

**IN1080**

**FORELESNING 11**

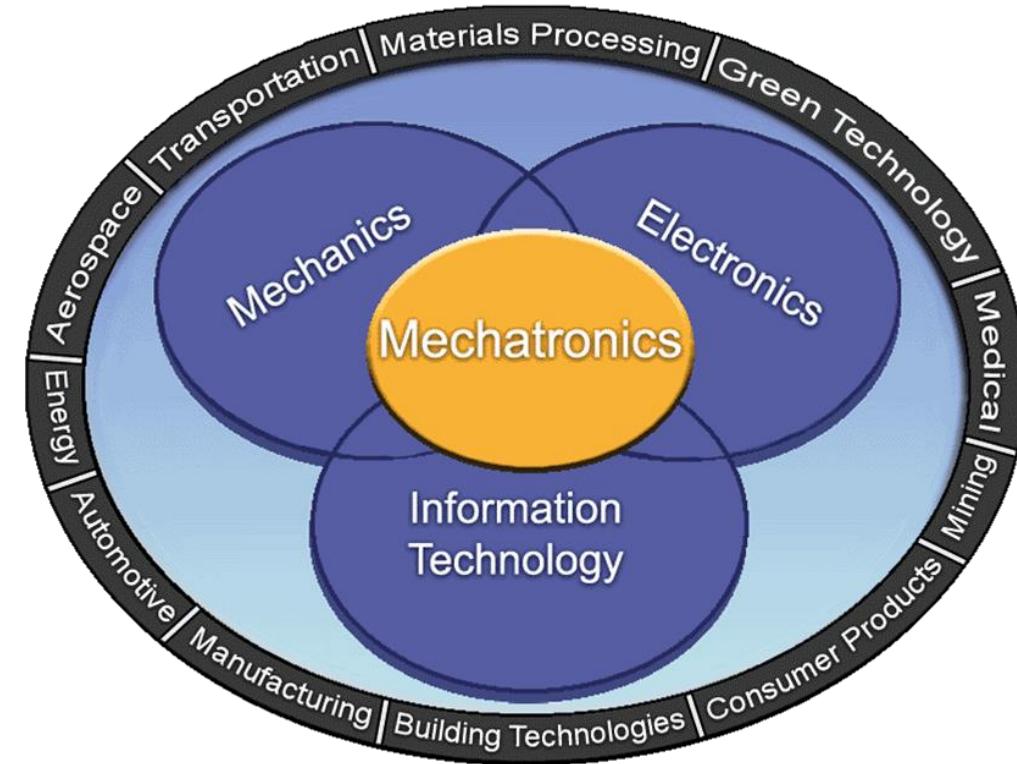
**Yngve Hafting**



# OVERSIKT

## Fokus i denne forelesningen: Aktuatorer

- Kraft/dreiemoment
- Induksjon
- AC motor /
  - Induksjonsmotorer
  - Synkronmotor
- DC motor
  - Børstemotor
  - Børsteløs motor (BLDC)
  - Stepper motor
  - Fullstepp, halvstepp, mikrostep



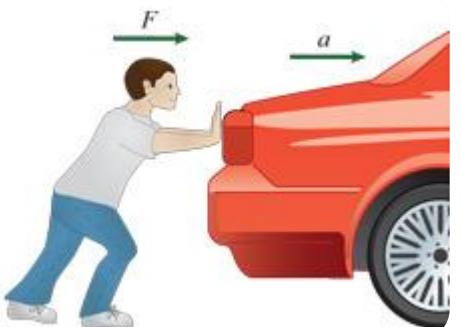
M.H

# KRAFT

Symbol : F  
(force)

Enhet : N  
(Newton)

$1N = 1\text{kgm/s}^2$   
En kraft på 1N  
vil gi et  
legeme på 1kg  
en  
akselerasjon  
på  $1\text{m/s}^2$



En kraft er en  
påvirkning som – hvis  
den ikke utlignes - vil  
forandre hastigheten  
til objektet den virker  
på.

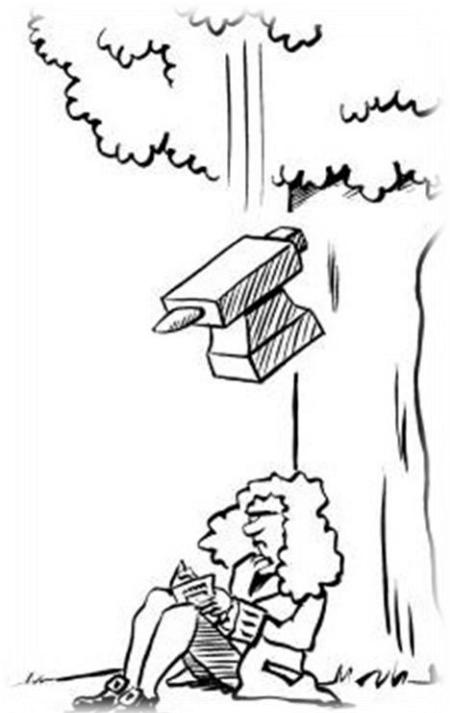
Newton's lover:

1: Et legeme som ikke er utsatt for  
krefter vil stå stille eller bevege seg  
med konstant fart i rett linje

2: Endringen av hastighet til et  
legeme i bevegelse er  
proporsjonal med og i samme  
retning som summen av krefter  
som virker på legemet.

$$\sum F = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (F = m \cdot a)$$

3: Hvis et legeme påvirker et annet  
legeme med en kraft F, så vil det  
andre legemet påvirke det første  
legemet med en kraft F' som er like  
stor som F, men motsatt rettet. «Kraft  
er lik motkraft»



Tyngdeakselerasjonen  
ved havoverflaten (g),  
er på  
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
Tyngdekraften (G) for  
et legeme på 1kg blir  
 $G = mg$   
 $= 1\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2$   
 $= 9,81\text{N}$

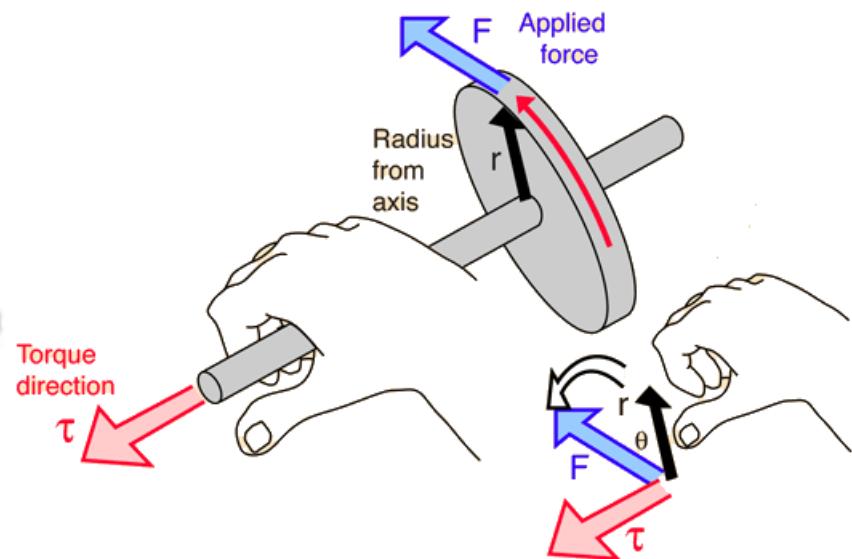
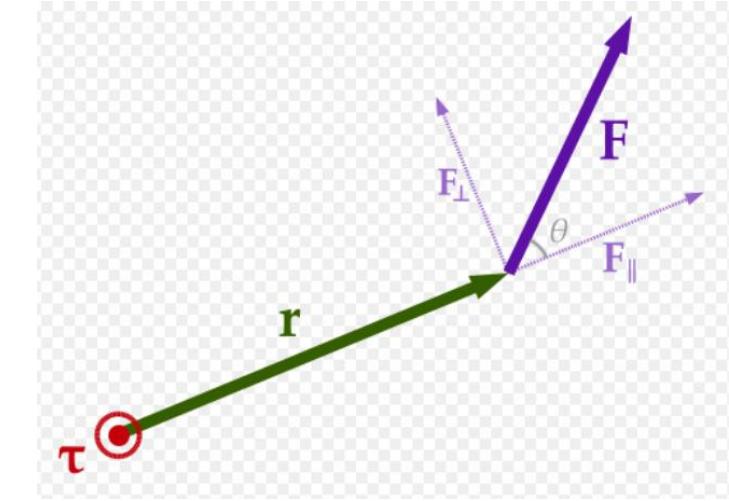
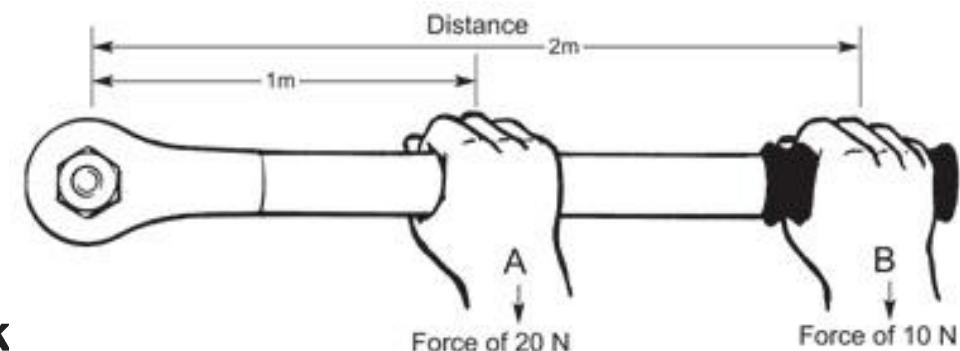
Symbol :  $\tau$   
(Gresk  
Tau  
«torque»)

Enhet :  
Nm  
(Newton-  
meter)

$1\text{Nm} = 1\text{kgm}^2/\text{s}^2$   
Et dreiemoment på  $1\text{Nm}$  vil gi et legeme med treghetsmoment  $I$  på  $1\text{kgm}^2$  en vinkelakselerasjon ( $\alpha$ ) på  $1/\text{s}^2$

# KRAFTMOMENT (dreiemoment)

- Dreiemoment (torque) er en krafts evne til å forandre et legemes rotasjon. Dreiemoment  $\tau$  (tau) beregnes med kryssproduktet av avstanden ( $r$ ) til legemets rotasjonspunkt og kraftvektoren ( $F$ ).
$$\tau = r \times F$$
- Retningen til kryssproduktet er gitt ved høyrehåndsregelen, dvs. 90 grader på både radius og kraftvektor.  
( $\tau$ -tommel,  $r$ -håndflate,  $F$ -fingre).
- Størrelsen på kraftmomentet blir
$$\tau = r \cdot F \sin(\theta)$$
 eller  $\tau = r \cdot F_{\perp}$   
I svært mange praktiske sammenhenger så er  $F$  alltid normalt på  $r$ , og da får vi
$$\tau = r \cdot F$$
 (kraft · arm)



# INDUKSJON

Vi kjører en metallstang nedover skinner i et homogent magnetfelt laget av en spole som vist på figuren.

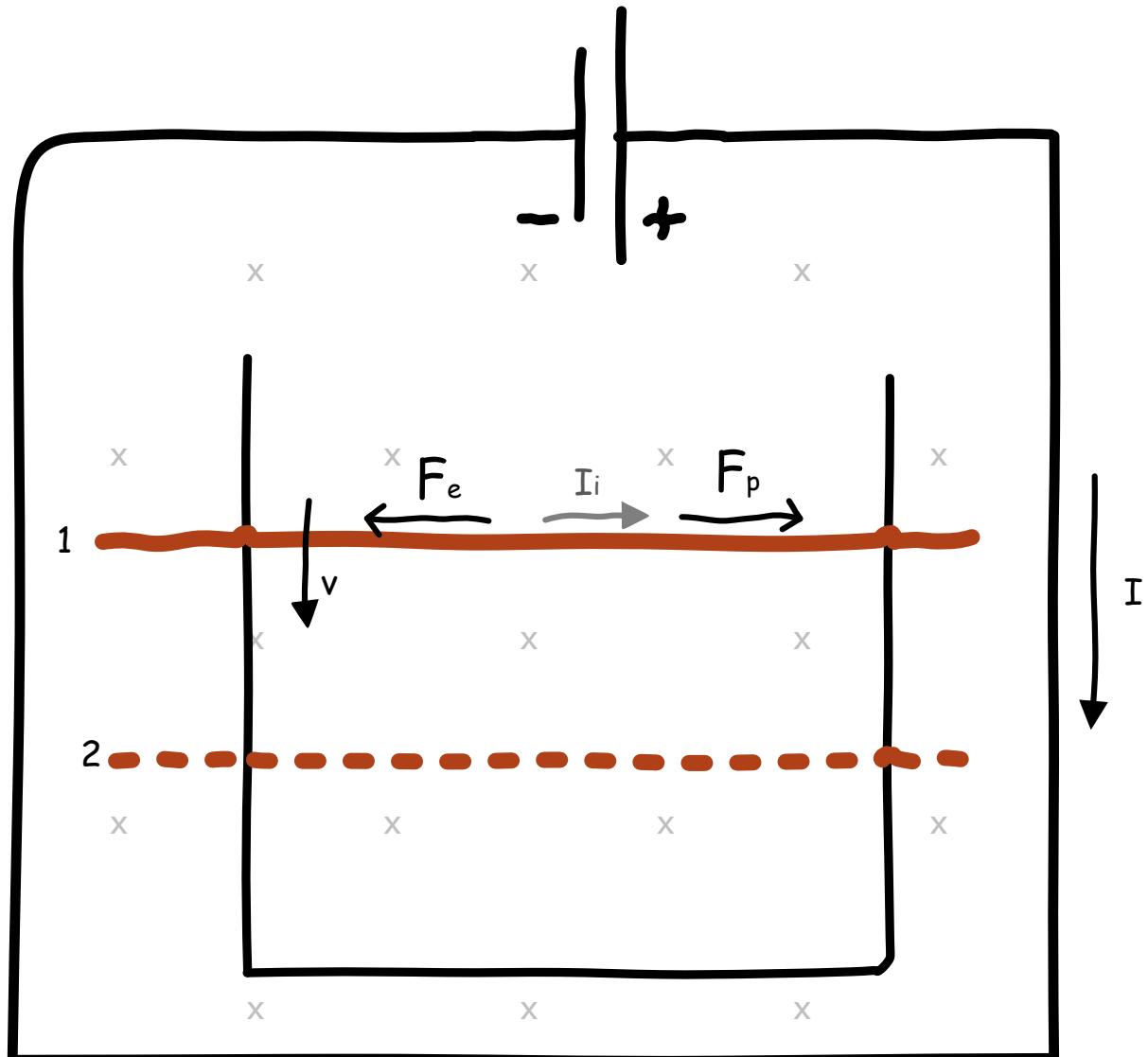
I metallstangen blir det indusert et strøm fordi ladningene i stangen ser flere elektroner i den delen av spolen der elektronene går oppover enn der de går ned. Dette fenomenet kan forklares med relativistisk lengdekontraksjon (Lorentz transformasjon).

Elektronene i den induserte strømmen vil, når de har fart sidelengs, se flere elektroner i bunn av spolen enn toppen, og følgelig trekke stangen oppover (bremse den). Slik sett virker induksjonsstrømmen alltid mot sitt opphav (Lenz lov).

Retningen på magnetfelt (her markert med x) er definert til å følge høyrehåndsregelen, og dermed gjør den magnetiske kraften også det

$$\mathbf{F}_q = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad \mathbf{F}_I = \mathbf{I}_i l \times \mathbf{B}$$

Om vi bruker en spole eller en permanentmagnet som kilde til magnetfelt er likegyldig.



# ELEKTROMOTOR PRINSIPP

(ikke homopolar)

En elektromotor består i hovedsak av to deler

1. **Rotor** (delen som roterer)

- a. består av en eller flere magneter og eller noe magnetiserbart.
- b. Rotoren kan være innvendig «inrunner» eller utvendig «outrunner»
  - i. Innvendig rotasjon er best for høy hastighet og lavt dreiemoment
  - ii. Utvendig rotasjon er best for lavere hastighet og høyt dreiemoment

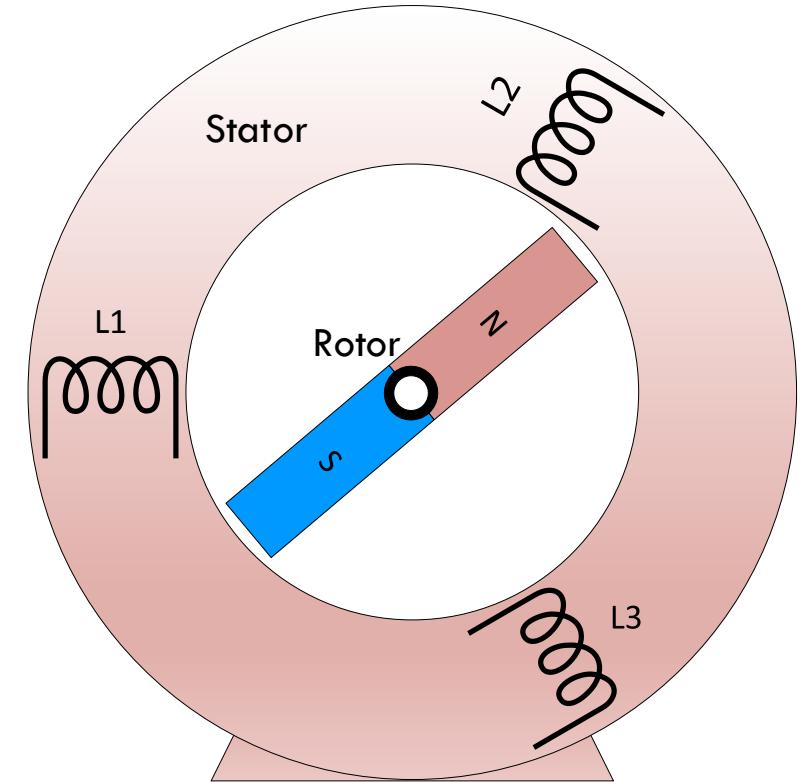
2. **Statoren** er den delen som står stille,

- a. består typisk av et antall elektromagneter i ring rundt aksen (kan også være permanentmagnet dersom rotoren er en elektromagnet).

Enten rotoren eller statoren består av elektromagneter som kan lage et varierende (roterende) magnetfelt som får rotoren i bevegelse.

Magnetfelt er proporsjonalt med strømmen i en spole.

Oppbygningen til rotor og stator og hvordan motoren kommuterer (dirigerer strømmen) avgjør hva slags navn og type motor vi snakker om.



# ELEKTROMOTOR - ELEKTRISK MODELL

Forsyningsspenningen over motoren kan approksimeres ved

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

der  $I$  er strømmen inn,  $R$  er resistansen i spolen(e),  $L$  er induktansen i spolen(e), og  $V_{EMF}$  er indusert spenning (ems, «back EMF») i spolen(e)

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

$$(3) \quad V_{EMF} = k \cdot \omega,$$

der  $k$  er en fysisk motorkonstant. For konstant strøm får vi:

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

Dreiemomentet er proporsjonalt med strømmen (DC motorer):

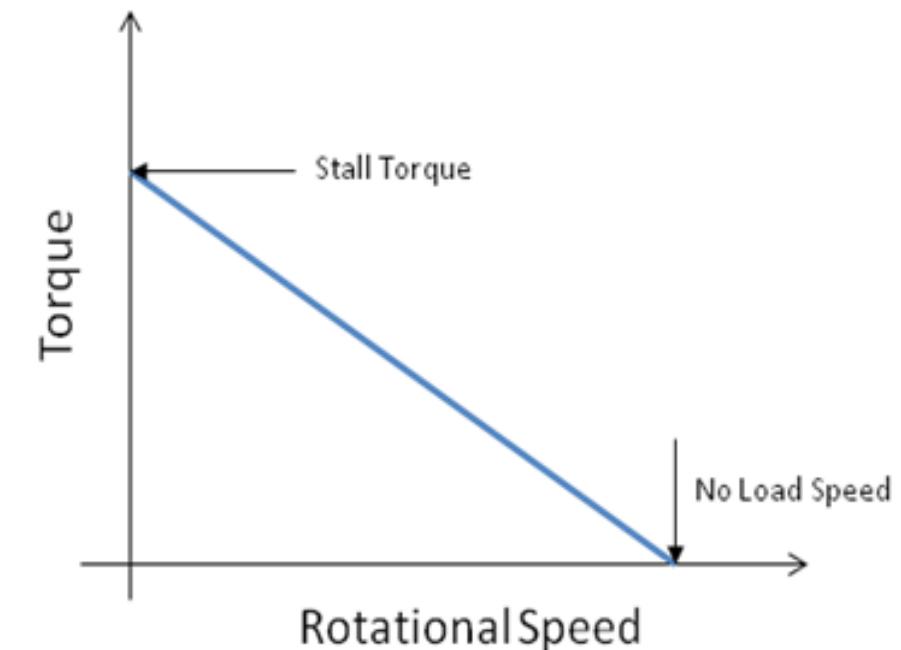
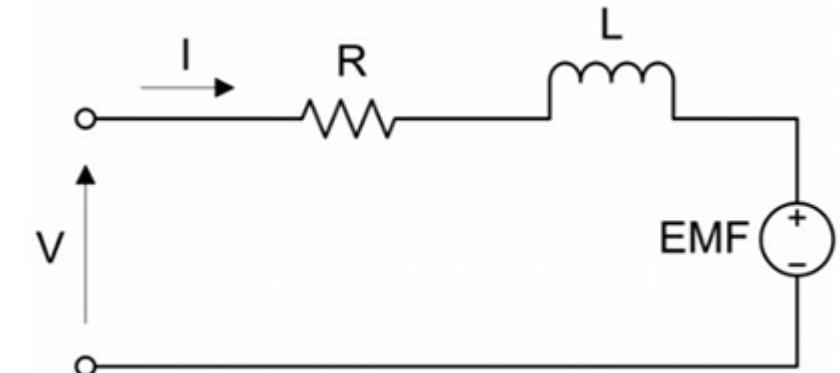
$$(5) \quad \tau = k \cdot I$$

Løser vi (4) for  $I$  og setter inn i (5), får vi

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

Vi ser at motoren får null dreiemoment når  $V = \omega \cdot k$ ,

DVS  $V = V_{EMF}$  og maksimal vinkelhastighet  $\omega = V/k$  (se figur)



# ELEKTROMOTORER (oversikt)

Homopolar  
(ren  
likestrøm)

Ingen  
kommuterering  
Lite effektiv  
Krever sterke  
magneter

Typisk bruk:  
demonstrasjoner  
(<https://www.youtube.com/watch?v=LcyqJWvZioM>).

(I praksis ikke i  
bruk i noen  
applikasjon  
ellers.)

AC motor  
(vekselstrøm  
inn)

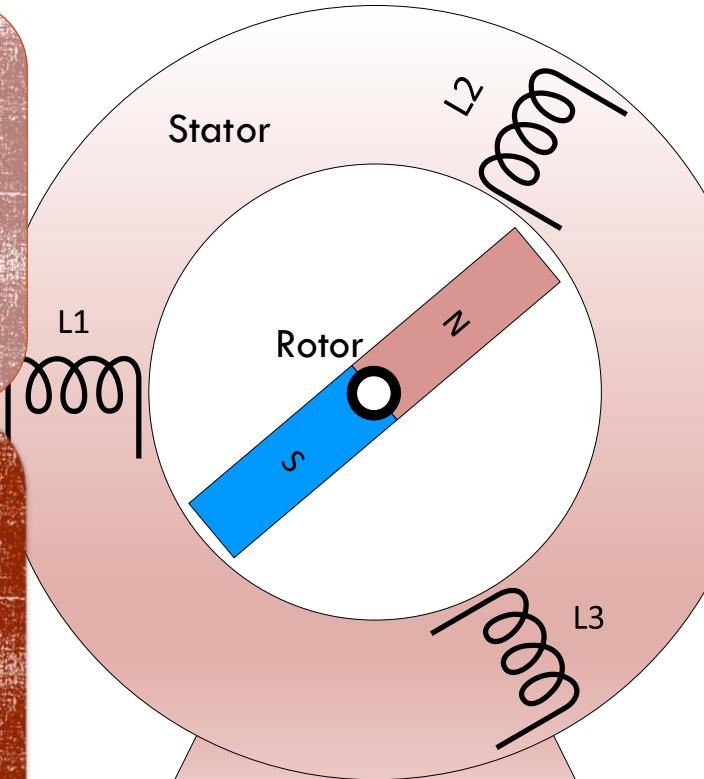
- Ofte billige
- Stor startstrøm (!)
- Frekvensavhengig  
rotasjon  
/fast hastighet

Brukes til svært mye:  
Oppvaskmaskiner,  
elbiler, industri, etc.

DC motor  
(likestrøm inn)

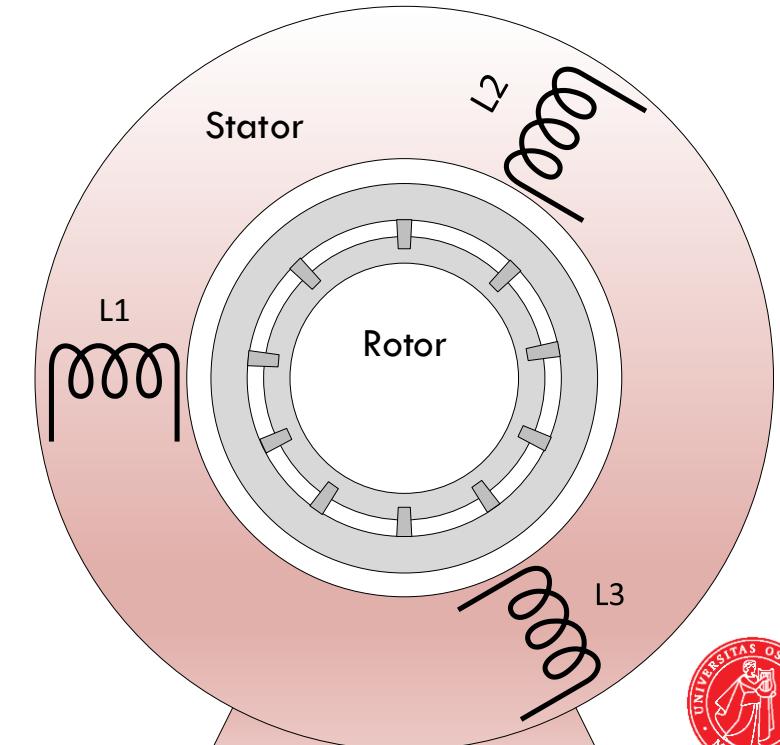
- Må kommutere for å få  
til rotasjon, trenger  
gjerne egne sensorer  
for dette.
- Bruker typisk  
permanent-magneter  
(dyrere, lettere).

Bruktes i økende grad:  
Batteriverktøy,  
motorsykler, elbiler,  
leketoys etc.



# AC - ASYNKRON MOTOR (INDUKSJONSMOTOR)

- Induserer strøm i rotor ved hjelp av magnetfelt til stator
- Rotor består typisk av et hamsterhjul «squirrel cage»  
[https://www.youtube.com/watch?v=AOqyGNOP\\_3o](https://www.youtube.com/watch?v=AOqyGNOP_3o)
- Billig konstruksjon- trenger ikke permanentmagneter eller sensorer.
- Trekker mye strøm ved start!
- Hastigheten til rotor blir noe lavere enn synkronhastighet (magnetfeltets rotasjon)  
$$\text{slip} = \frac{n_{\text{stator}} - n_{\text{rotor}}}{n_{\text{stator}}}$$
- 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 endres ved å variere frekvensen på strømkilden. For å gjøre det må man typisk ha en inverter.



Synkronmotorer har typisk

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

I synkronmotorer er hastigheten til rotor lik hastigheten til magnetfeltet. Hastigheten er gitt i runder per minutt, ved

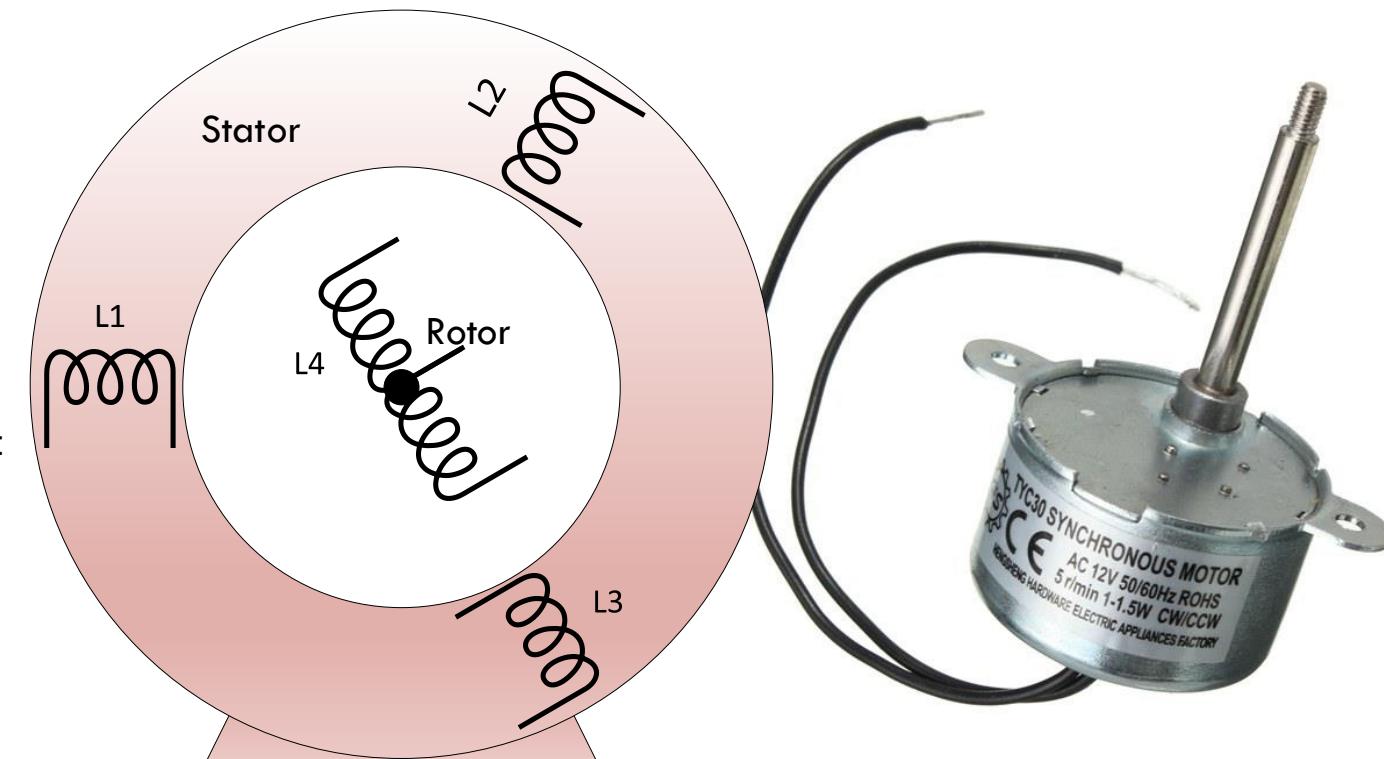
$$N_{RPM} = \frac{120f}{P},$$

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
  - Man kan da vente med å sette DC på rotor til asynkronhastigheten er nådd for minimere strømtrekk i oppstart.
- Alternativt kan man bruke motoren sammen med en inverter for å starte langsomt.
- Magnetene kan festes både aksialt og radielt for å gi forskjellig form, vekt og ytelse til motoren.

# AC – SYNKRON MOTOR

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



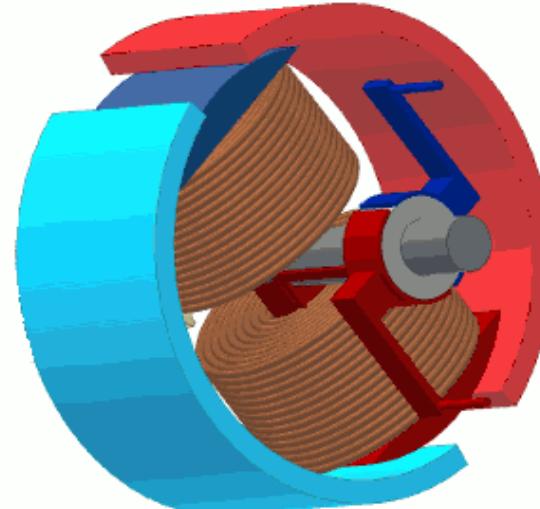
# DC MOTORER

DC motorer benytter seg av likestrøm for å indusere magnetfelt i rotor og eller stator. Siden strømretningen ikke skifter fra utsiden, så må DC motoren ha en måte å gjøre kommutering (skifte strømretning) selv.

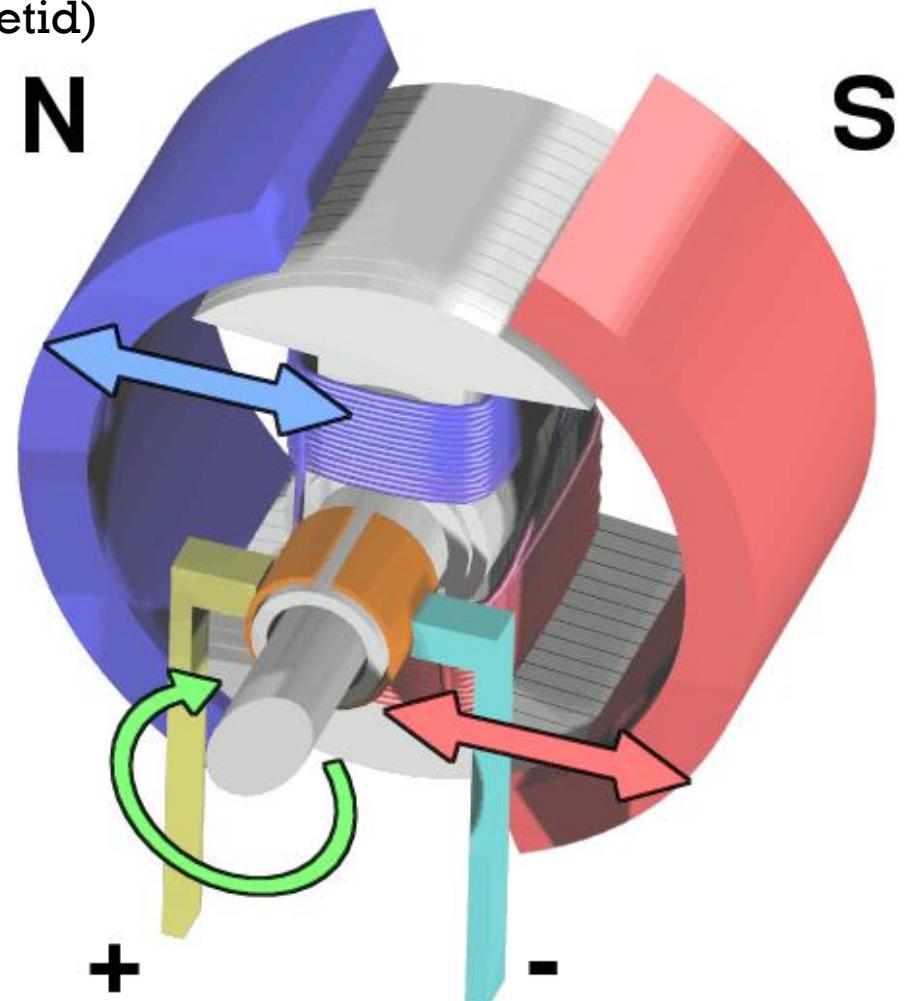
Vi ser videre på  
Børstebaserte «brushed» permanentmagnet DC motorer  
Børsteløse motorer «brushless - BLDC»  
Steppermotorer

# DC - BØRSTEMOTORER

- Kommuteres mekanisk ved hjelp av et sett med børster.
- Dreiemoment avtar med hastighet
- Mye brukt i mekatronikk (billige produkter med begrenset levetid)



+	-
Billige Enkel konstruksjon, ikke behov for elektronikk	Begrenset levetid på børster Elektromagnetisk støy (EMI) og gnister ved børstene. Rotoren blir varm (luftkjøles) Stort sett bare lav-effekts motorer.



# BØRSTELØS DC MOTOR (BRUSHLESS DC - BLDC)

Kommuttering kan gjøres med et sett transistorer (typisk MOSFET), som aktiveres av en hall-sensor, en optisk enkoder eller ved å måle spenningen motoren selv induserer under kjøring (back EMF).

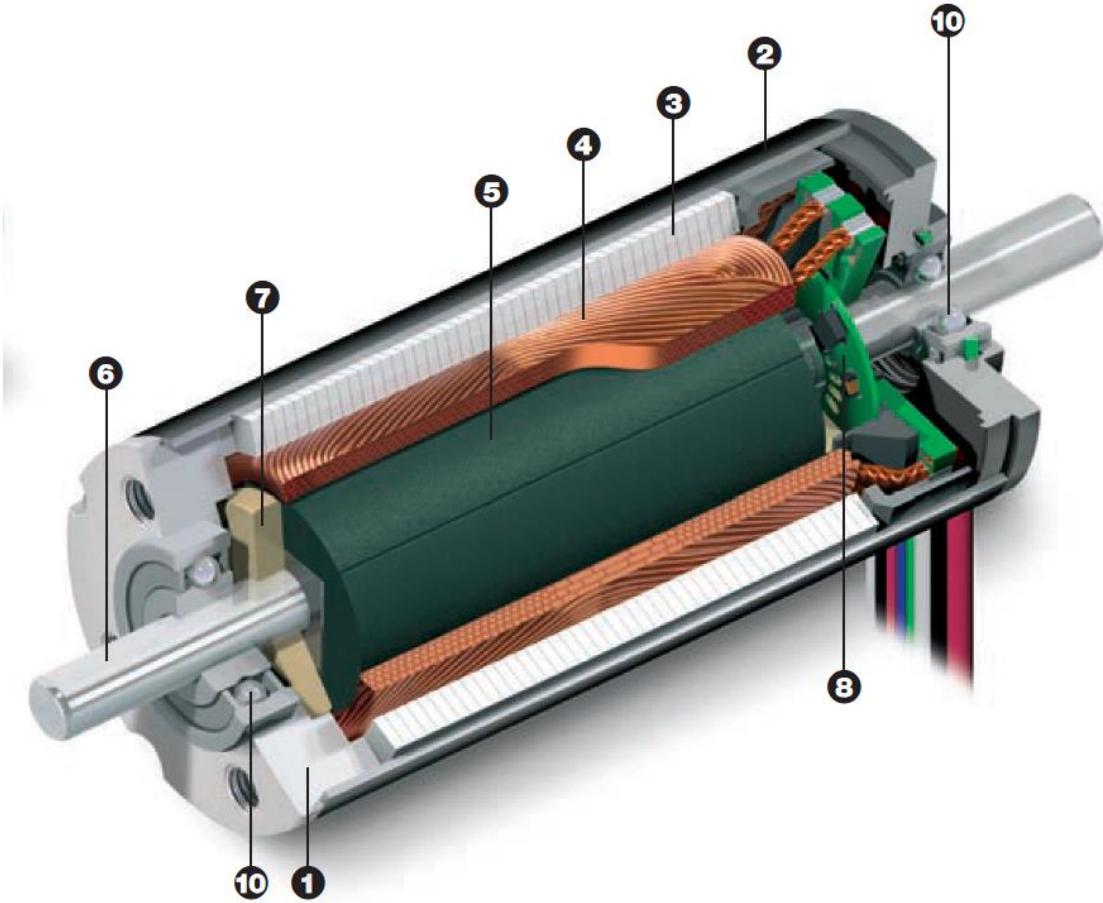
Hall sensoren detekterer når magnetfeltet skifter retning.

De fleste BLDC motorer forsyneres med 3fase strøm generert av en inverter (switchpowersupply).

## BLDC vs Brushed DC:

- Mer dreiemoment per vekt og effekt
- Enklere, mer solid mekanisk design
- Redusert EMI (Electromagnetic interference)
- Redusert støy (lyd)
- Lettere å kjøle, større andel av varmen går i stator
- Kan lages for høy effekt
- Trenger elektrisk kommutering. (I praksis en AC motor)

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



## Inrunner:

- 4) Stator viklinger (spoler)
- 5) Rotor (permanent-magnet)
- 8) Hall sensor

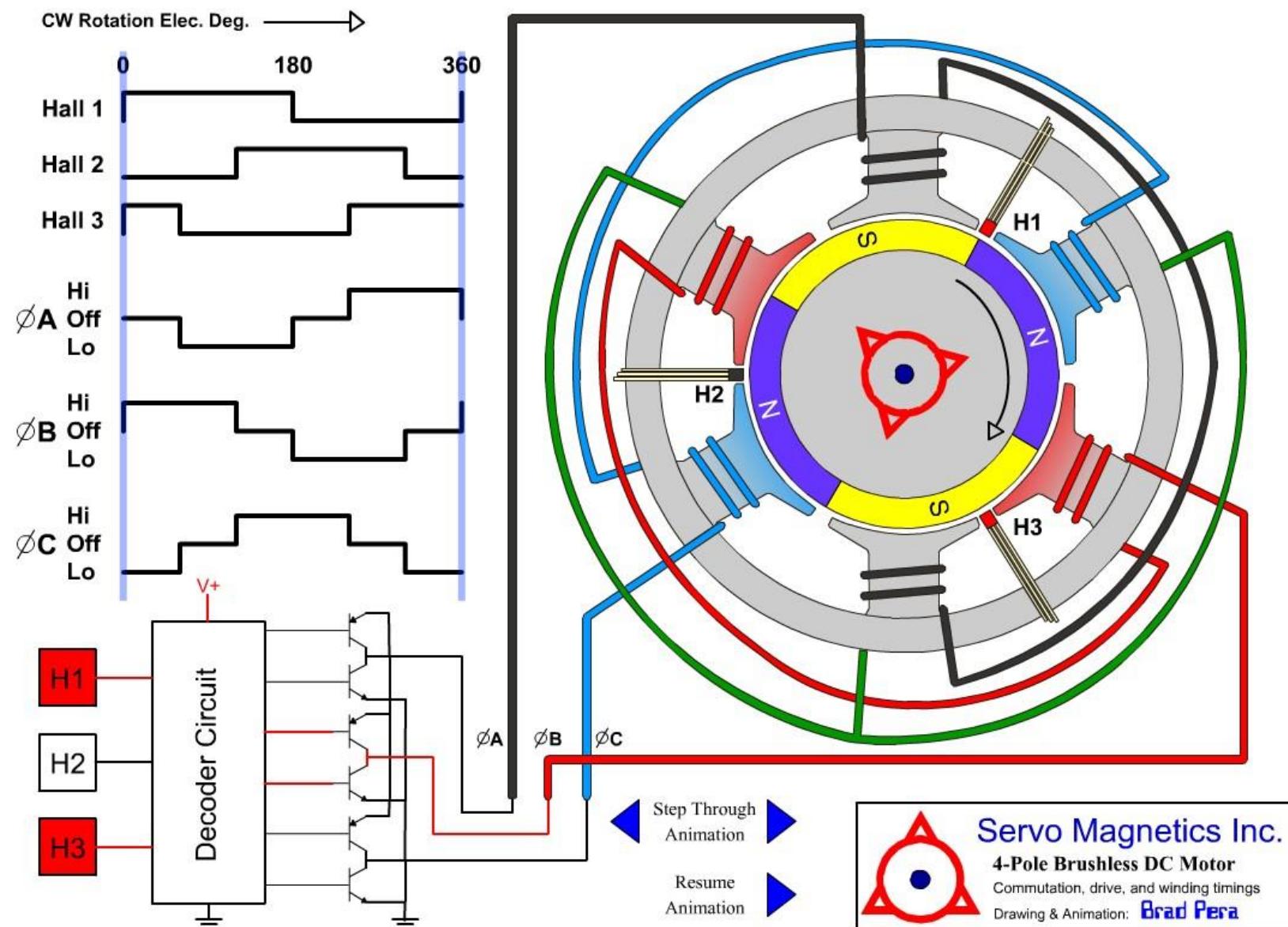


Outrunner (video):

# BLDC (FORTS.)

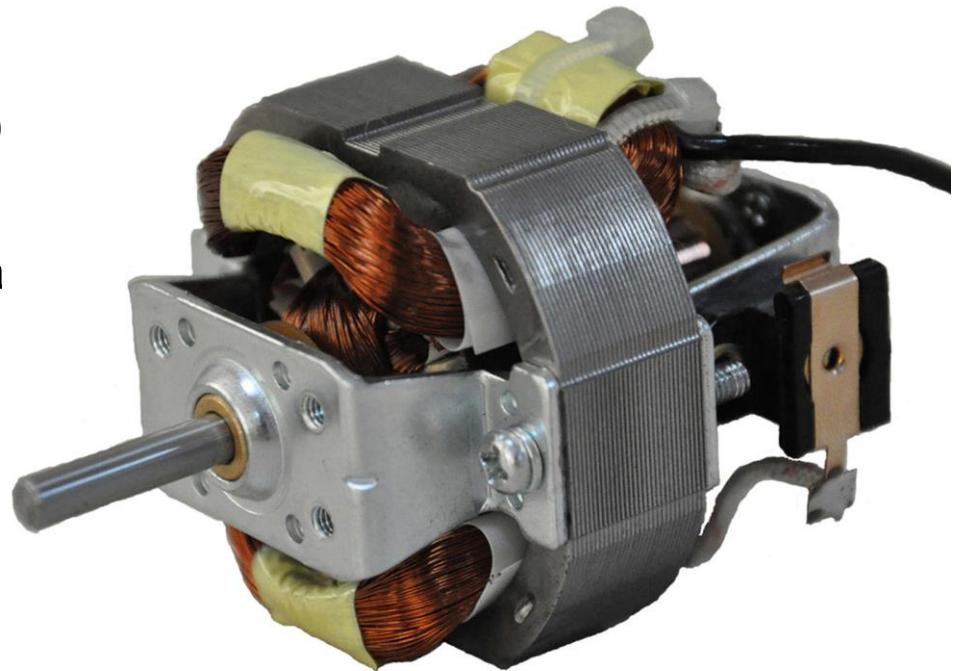
Styring av en BLDC motor gjøres i på to måter:

1. Kommuttering ([video](#)) gjøres ved å styre strømmen gjennom spolene slik at vi får utnyttet de magnetiske kraftene maksimalt. Kommutteringen gjøres basert på informasjon fra 3 hall sensorer (H1, H2, H3 på diagrammet)
2. Styring av strømstyrke. Siden magnetfeltstyrken og dreiemomentet er proporsjonalt med strømmen i spolene, kan vi regulere dreiemomentet ved å pulsbreddmodulere (Pulse Width Modulation, [PWM](#)) strømmen til hvert spolepar.



# 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.



# STEPPERMOTOR

## Egenskaper

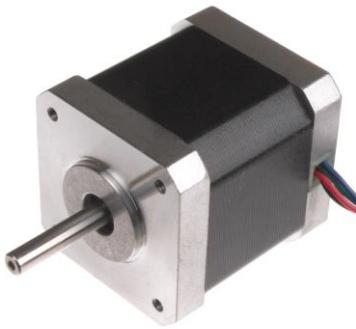
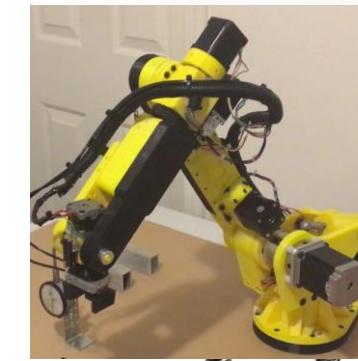
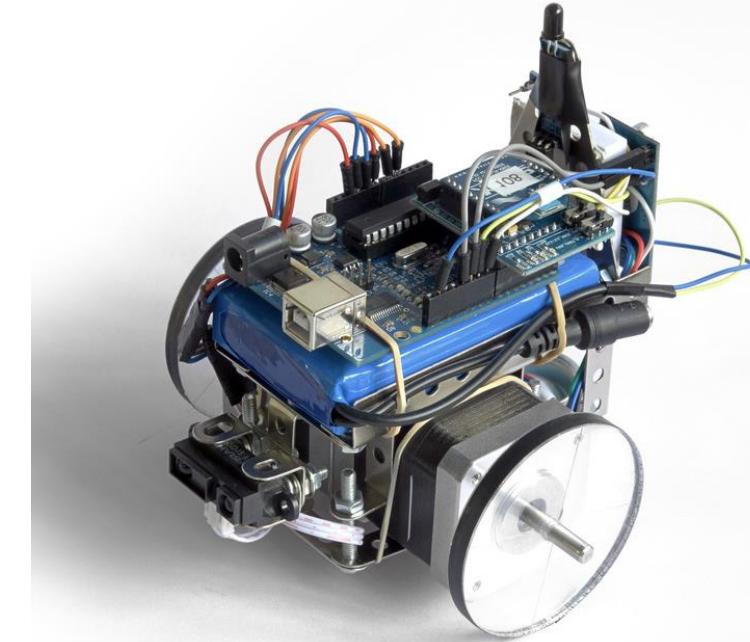
- Presis styring av akselvinkel uten behov for avlesning/sensorer - åpen sløyfe «open loop»
  - Aksel roterer inkrementelt en fast vinkel hver gang man sender en ny spenningskonfigurasjon til motoren
- Gir ofte et system med lav pris / enkel konstruksjon
- Høyt dreiemoment ved lave hastigheter, fullt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

## Anvendelser

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

## Begrensinger

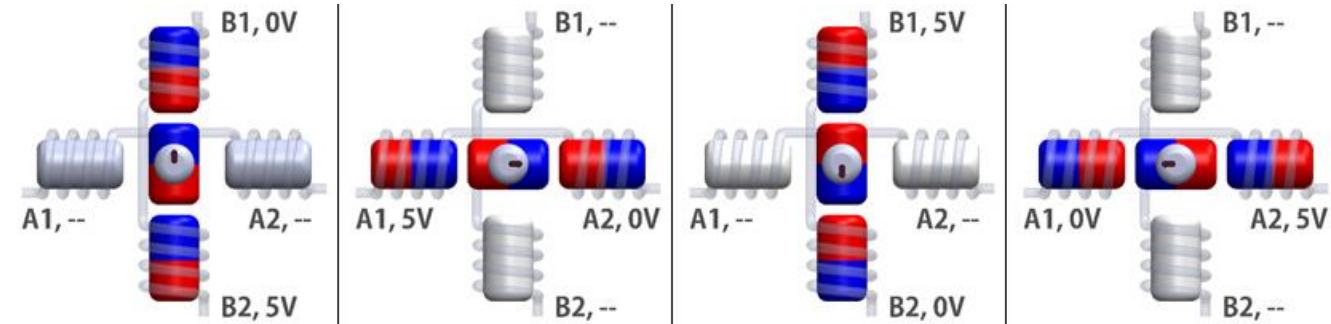
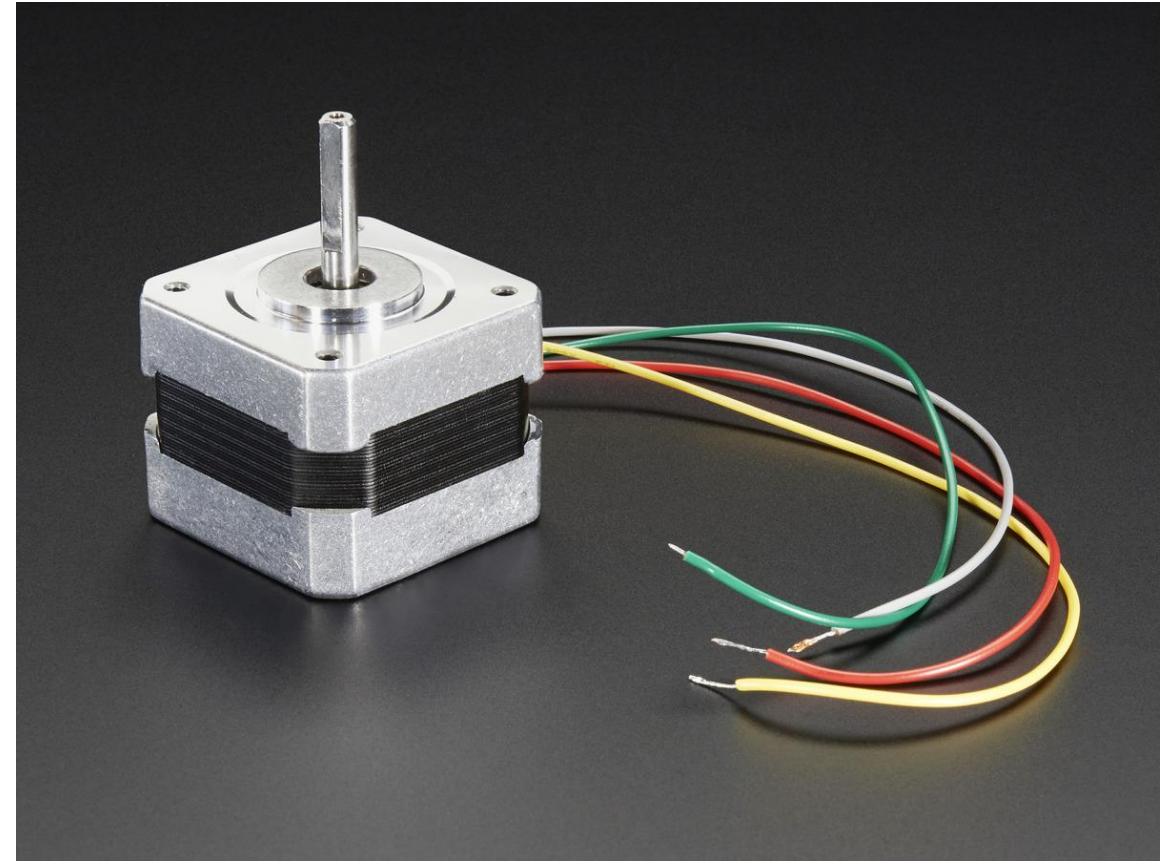
- Hvis belastning blir for stor kan de hoppe over stepp uten at systemet registrerer det.
- Lav hastighet, typisk <20 rpm
- Lav effekt



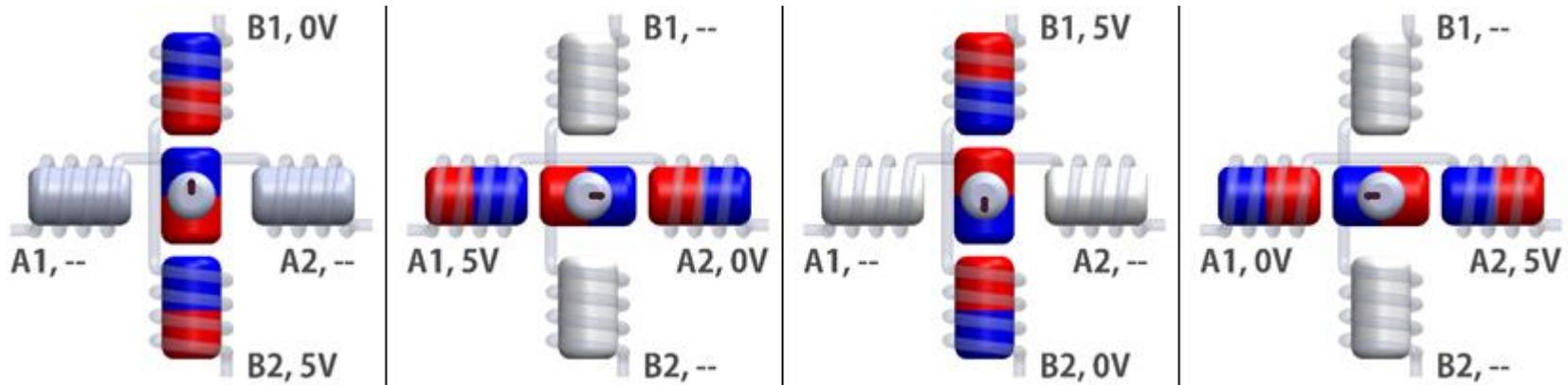
# HVORDAN STYRE (KOMMUTERE) EN STEPPERMOTOR

Kommuttering betyr å sette spenninger på vindingene slik at motoren går som vi ønsker  
For enkelhets skyld ser vi først 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 koblet løse vil ikke bidra med noe magnetisk felt



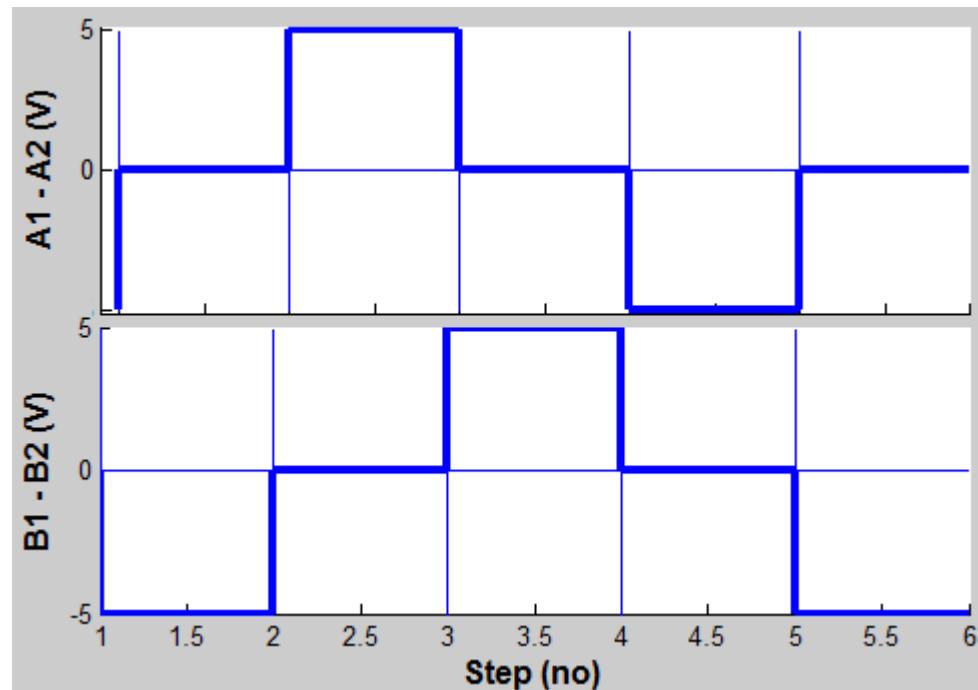
# «WAVE COMMUTATION»



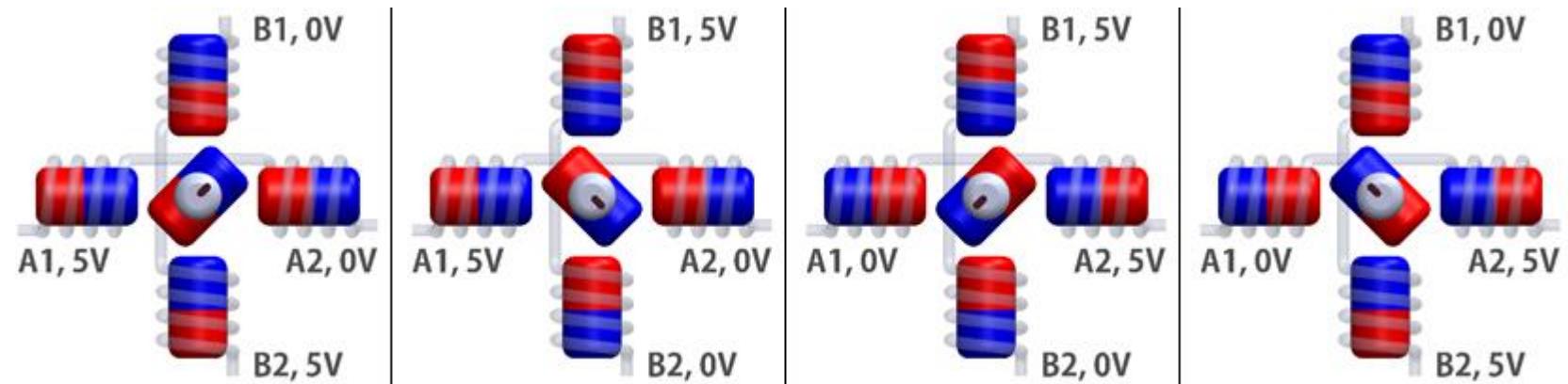
Kun ett spolepar er aktivt av gangen

Gir 50% effekt bruk og lavt dreiemoment.

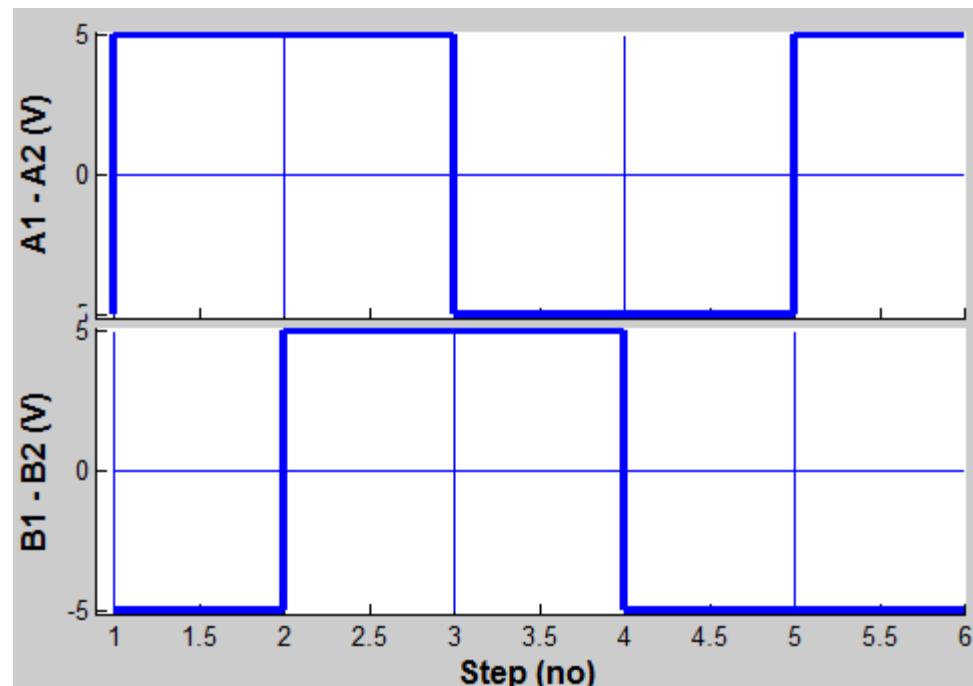
Går ett steg av gangen.



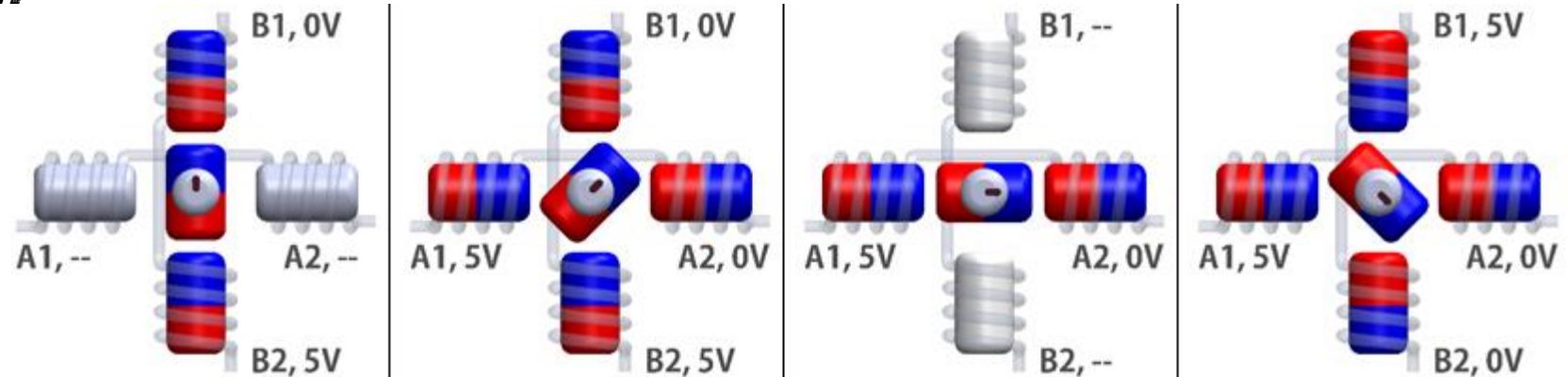
# FULL STEGS KOMMUTERING (FULL STEP)



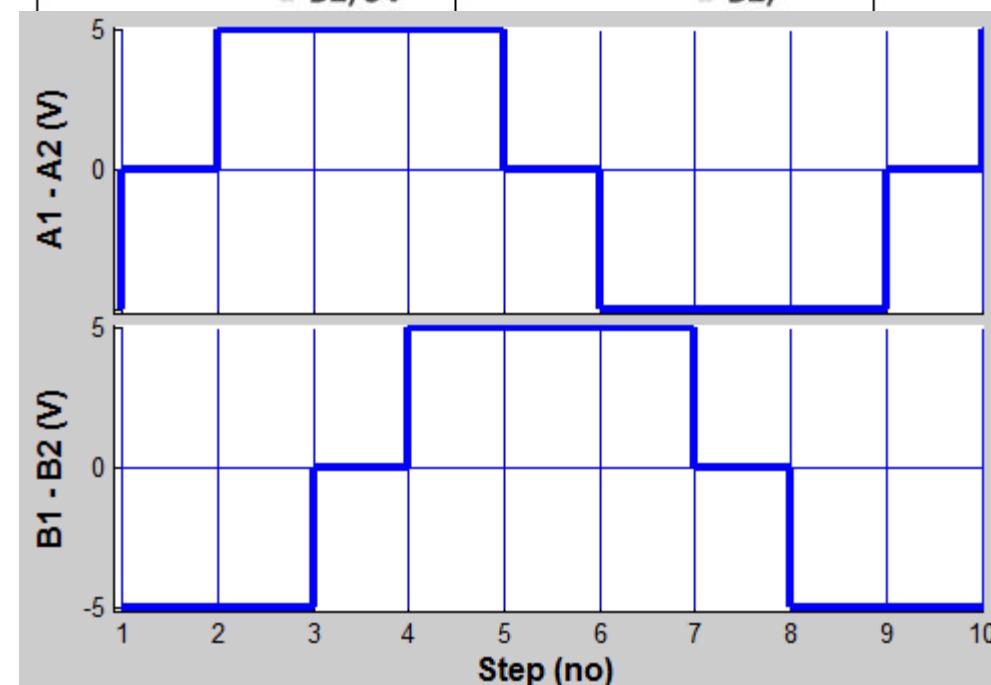
Bruker alle spoleparene samtidig  
Gir maksimal effekt og dreiemoment



# HALVSTEGSKOMMUTERING «HALF STEP COMMUTATION»



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



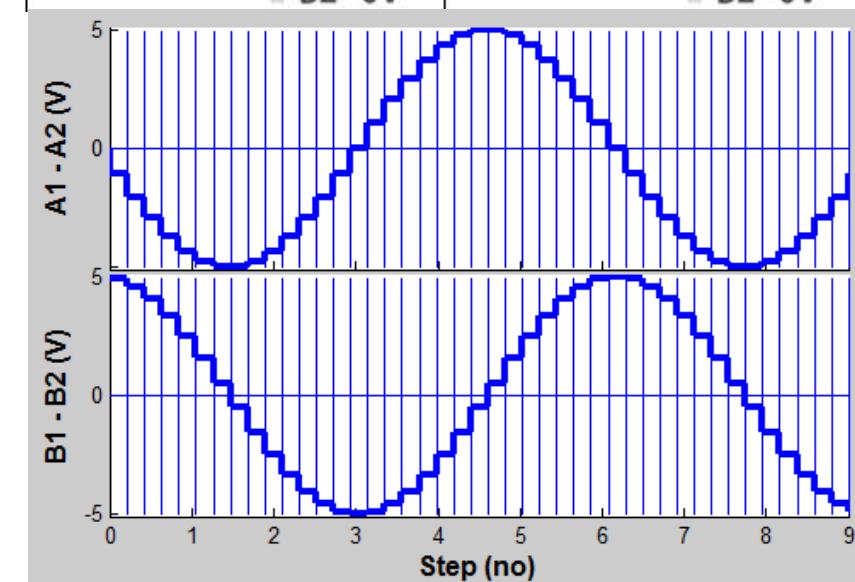
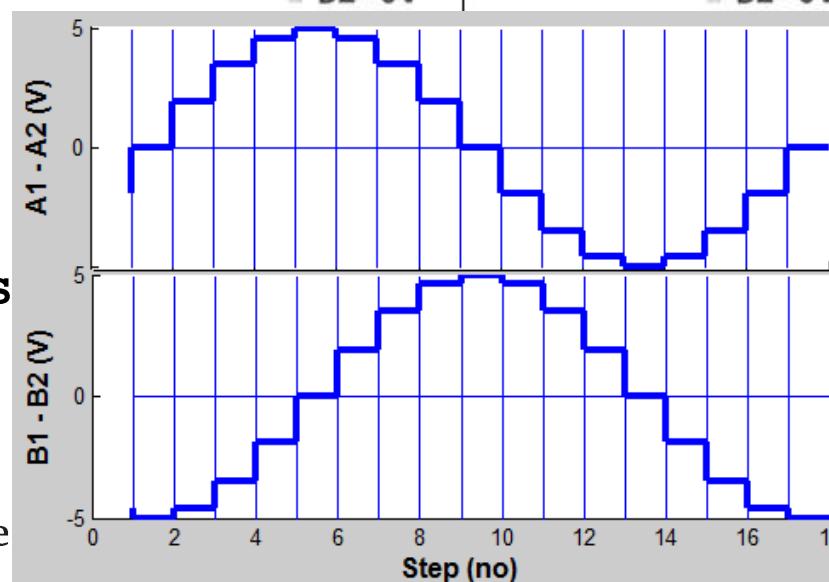
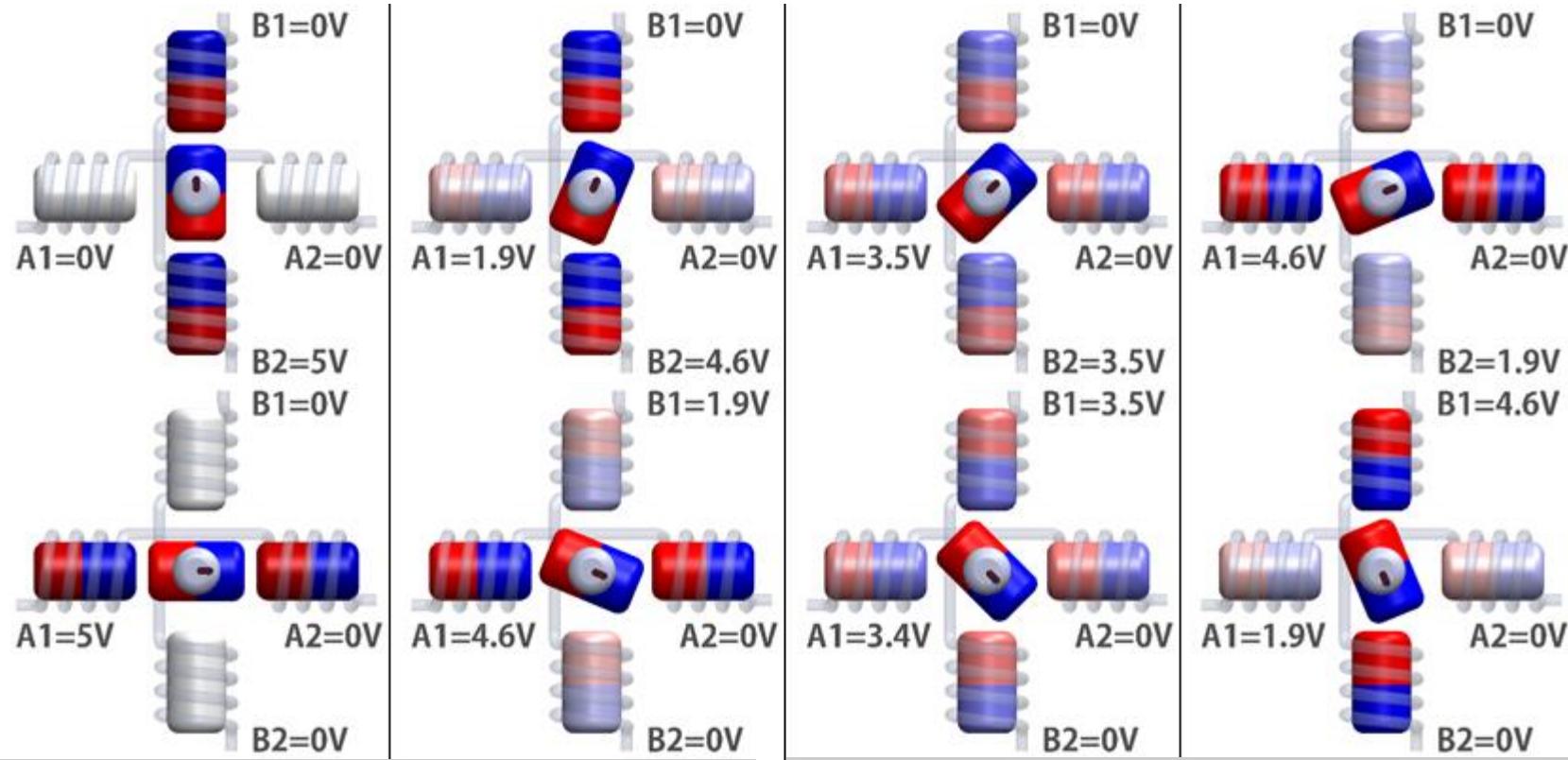
# MIKROSTEPPING

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)

