorsykler, sykler,...
  - Droner
  - Roboter

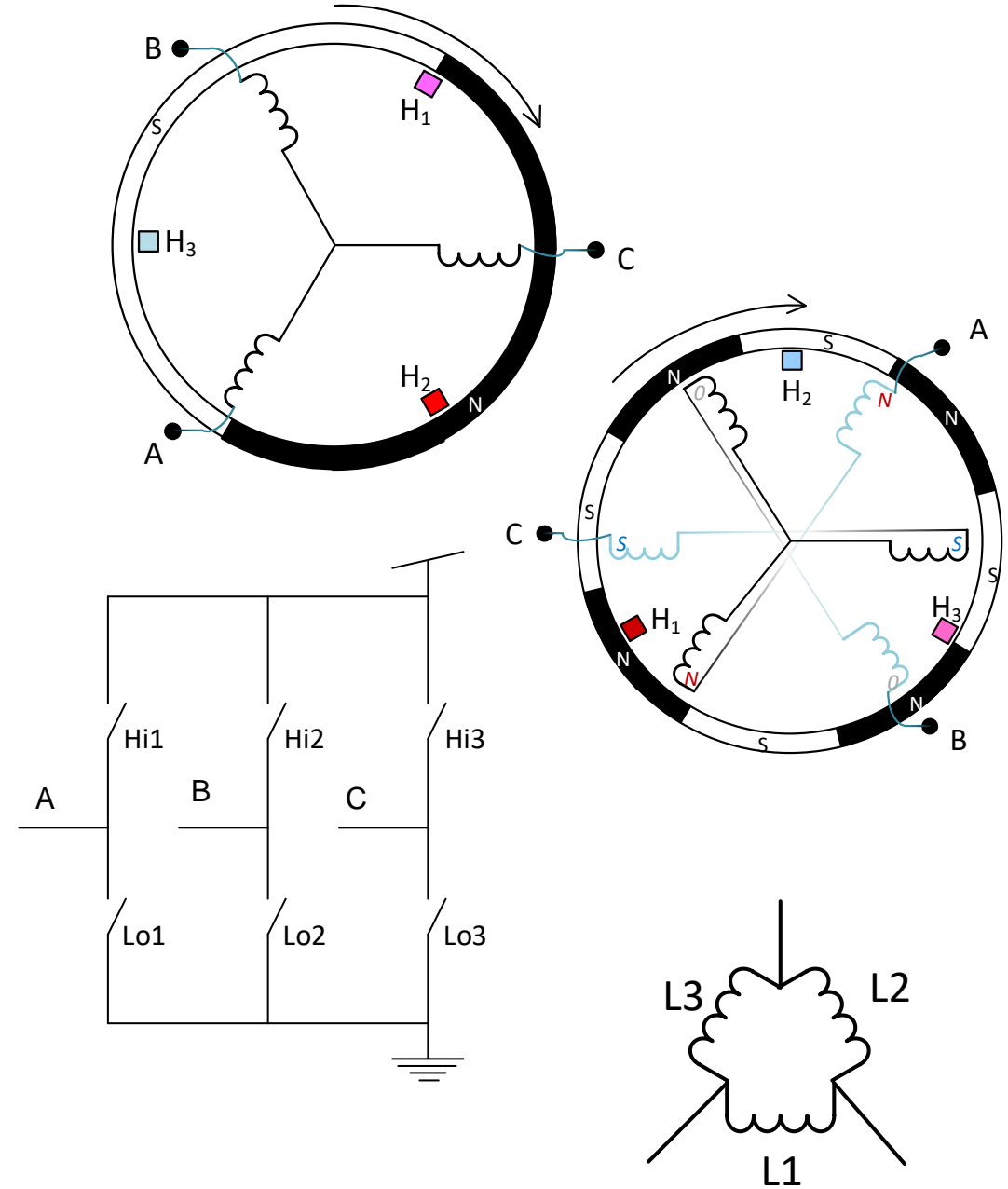
+	-
Lite mekanisk slitasje <i>Kun rotoren beveger seg</i>	Elektronisk kommutering koster mer enn mekanisk
Høy energieffektivitet	Kraftige permanentmagneter er dyre/sjeldne
Høy effekt i forhold til vekt ( <i>power to weight ratio</i> )	Magnetene svekkes over tid <i>Spesielt ved høy temperatur</i>
Lite støy (EMI og hørbart)	



# Motorer

## Børsteløse motorer (BLDC) – elektrisk konfigurasjon

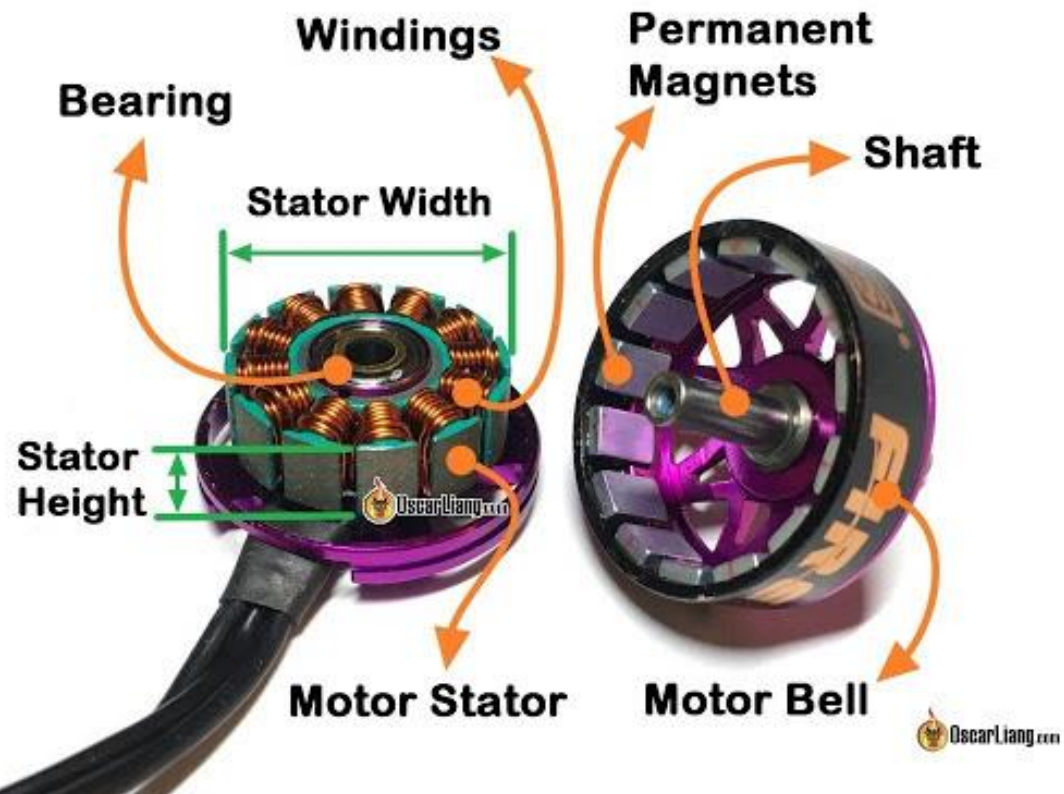
- 3-fase mest vanlig
  - Gjerne flere poler i rotor/stator (typ 6/4 eller mer)
  - 3 halvbroer el. brukes til å drive kretsen
  - *Kan være flere faser som f.eks 5, 7.*
- Y-kobling av spolene mest vanlig (som vist på figurene)
  - *Kan komme med sentertapp*
  - Deltakobling også vanlig
    - Tar mer strøm, men lavere spenning
    - *Pulser kan propagere i ring pga selvinduksjon.*



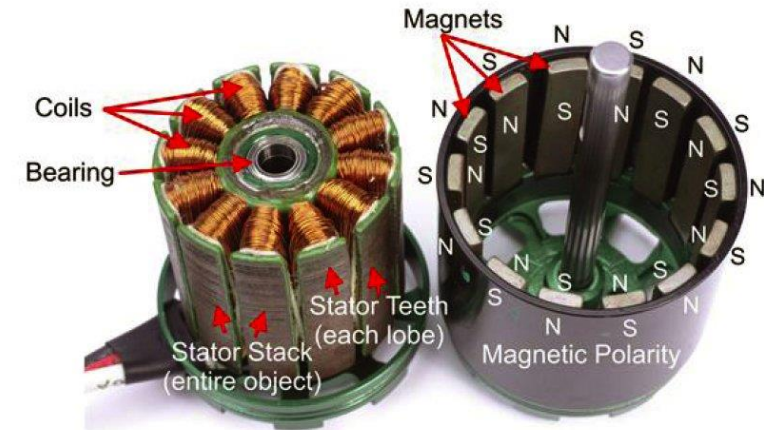


# Motorer

- Eksempel: Dronemotorer
- Laget for å være lette
  - Effekt/vekt > Virkningsgrad
  - Typisk hastighet omkring 300-1200 RPM.



## OUTRUNNER COMPONENTS



## A Typical 22XX Motor 14 Magnets



# Motorer

## Regneeksempel DC- motorer

En motor som kjører på 120V drar 12A i startøyeblikket. Ved normalhastighet trekker den 2A. Beregn

- a) Motstanden i spolen
- b) Indusert spenning (back EMF) i spolen ved normal hastighet
- c) Strømtrekket ved en belastning som gir halv hastighet.

Bruk den elektriske modellen neste side, og regn ut...

*Gjennomgang i regneøvelse...*



# Motorer

## DC-motor - Elektrisk modell

En motor er elektrisk ekvivalent med en spole med induktans  $L$ , motstand  $R$ , og indusert spenning  $V_{EMF}$  («back EMF»).

Spenningen over motoren kan uttrykkes som følger:

$$(1) \quad V = I \cdot R + L \cdot \frac{dI}{dt} + V_{EMF}$$

Er strømmen "konstant" (**steady state** AC) får vi

$$(2) \quad V = I \cdot R + V_{EMF}$$

Den induserte spenningen er proporsjonal med motorens vinkelhastighet  $\omega$  og gitt av

$$(3) \quad V_{EMF} = k_v \cdot \omega, \text{ der } k_v \text{ er en fysisk motorkonstant.}$$

For konstant strøm får vi:

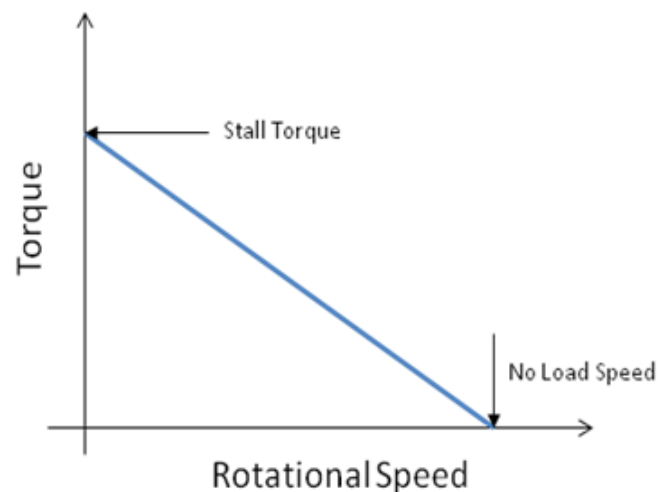
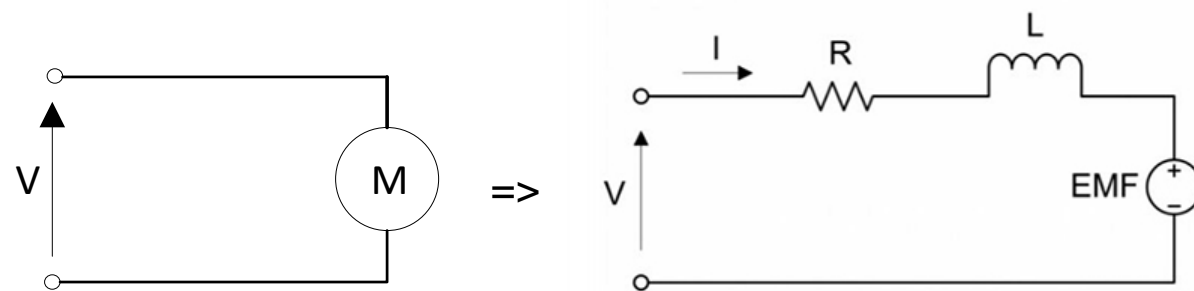
$$(4) \quad V = I \cdot R + k_v \cdot \omega$$

Dreiemomentet er proporsjonalt med strømmen (DC motorer):

$$(5) \quad \tau = k_T \cdot I$$

Løser vi (4) for  $I$  ( $I = \frac{V - \omega k_v}{R}$ ) og setter inn i (5), får vi

$$\tau = k_T (V - \omega \cdot k_v) / R$$



For null hastighet ( $\omega = 0$ ) får vi *maksimalt kraftmoment*:  $\tau = k_T V / R$  (stall torque).

Vi oppnår maksimal hastighet når kraftmomentet blir 0, dvs  $\tau = 0$ ,  $\tau = k_T (V - \omega \cdot k_v) / R \Rightarrow \omega = \frac{V}{k_v}$  (No load speed)

Da er  $V = \omega \cdot k_v$ , DVS  $V = V_{EMF}$

# Motorer

## Motorkonstanter

- Motor hastighets konstant  $K_v$  "Motor velocity constant"
  - $K_v = \frac{\omega_{no\_load}}{V_{peak}}$ , der  $V_{peak}$  er spenningen ved hastigheten uten last:  $\omega_{no\_load}$
- "Kraftmomentskonstanter"  $K_T$  Motor Torque constant
  - $K_T = 1/K_v$  (forutsatt at vi bruker SI enheter, ie Nm/A for  $K_T$  og  $\frac{rad/s}{V}$  for  $K_v$ )
  - $K_T = \frac{\tau}{I}$
- Motor konstant  $K_M$  (Motor størrelse konstant)
  - $K_M = \frac{K_T}{\sqrt{R}}$ , R er motorens motstand
- Motor constants – Wikipedia
- *Merk: Eksamen 2021 bruker verdien av  $K_T$  som  $K_v =$  kjent feil*



# Motorer

## Forkortelser

- PMAC, PMSM

- Permanent-magnet AC
- Permanent-magnet synkronmotor
- *Omtales gjerne også som BLDC (Brushless DC motor)*

- SYN-RM

- Synkron-reluktansmotor  
(*Synchronous reluctance motor*)
  - Magnetiserbart materiale i rotor, *ikke permanentmagnet*
  - Polantall et multiplum av 2.
  - Billigere å produsere enn BLDC
  - Vanskeligere å kontrollere.

- Inverter typer

- ESC:

- Elektronisk hastighetskontroll, *Electronic speed control*
    - Bruker kun motorstrøm/ spenning til kontroll
    - Ikke egnet for kontroll ved lave hastigheter (0-60RPM)
      - *Ikke egnet for robotarmer ol.*
    - Typisk brukt til droner / propellstyring

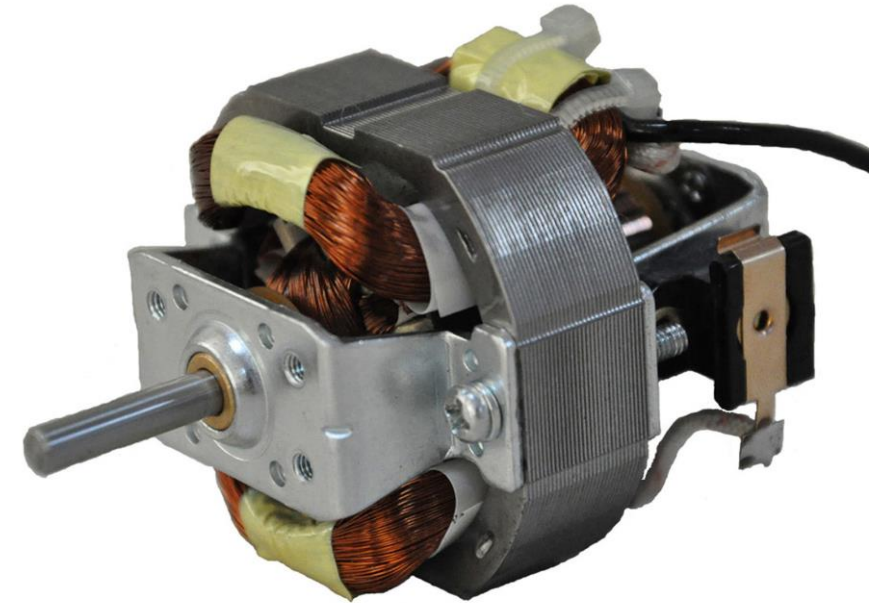
- VFD:

- *Variable Frequency Drive*
    - Kan brukes til BLDC, SYN-RM og induksjonsmotorer (*alle hastigheter*)
    - Mange varianter med ulike undergrupperinger:
      - *FOC: Field oriented control*
      - *DTC: Direct Torque control*
      - *MPC: Model Predictive control*

# Motorer

## Universalmotor

- Universalmotorer (<https://www.youtube.com/watch?v=0PDRJKz-mqE>) kan brukes både med DC og AC strømforsyning.
- Ved at både viklingene i rotor og stator får strøm fra samme strømkilde (vender på likt), så vil universalmotoren alltid gå i samme retning.
- Universalmotoren trenger børster, eller en roterende transformator.
  - Brukes i noen typer elektroverktøy ol.



# Motorer

## Steppermotor

- Ikke nødvendigvis et tydelig skille fra BLDC / SYN-RM
- Typisk
  - En kraftig permanentmagnet med tagger (neste slide)
  - Et multiplum av 4 poler
  - Brukes der presisjon (stegvis kontroll) er viktig
- Kan også være reluktansebasert
- Bruker gjerne mye strøm (lav effektivitet)

# Steppermotor

## Egenskaper

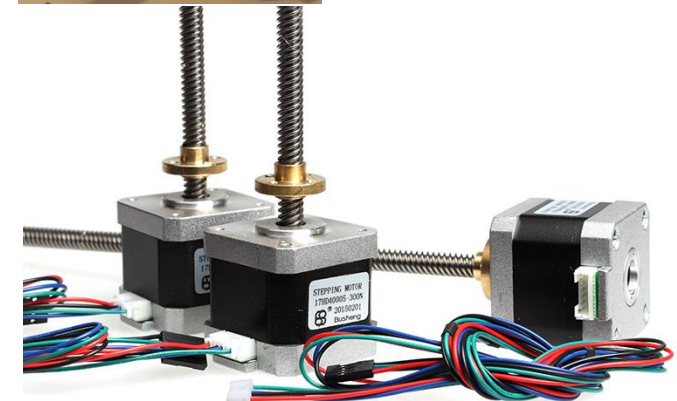
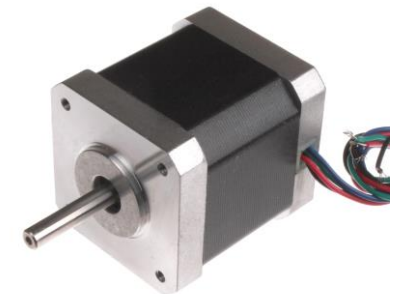
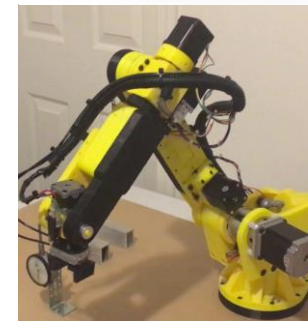
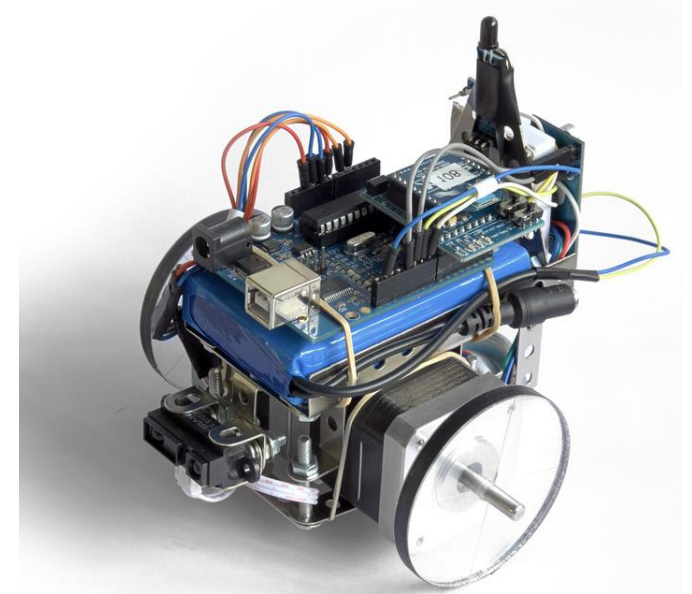
- Presis styring av akselvinkel *uten behov for avlesning/sensorer*
  - åpen sløyfe «open loop»
    - Aksel roterer inkrementelt en fast vinkel hver gang man sender en ny spenningskonfigurasjon til motoren
- Gir ofte et system med lav pris / enkel konstruksjon
- Høyt dreiemoment ved lave hastigheter, fullt dreiemoment ved stillstand (og høyest strømtrekk)

## Anvendelser

- Åpen sløyfe posisjoneringssystemer
  - Robot- armer, -kjøretøy, 3D printere, lysstyring, skannere, pumper

## Begrensinger

- Hvis belastning blir for stor kan de hoppe over stepp uten at systemet registrerer det.
- Lav hastighet, typisk <20 rpm
- Lav effekt





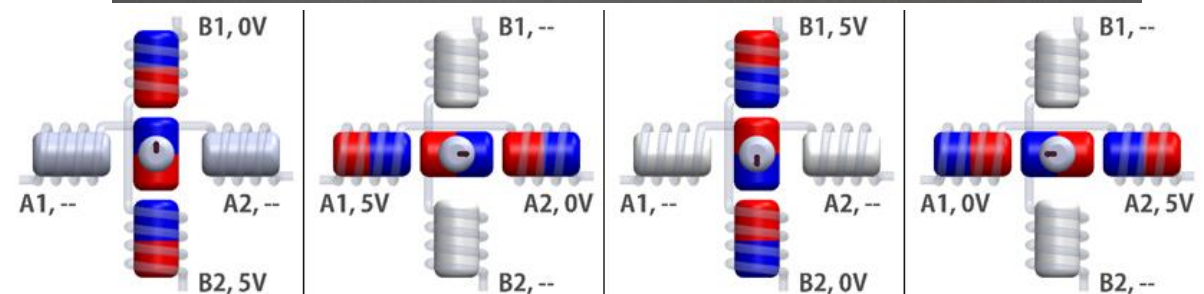
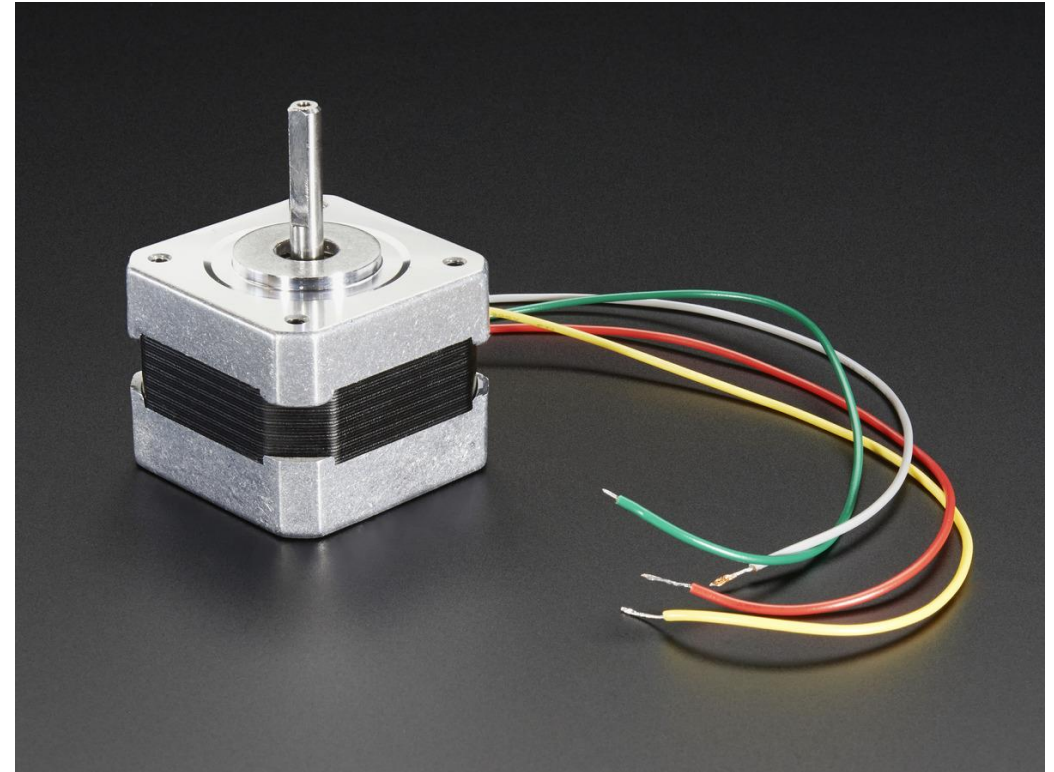
# ...Kommuttering av en steppermotor

**Kommuttering** er rekkefølgen man setter strøm på vindingene slik at motoren går som vi ønsker

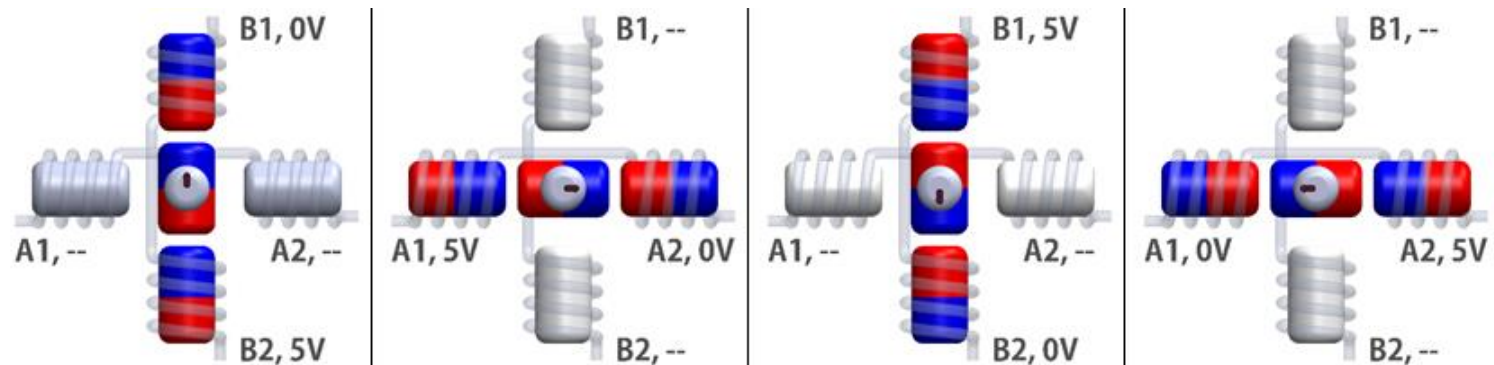
Vi ser på en stepper-motor med 4 faste spoler (stator) og en permanent magnet festet til den roterende akselen (rotor)

Spolene er koblet sammen i midten slik at motoren har totalt 4 ledninger ut

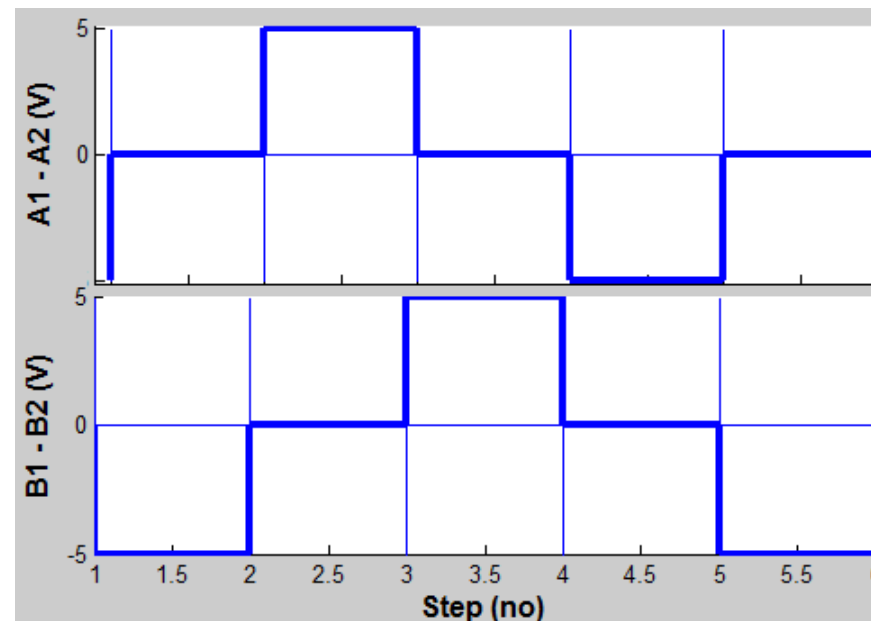
- De vertikale spolene er koblet i serie og ledningene ut har navn B1 og B2
- De horisontale spolene er koblet i serie og ledningene ut har navn A1 og A2
- Over hvert spolepar A og B kan man sette enten 5V, -5V eller koble løs (--), slik som illustrert i figuren
- Avhengig av spenning over spolene vil man få magneter med polaritet slik som illustrert med farger, og siden man i rotoren har en permanent magnet vil akselen stille seg inn slik som vist
- Spolene som er skrudd av vil ikke bidra med noe magnetisk felt



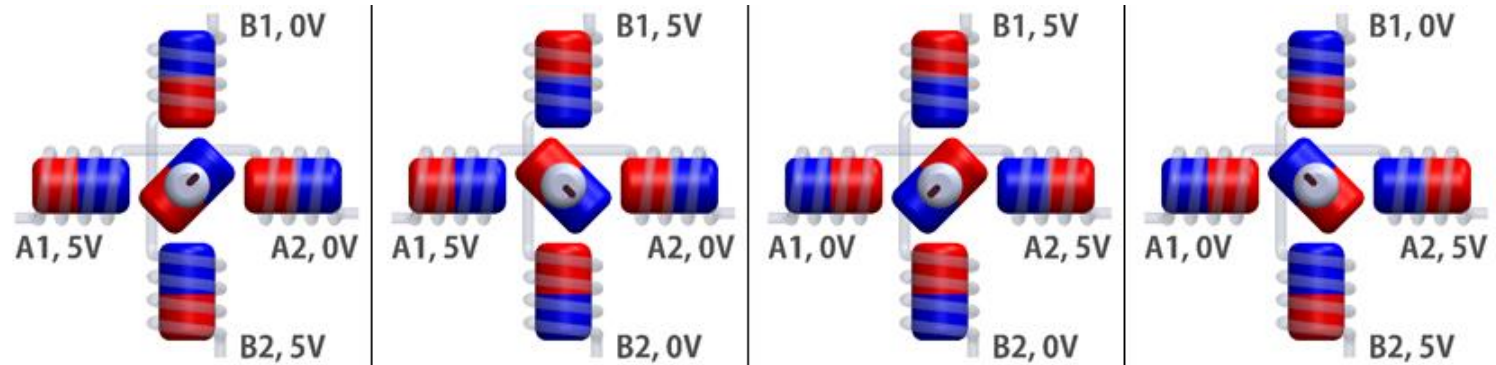
# «Wave commutation»



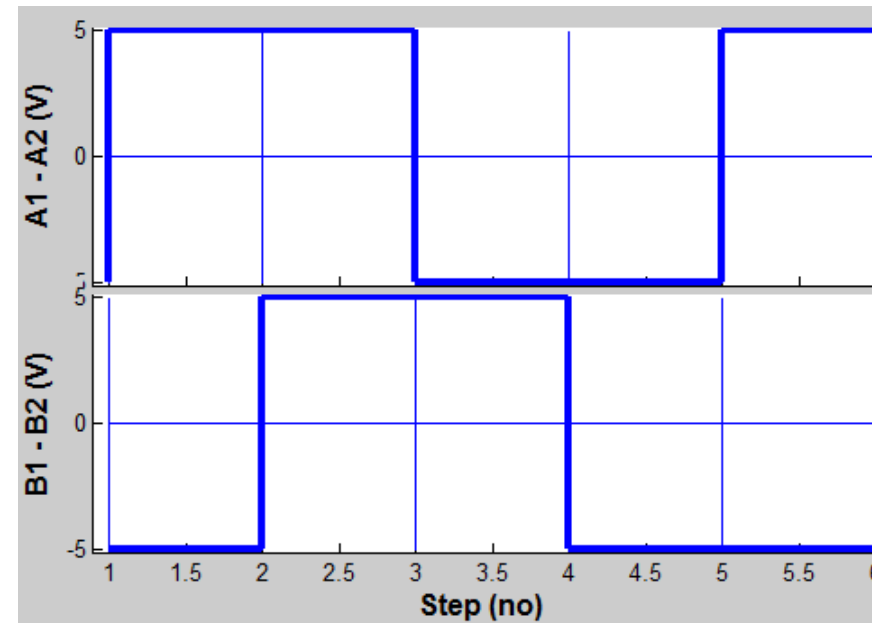
Kun ett spolepar er aktivt av gangen  
Gir 50% effekt bruk og lavt  
dreiemoment.  
Går "ett steg" av gangen.



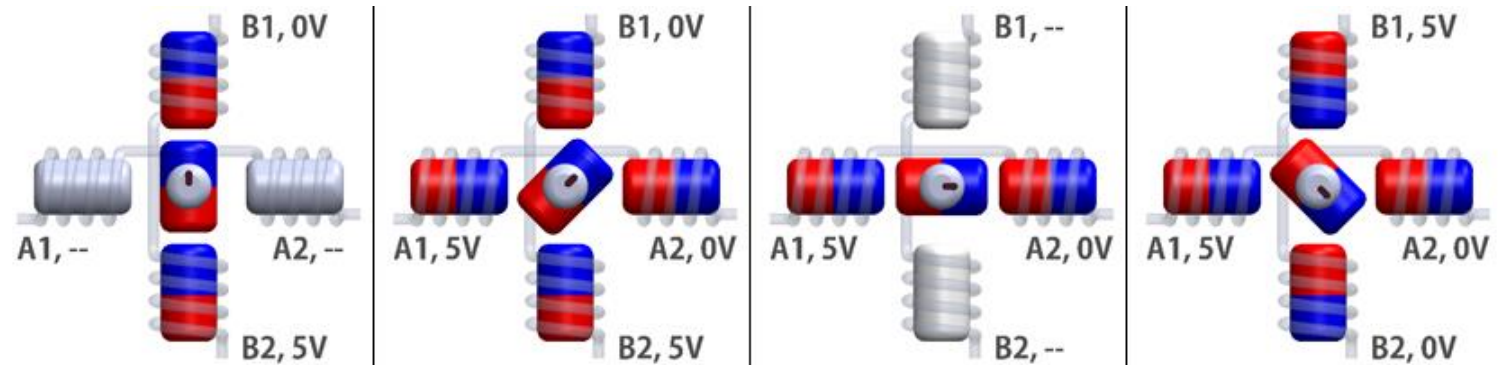
# Full steps kommutering (Full Step)



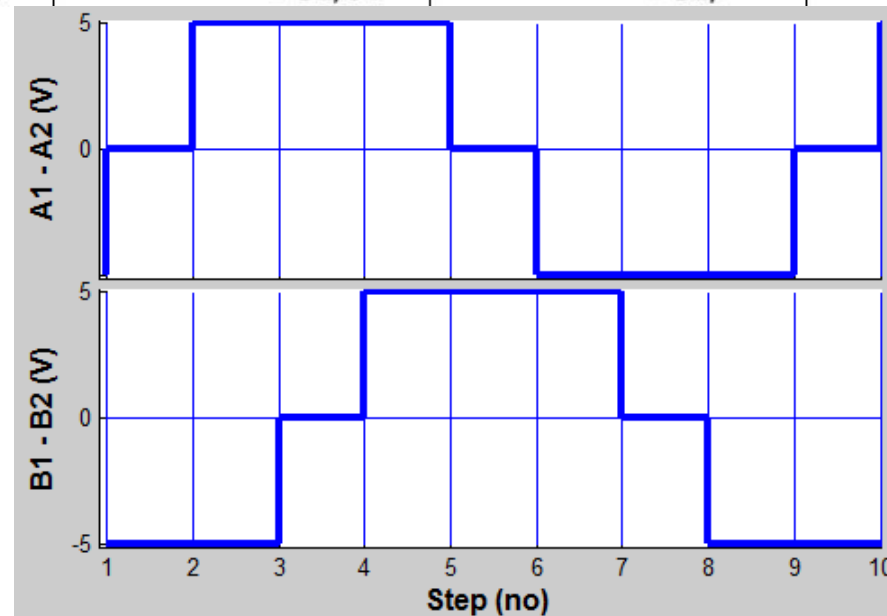
Bruker alle spoleparene samtidig  
Gir maksimal effekt og dreiemoment



# Halvstegskommutering «Half step commutation»



Kombinerer «full step» og «wave»  
Gir dobbelt så høy presisjon, men  
vekslende dreiemoment.





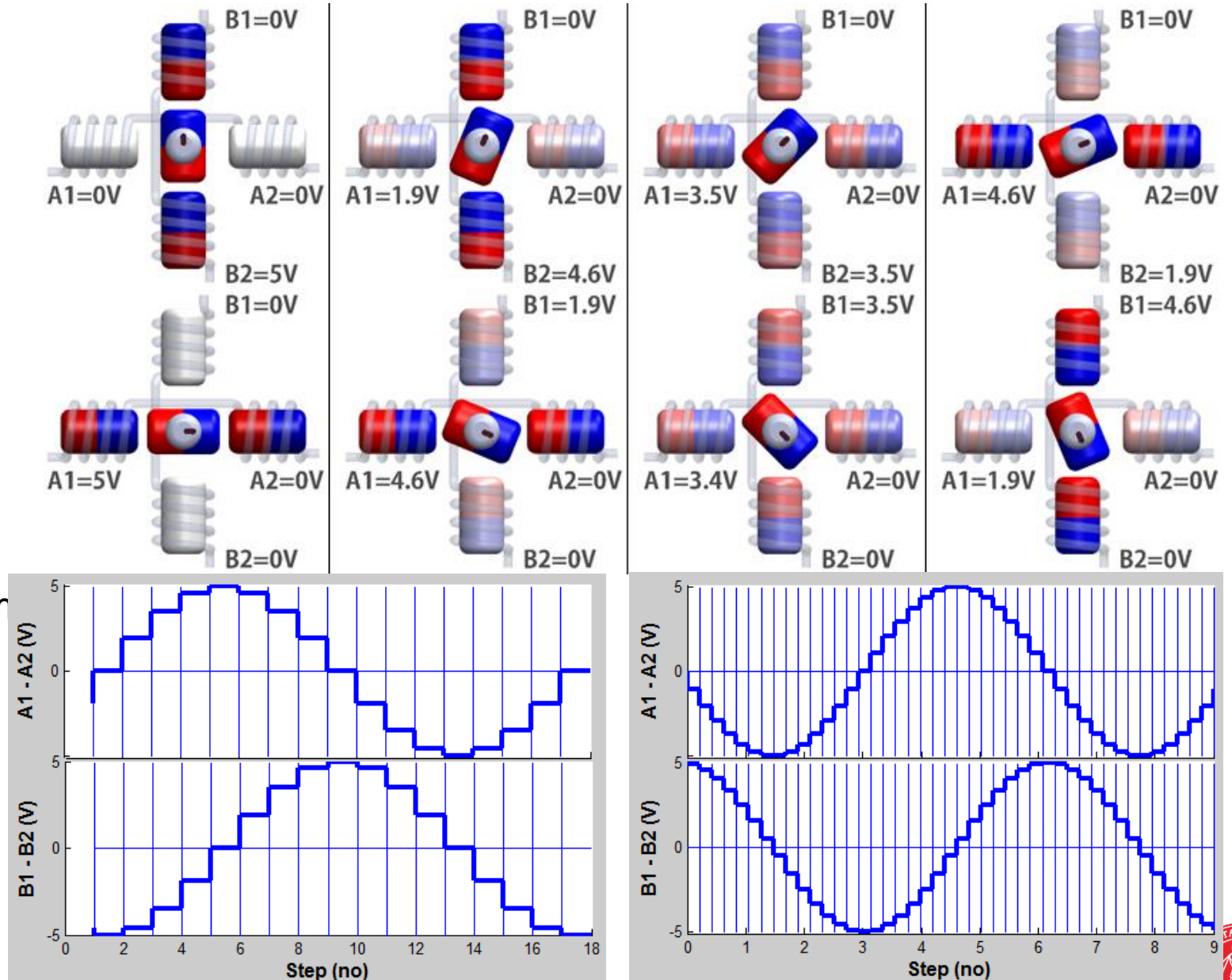
# Mikrostepping

Ved å bruke *pulsbredde-modulasjon* (PWM) for å gi analog spenning til spolene kan alle mulige kombinasjoner oppnås.

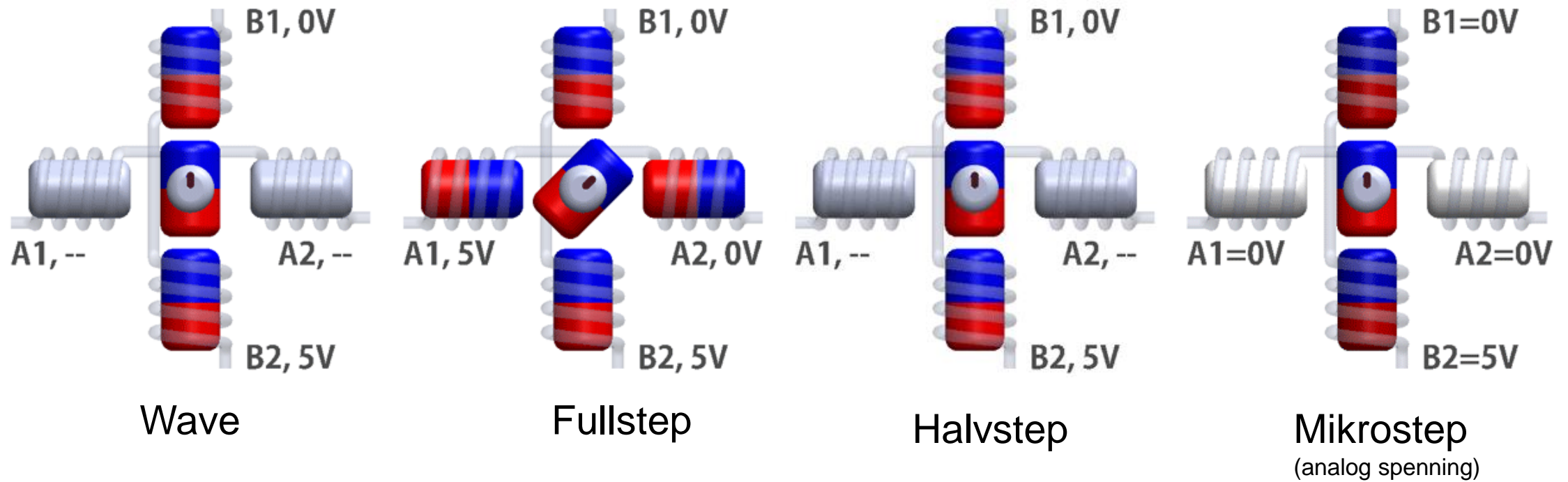
*Kan* gi konstant dreiemoment, men behøver ikke.

Dess finere oppløsning på pulsbreddemodulasjonen, dess nærmere blir signalet en sinus faseskiftet med 90 grader mellom inngangene.

Støyen og vibrasjonene fra steppermotoren avtar med dess finere mikrostep som brukes.



# Oversikt Kommutering (Gif-animasjon)



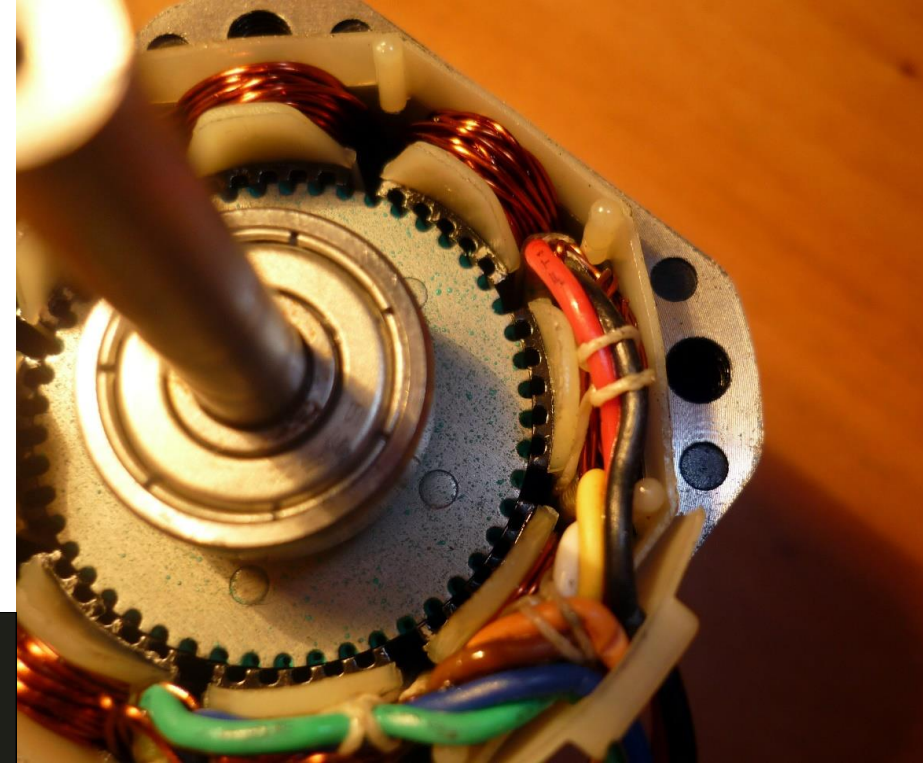
# Steppermotor i praksis

## «Hybrid Stepper motor»

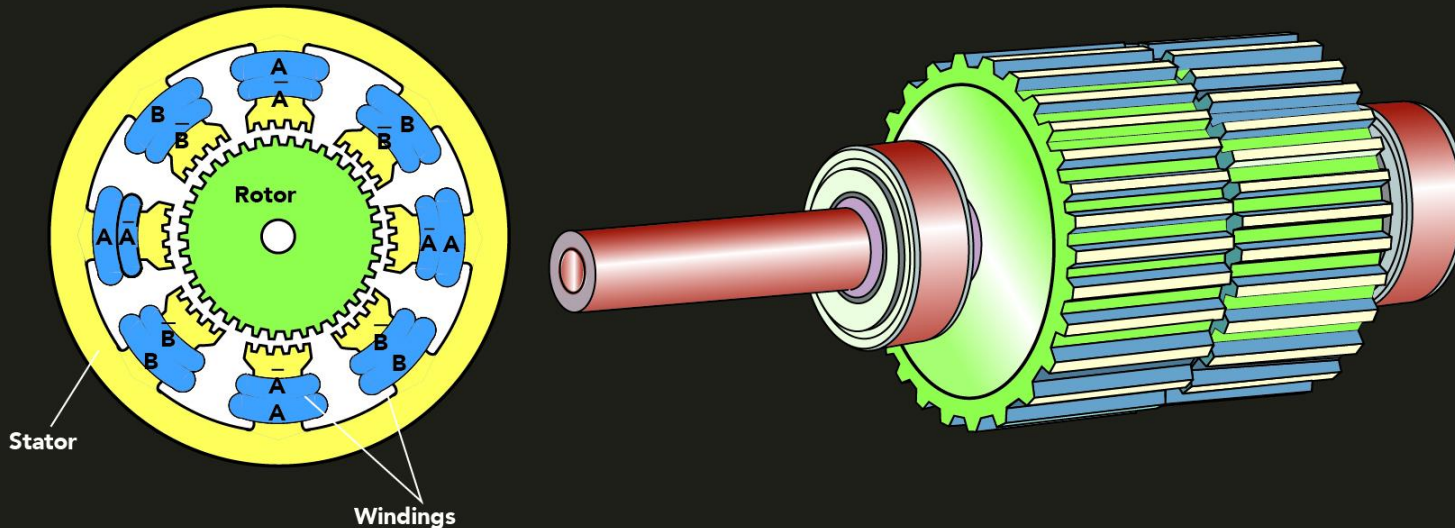
(«Hybrid» fordi den kombinerer prinsippet fra en reluktansmotor med bruk av permanentmagnet)

Fordi de magnetiske kreftene avtar svært fort med avstand ( $\propto r^{-4}$ ), så er rotor og stator utstyrt med tenner som muliggjør svært korte steg.

<https://www.youtube.com/watch?v=eyqwLiowZiU>



Stepper motor stator (with windings) and rotor (with two sets of teeth)



200 steg (400 «halvsteg»):  
50 tenner oppe (Nordpol),  
50 nede forskjøvet et halvt steg (Sørpol)  
4 spolepar  
N/S aktiveres samtidig som samme pol  
og motsatt av Ø/V,  
NØ/SV aktiveres samtidig som samme  
pol og motsatt av NV/SØ  
For hver spole forskyves tennene med  
 $\frac{1}{4}$ , slik at motsatte sider er i fase/på linje.

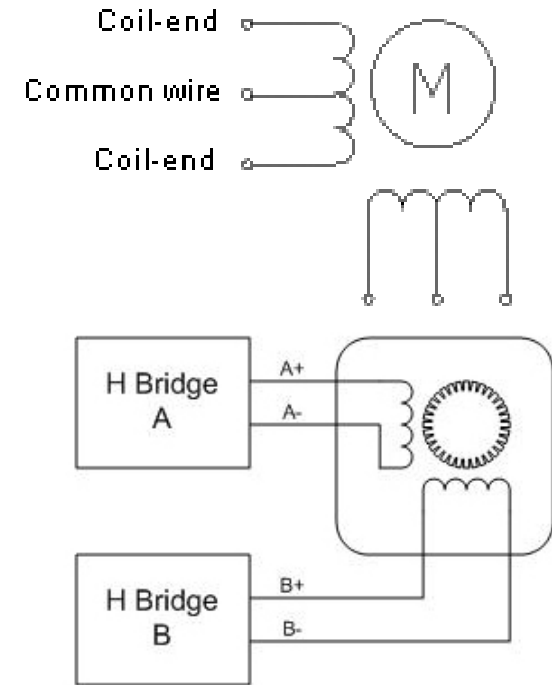


# Steppermotor - Oppkobling

To hovedtyper aktivering:

- Unipolar:

- Strømmen drives kun i en retning gjennom hver spole
- Krever spoler med *senter-tapp* (eller to overlappende spoler)
- Enklere å forholde seg til
  - F.eks kan man koble VDD til fellesledningen "*Common wire*" og bruke en transistor per øvrig inngang for å trekke mot jord
- Utnytter bare halve dreiemomentet
  - halvparten av spolene av gangen-
  - medmindre man velger å bruke den bipolar...

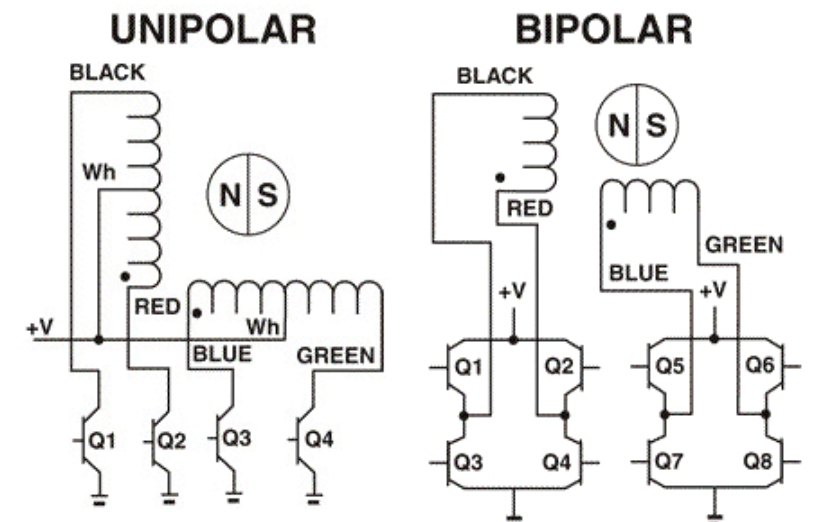


- Bipolar

- Strømmen drives i begge retninger gjennom spolene.
- Krever to H-bruer eller tilsvarende for å drive strømmen i to retninger gjennom spolene.

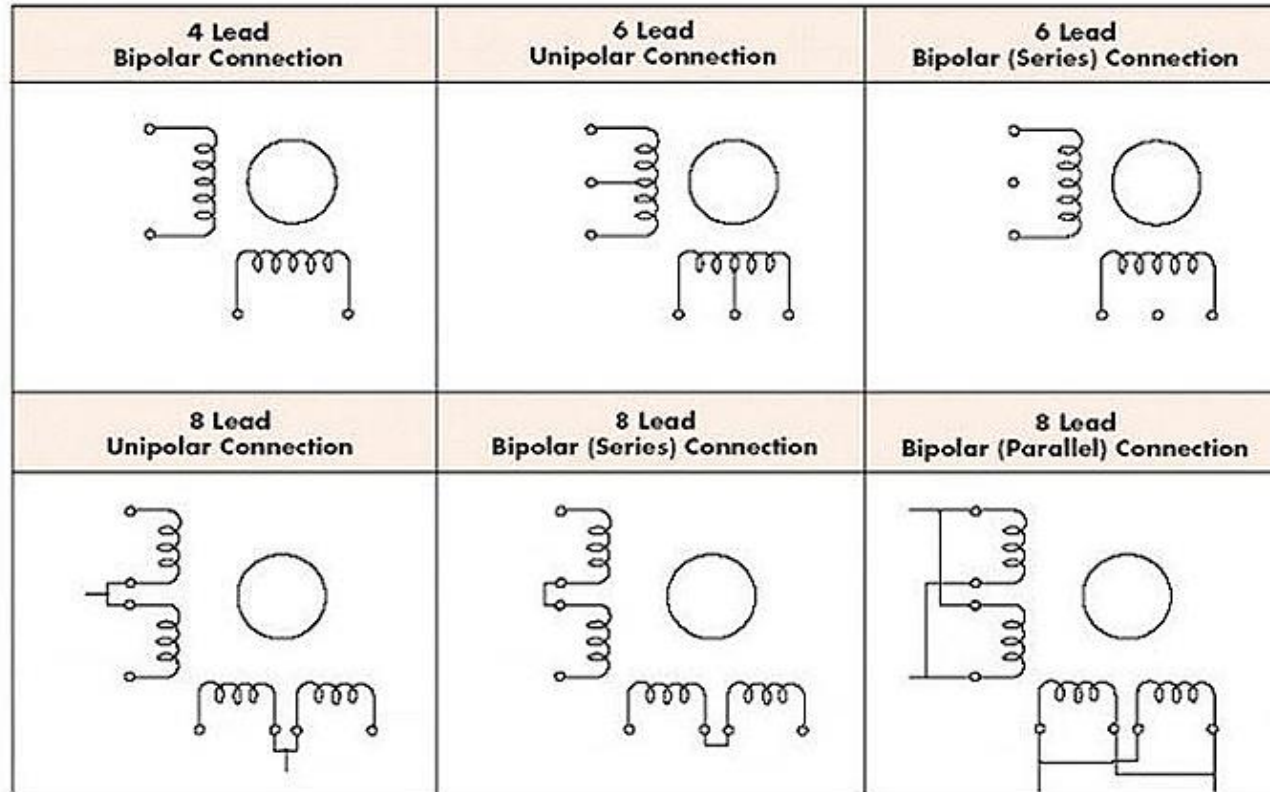
- Eksempel med driverkretser:

- Unipolar: Kun fire transistorer på lav side
- Bipolar: Bruker 2 H-bruer



# Flere oppkoblingsvarianter...

Wire Connection Diagrams



8 lead connection:

(hver ende av hver spole i et unipolart system er tilgjengelig)

- kan kjøres bipolart drive spolene parallelt eller i serie for å tilpasse impedansen til systemet.

Hvordan identifiserer vi hvordan hver ledning er koblet (hvis spesifikasjon mangler) ?

1. Ohme
  - for å finne spolepar
2. Teste med strøm på to og to spoler av gangen
  - Vurder bevegelsesretning og når de styrker/svekker hverandre



# Motorer

## Oppsummering elektromotorer (hovedtyper)

### • Induksjonsmotor («AC motor»)

- Kan bruke vekselstrøm direkte
- + Bruker ikke permanentmagneter
  - Billige
  - Pålitelige
- Stor startstrøm
- Slip..
- Tunge
  
- «OK» Virkningsgrad
  
- Brukes mye i industrien, og faste installasjoner
  - Pumper, vifter, kjøleskap, osv.
- Elektroverktøy med ledning
- Noen elbiler

### • DC motor

- Bruker likestrøm
  - Må kommuteres (strømstyring)
- Bruker ofte permanentmagneter
  - Lettere
  - Dyrere enn AC motorer
- + Kan lages svært effektive
  
- Brukes i økende grad
  - Batteriverktøy
  - Elkjøretøy generelt
    - Biler, sykler, motorsykler, fly
  - Roboter
  - Leketøy

### • Steppermotorer

- Bruker likestrøm (en form for DC motor)
  - Krever kommutering
- Bruker gjerne permanentmagneter
  - Tunge
  - Dyrere enn vanlige DC motorer
- Lite effektive
- Stor presisjon i hastighet og posisjon
  
- Brukes der presisjon er viktig
  - Skrivere
  - 3D-skrivere
  - Roboter

# Motorer

## Lesestoff og regneoppgaver

- Lese:
  - COK:
    - 22.1-22.6 DC motorer
    - 25.1-5, 7 Brushless DC (BLDC) motorer
    - 26.1-26.9 Steppermotorer
- Oppgaver:
  - COK:
    - **22. 1, 3, 6, 8, 9, 10**
    - 25. 1, 3, 6, 9, 10