



UiO • **Institutt for informatikk**
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

IN1080 V2021

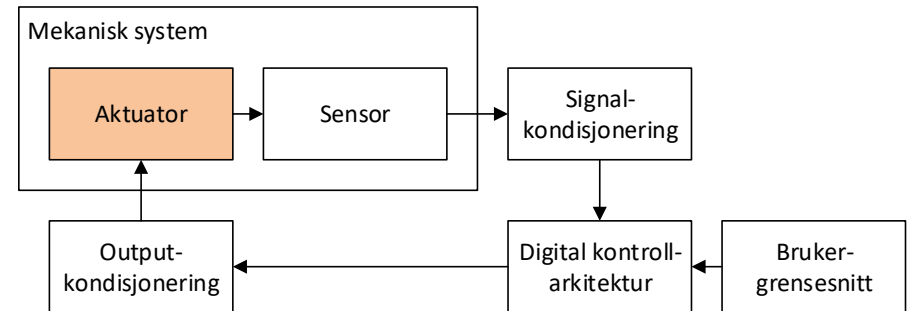
Motorer



Oversikt / Mål

- Kraft
- Kraftmoment (Dreiemoment)
- Induksjon
- Elektriske aktuatorer
 - Solenoide
 - Relee
 - AC motor /
 - Induksjonsmotorer
 - Synkronmotor
 - DC motor
 - Børstemotor
 - Børsteløs motor (BLDC)
 - Steppermotor
 - ~~Kommutering av steppermotor~~

- Å kunne velge og benytte elektriske aktuatorer i mekatronikksystem.
 - Kjenne til prinsippene for virkemåte til forskjellige typer elektromotorer
 - Kunne beregne om elektromotorer kan benyttes til spesifikke oppgaver.



Kraft (BØR VÆRE kjent...)

Symbol :
F
(force)

Enhet : N
(Newton)

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

1N = 1kgm/s²
En kraft på 1N vil gi et legeme på 1kg en akselerasjon på 1m/s²



Newtons 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
 $G = mg$
 $= 1\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2$
 $= 9,81\text{N}$

Kraftmoment (dreiemoment)

Symbol : τ
(Gresk Tau
«torque»)

Enhet : Nm
(Newton-
meter)

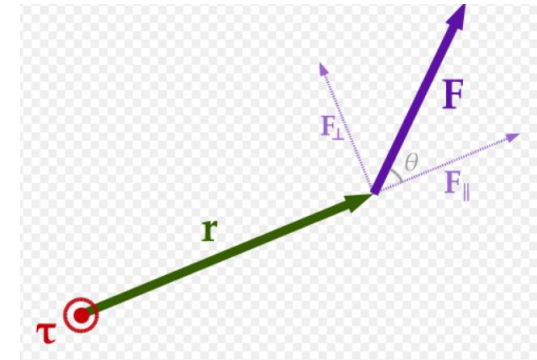
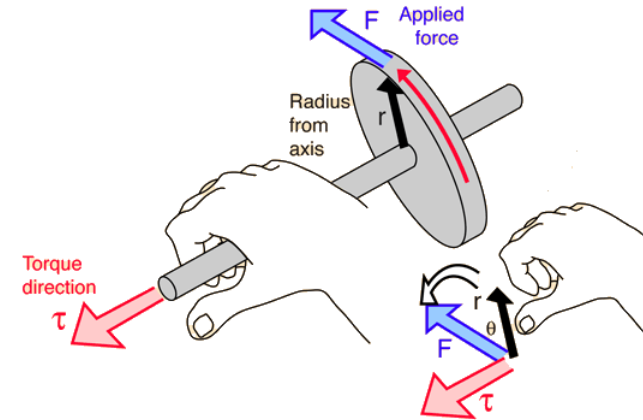
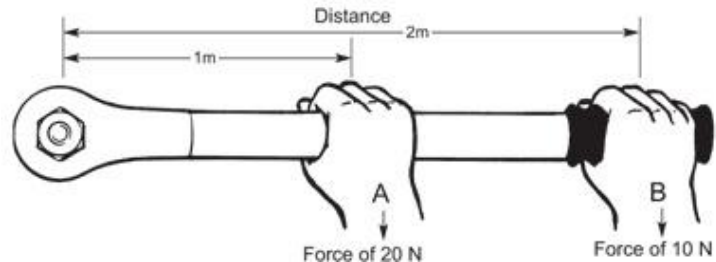
$1\text{Nm} = 1\text{kgm}^2/\text{s}^2$
Et dreiemoment på 1Nm vil gi et legeme med treghetsmoment (I) på 1kgm^2 en vinkelakselerasjon (α) på $1/\text{s}^2$ (1Hz/s)

- Dreiemoment (torque) er en krafts evne til å forandre et legemes rotasjon. Dreiemoment τ (tau) beregnes med kryssproduktet av avstanden (r) til legemets rotasjonspunkt og kraftvektoren (F).

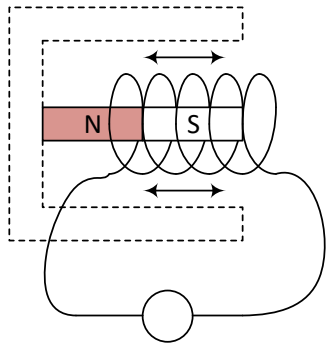
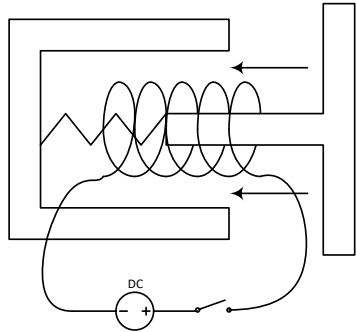
$$\tau = r \times F$$

- Retningen til kryssproduktet er gitt ved høyrehåndsregelen, dvs. 90 grader på både radius og kraftvektor. (τ -tommel, r -håndflate, F -fingre).

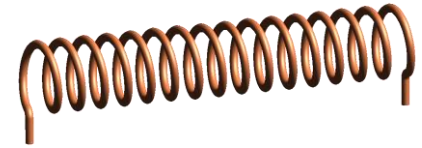
- Størrelsen på kraftmomentet blir $\tau = r \cdot F \sin(\theta)$ eller $\tau = r \cdot F_{\perp}$. I svært mange praktiske sammenhenger så er F alltid normalt på r , og da får vi $\tau = r \cdot F$ ("kraft · arm")



Solenoider og Relé



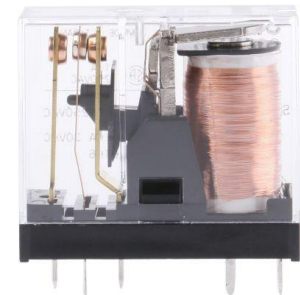
- En **solenoid** er en tettviklet spole med elektrisk ledende tråd.
 - Uttrykket brukes også (mest) om *spolebaserte transdukere/ aktuatorer*.
 - Eks: Magnetventil (solenoid valve), relé (relay)
- I en solenoidbasert aktuator beveger man et magnetiserbart materiale (/magnet) i forhold til spolen når 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*
- Solenoider brukes også i
 - Høytalere, mikrofoner, gitar-pickups, tennplugger
 - Motorer...



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



[Solenoid actuator, RS-components](#)



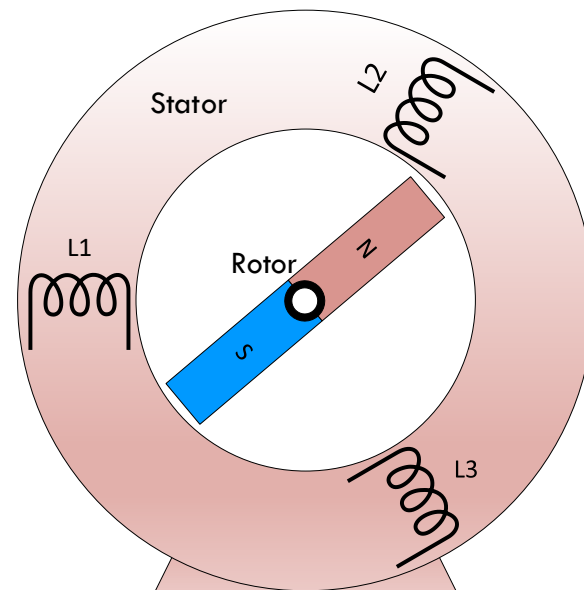
[Bistabilt relé, RS-components](#)

Elektromotor prinsipp og begreper

(Gjelder ikke homopolare motorer)

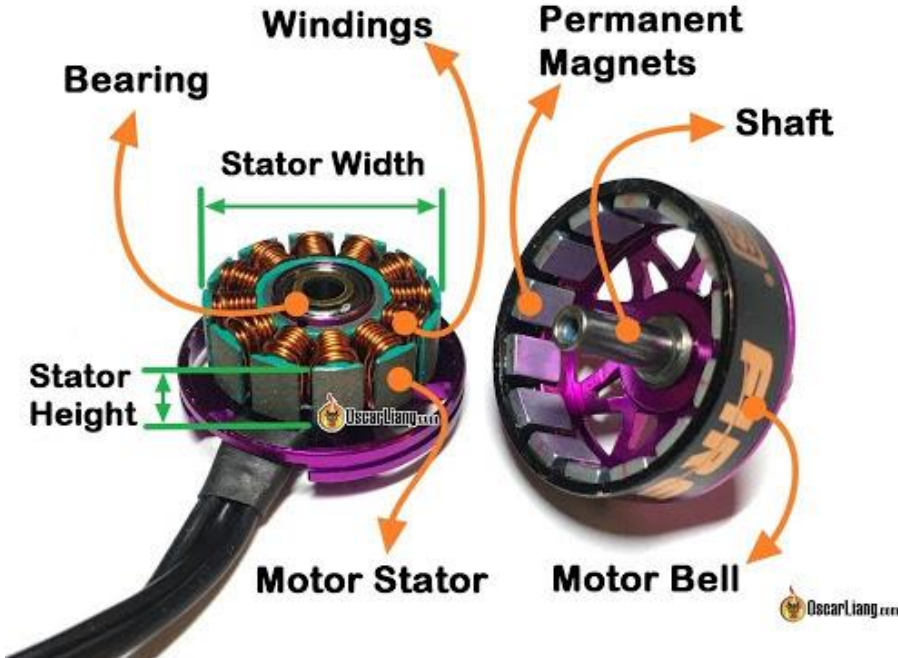
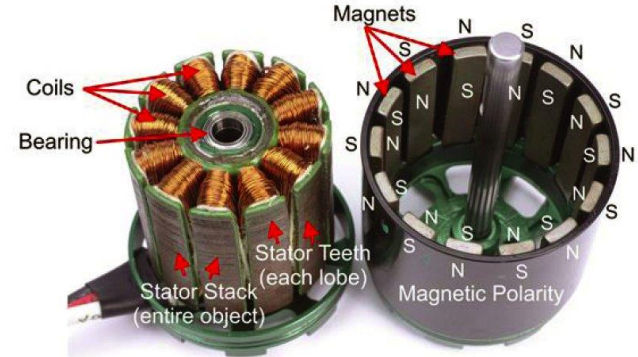
En elektromotor består i hovedsak av to deler, Rotor og Stator

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 permanentmagneter dersom rotoren er en elektromagnet).
 - b. Antallet poler er typisk et multiplum av 2,3 eller 5 for DC-motorer, mens steppermotorer gjerne har et multiplum av 4
- 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.



Eksempel: Dronemotorer

OUTRUNNER COMPONENTS



A Typical 22XX Motor 14 Magnets



Elektromotor - Elektrisk modell

Forsyningsspenningen over motoren kan approksimeres ved

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

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

Er strømmen konstant (steady state AC) får vi

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

Den industerte spenningen er proporsjonal med motorens vinkelhastighet ω og gitt av

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

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

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

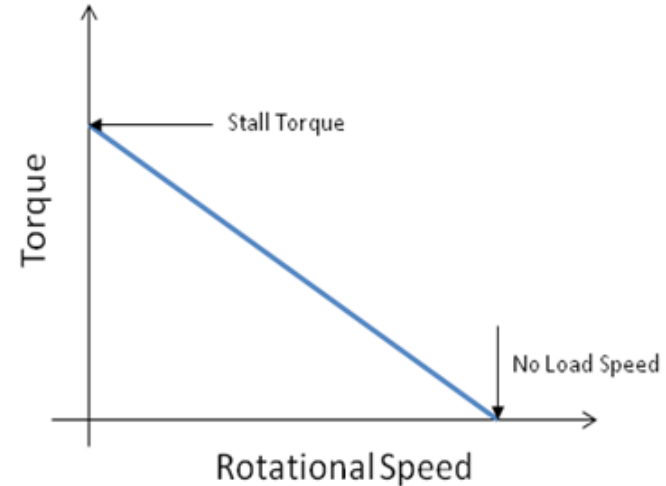
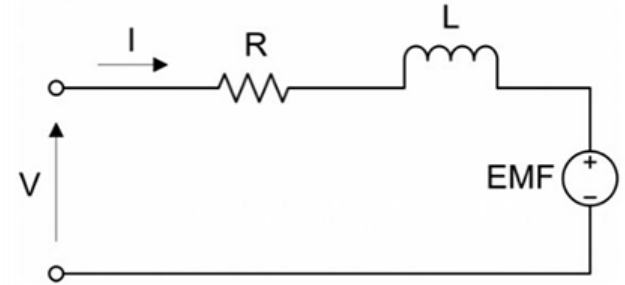
Dreiemomentet er proporsjonalt med strømmen (DC motorer):

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

Løser vi (4) for I ($I = \frac{V - \omega k}{R}$) 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 $V = V_{EMF}$ som gir maksimal vinkelhastighet $\omega = V/k$ (se figur)



Elektromotor regneeksempel

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

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

a) Vi har : $V = I \cdot R + V_{EMF}$ og ved start: $V_{EMF} = 0$

$$\Rightarrow R = V/I = 120V/12A = 10\Omega$$

b) Igjen: $V = I \cdot R + V_{EMF} \Rightarrow$

$$V_{EMF} = V - I \cdot R,$$

$$I = 2A, V = 120V, R = 10\Omega \Rightarrow$$

$$V_{EMF} = 120V - 2A \cdot 10\Omega = 100V$$

c) Har: $V = I \cdot R + V_{EMF} \Rightarrow$

$$I = \frac{V - V_{EMF}}{R}$$

$$V_{EMF} = k \cdot \omega$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{2}, k\omega_1 = 100V \Rightarrow k\omega_2 = 50V \Rightarrow$$

$$I = \frac{120V - 50V}{10\Omega} = 7A$$



3 typer Elektromotorer (oversikt)

Homopolar
(likestrøm)

Ingen
kommutering
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)

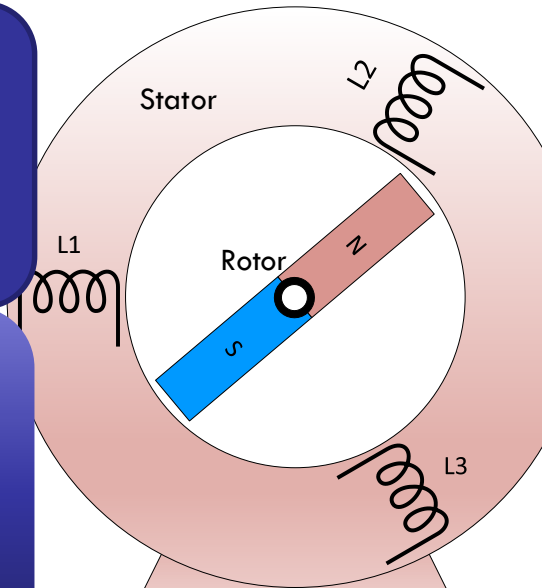
- Ofte billige
- Stor startstrøm (!)
- Frekvensavhengig rotasjon
/fast hastighet

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).

Brukes i økende grad:
Batteriverktøy,
motorsykler, elbiler,
leketøy etc.

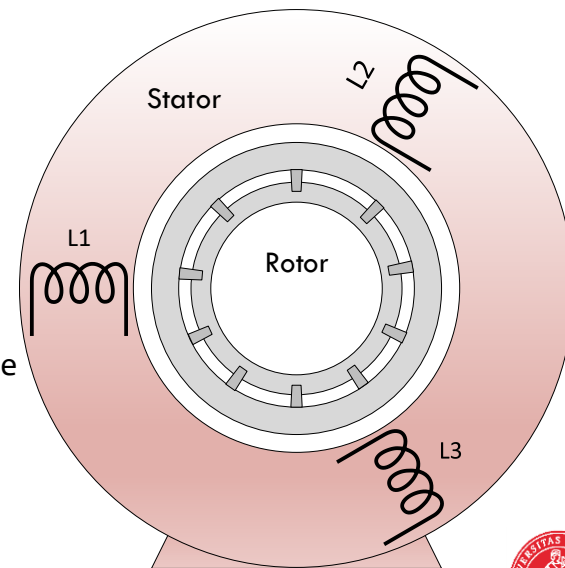


AC - Asynkron MOTOR (Induksjonsmotor)

- Induserer strøm i rotor ved hjelp av magnetfelt til stator
- Rotor består typisk av et hamsterhjul «squirrel cage»
https://www.youtube.com/watch?v=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)

$$\text{slip} = \frac{n_{\text{stator}} - n_{\text{rotor}}}{n_{\text{stator}}}$$

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



Synkronmotorer har typisk

- Permanentmagneter i rotor eller
- børster eller en roterende transformator rundt akselen 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

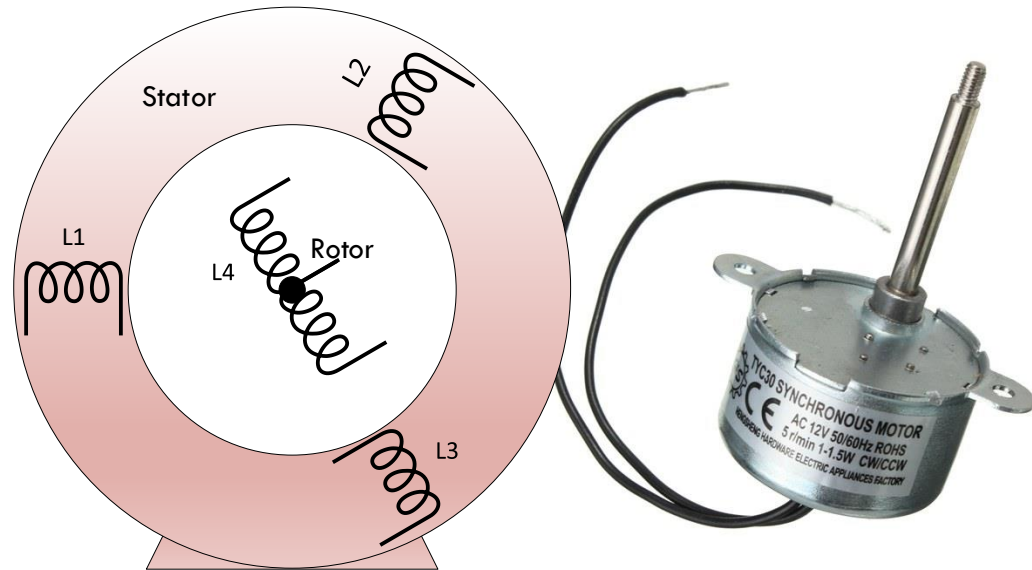
$$N_{RPM} = \frac{120f}{P},$$

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 å minimere strømtrekk i oppstart.
- Alternativt kan man bruke motoren sammen med en inverter for å starte langsomt.
- Magnetene kan festes både aksielt 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.

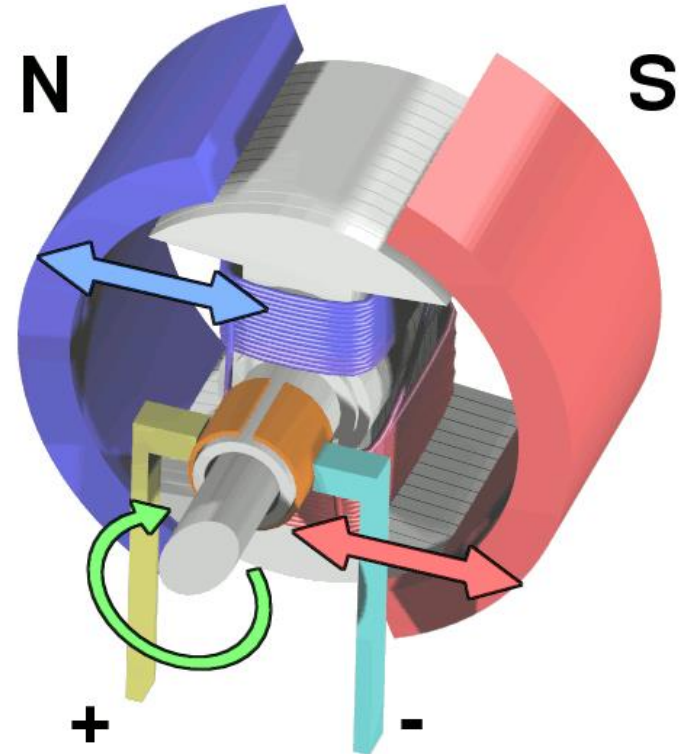
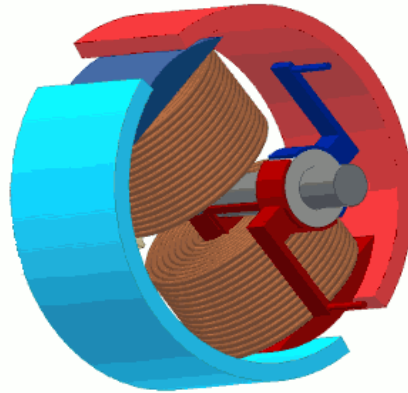
Vi ser videre på

- 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 billige produkter med begrenset levetid



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

Børsteløs DC motor (Brushless DC - BLDC)

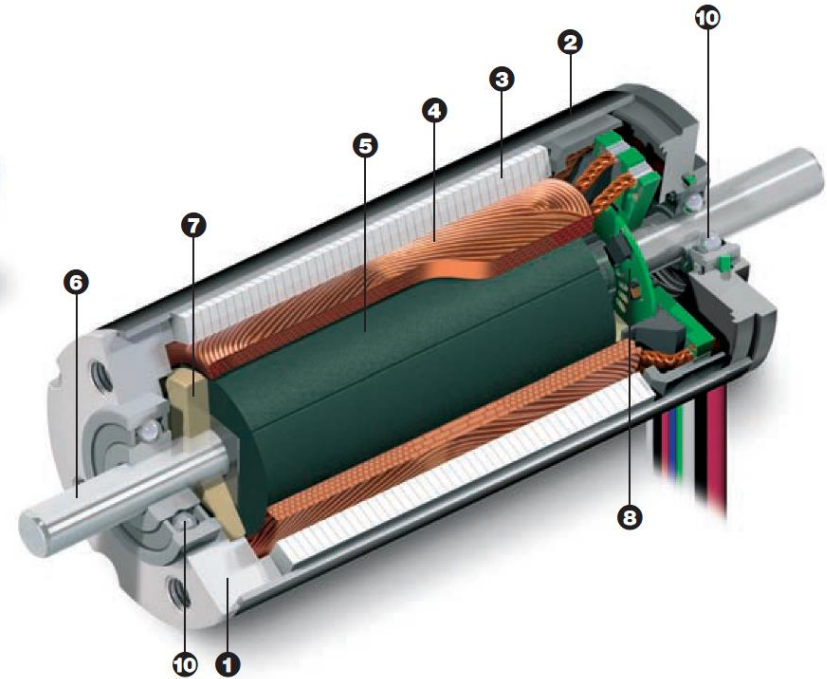
Kommutering kan gjøres med et sett transistorer (typisk MOSFET), som aktiveres av en hall-sensor, en optisk enkoder eller ved å måle spenningen motoren selv inducerer under kjøring (back EMF). Hall sensoren detekterer når magnetfeltet skifter retning.

De fleste BLDC motorer forsynes 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

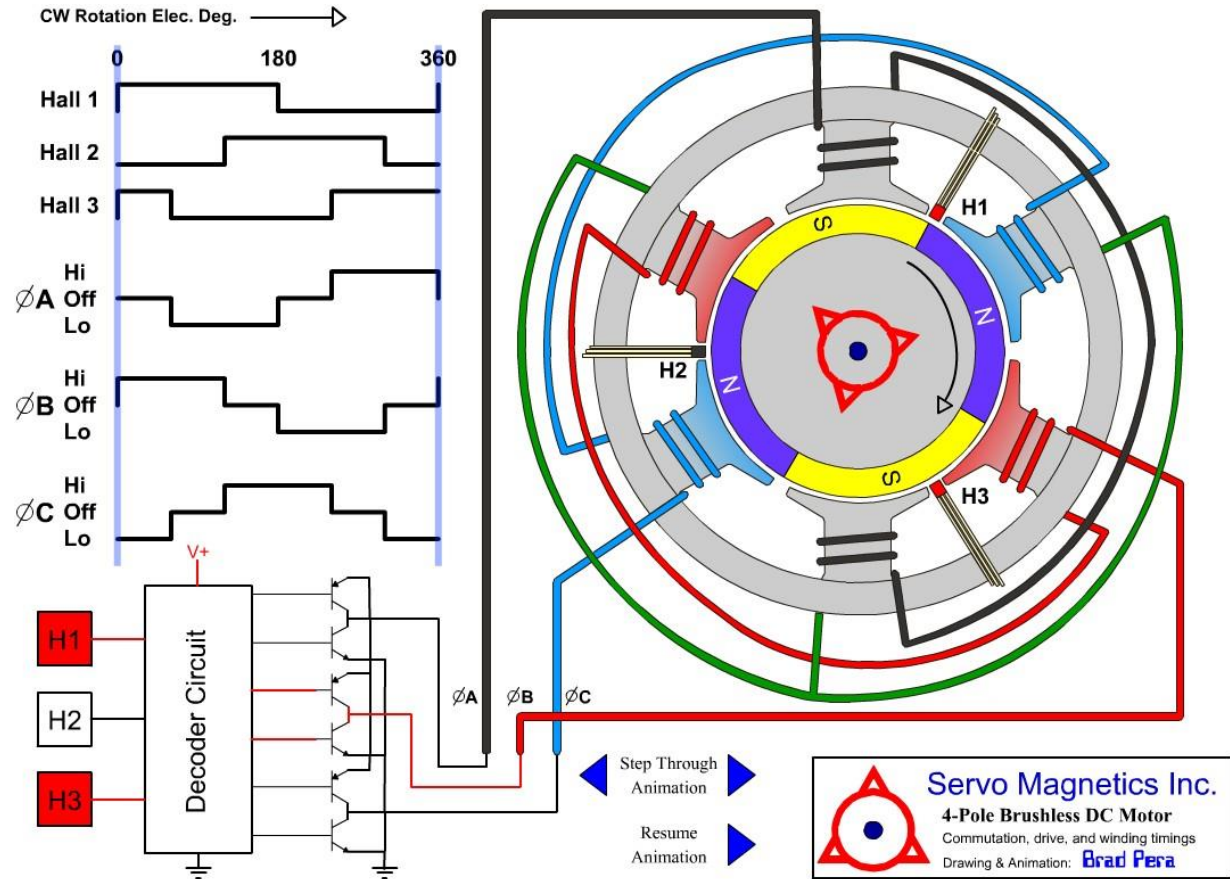
Outrunner (video):



BLDC (forts.)

Styring av en BLDC motor gjøres på to måter:

1. **Kommutering** ([video](#)) gjøres ved å styre strømmen gjennom spolene slik at vi får utnyttet de magnetiske kreftene maksimalt. Kommuteringen 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 pulsbreddemodulere** (Pulse Width Modulation, **PWM**) strømmen til hvert spolepar.



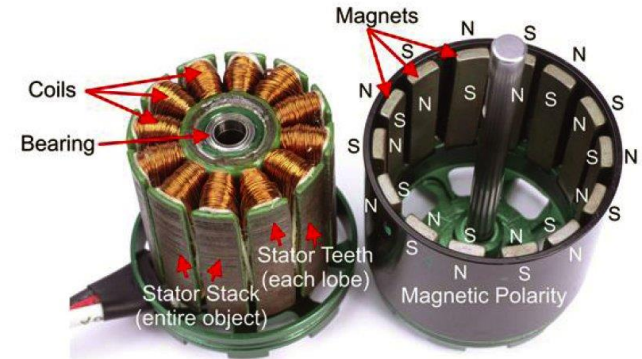
Servo Magnetics Inc.
4-Pole Brushless DC Motor
 Commutation, drive, and winding timings
 Drawing & Animation: **Brad Pera**



AC synkron eller BLDC?

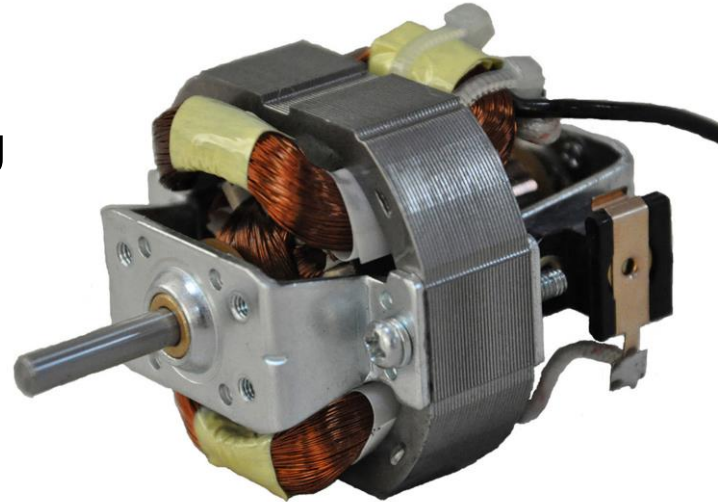
- PMAC, PMSM
 - Permanent magnet AC eller Permanent magnet Synkron Motor
 - Mer og mer vanlig.
 - Permanent magneter i rotor gir synkron
 - Omtales ofte som BLDC
- Trenger i praksis sensorer og en inverter (som vist forrige slide)
 - Droner : ESC (Electronic speed control)
 - Ellers: Variable frequency drive (VFD), Field Oriented Control (FOC)

OUTRUNNER COMPONENTS



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

- Ikke nødvendigvis et tydelig skille-
- Typisk
 - En kraftig permanentmagnet med tagger (neste slide)
 - Et multiplum av 4 poler

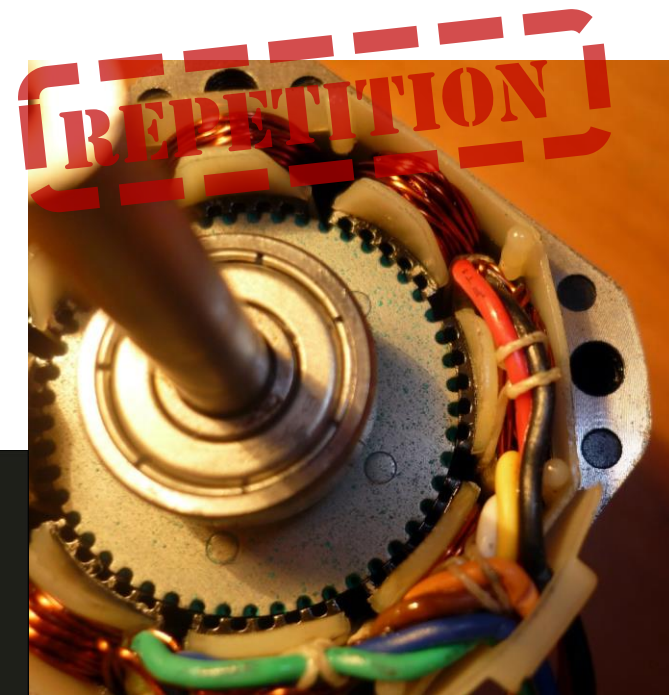
Steppermotor i praksis

«Hybrid Stepper motor»

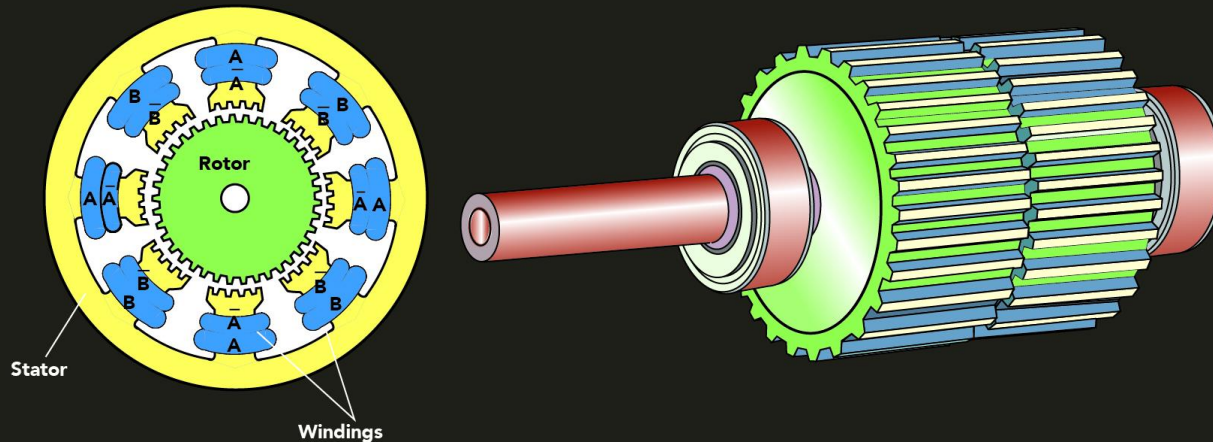
(«Hybrid» fordi den kombinerer prinsippet fra en reluktansmotor med bruk av permanentmagnet)

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>

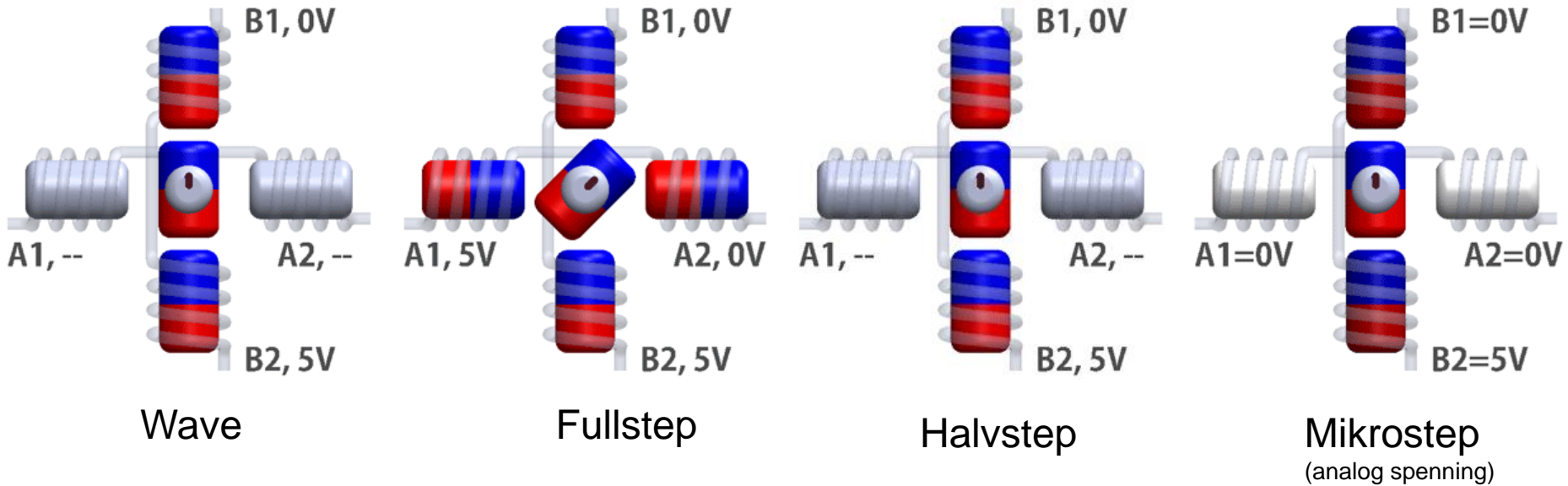


Stepper motor stator (with windings) and rotor (with two sets of teeth)



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.

Oversikt Kommutering (Gif-animasjon)

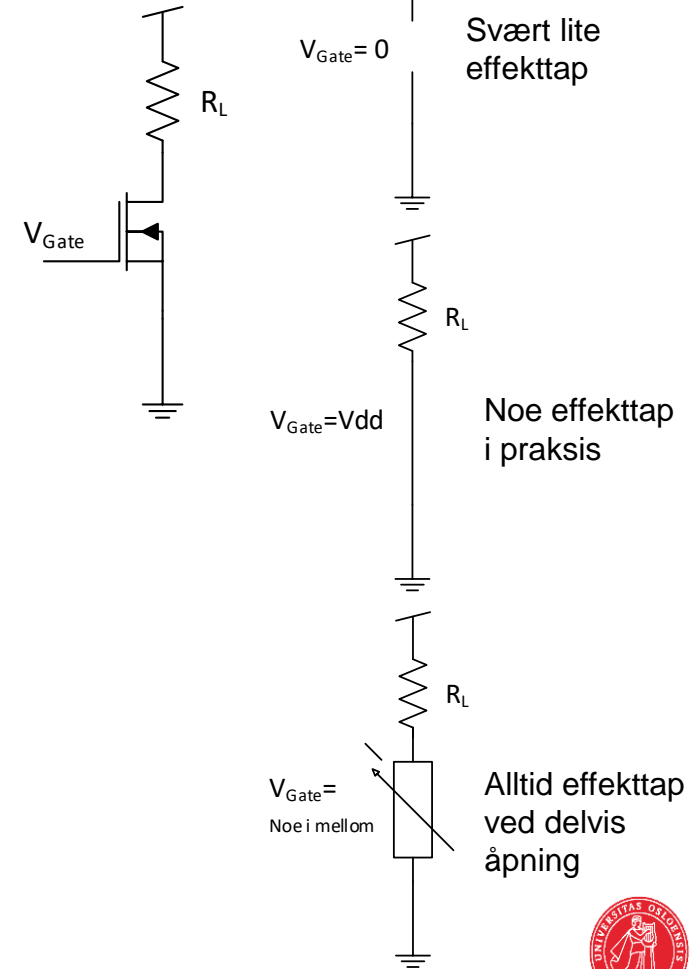


Pulsbreddemodulering- recap og eksempel

Transistor - digital vs analog modus

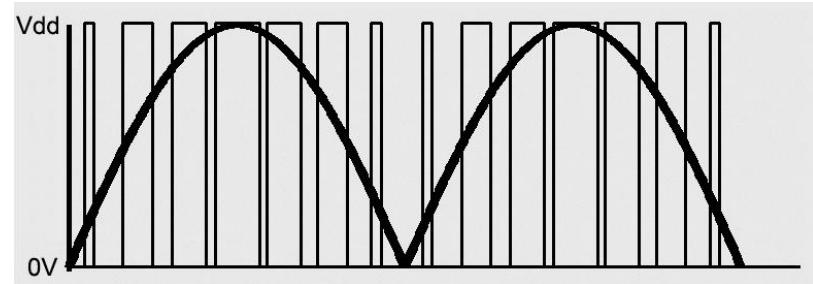
REPETITION

Tilstand	Gate-spenning*/ Base-strøm** (*MOSFET,IGBT, **BJT)	Egenskaper
Åpen	0	
Lukket	Max	
Delvis åpen/ lukket	<0-Max>	



Pulsbreddemodulasjon (PWM)

- Spenningsdeling gir mye tap av effekt og utvikling av varme.
- For å unngå varmetap:
 - generere analoge utgangsspenninger ved å skru av og på full spenning i hurtig tempo.
- Ved å variere bredden høyt signal har i forhold til lavt (“**duty cycle**”) og ved å koble utgangen til et lavpassfilter, vil man få jevnet ut spenningen slik at den blir nærmere en sinus.
- På figuren ser vi en likerettet sinuskurve.



For høyere switchefrekvenser ($>2\text{kHz}$), så *kan* spolene i en motor utgjøre lavpassfilteret selv.

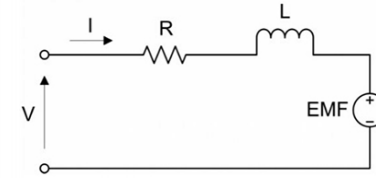
Switchefrekvensen må være minst det dobbelte av signalfrekvensen, og man bruker gjerne noe høyere ($\sim 10\times$).

Motordrivere har ofte en egen inngang for pulsbreddesignaler som kan genereres med en mikrokontroller (Arduino el.).

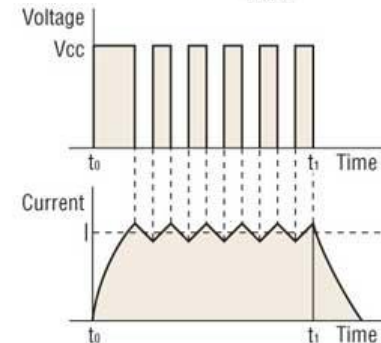
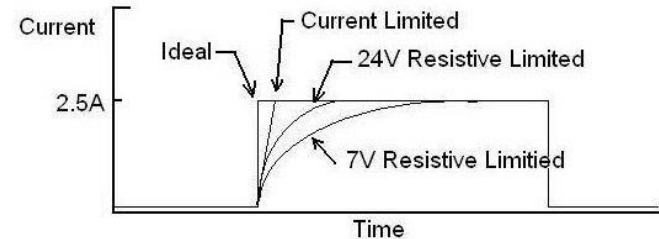


Strømstyring av steppermotor

- Spolene i en elektromotor kan modelleres som en induktans i serie med en motstand (+ en industert spenning) =>
 - Det tar tid før strømmen kommer opp i ønsket verdi.
 - Siden dreiemomentet er proporsjonalt med strømmen vil dreiemomentet bli redusert for høye steppfrekvenser.
- Hvis man i stedet for å drive motoren med en konstant spenningskilde heller bruker en konstant strømkilde vil denne effekten bli redusert. Dette kan gjøres på to måter:
 - Ved å koble en motstand i serie med steppermotoren, og øke forsyningsspenningen for å kompensere for spenningsfallet over motstanden, vil man få en forsyngingskilde som oppfører seg med som en konstant strømkilde. Ulempen er effekttap i seriemotstanden
 - Ved å bruke pulsbreddemodulering av en høyere forsyningsspenning kan man hurtig oppnå en tilnærmet jevn strøm.



Current vs time for stepper motor winding



Voltage - Current Relationship in Constant Current Chopper Drive



Eks. Finne modulasjonsfrekvens og duty cycle

Vi ønsker å pulsbreddemodulere strømmen til 118391 med 19V, men skal aldri gå over nominell spenning.

- A) Hva er lengste på-tid på vi kan benytte til moduleringen?
- B) Hva er korteste tid av, dersom vi forutsetter at lengste-tid-på benyttes?
- C) Hva er maksimal duty cycle dersom vi bruker den korteste tiden av?
- D) Hva er absolutt maksimal kontinuerlig duty cycle? (gitt at modulasjonsfrekvensen kan være uendelig høy)

A. $V_L = 12V, V_S = 19V, \tau = L/R = 0,92mH/114 \Omega = 8,1\mu s$

$$V_L = V_S(1 - e^{(-\frac{t}{\tau})}) \Rightarrow V_L - V_S = -V_S e^{(-\frac{t}{\tau})}$$

$$(V_S - V_L)/V_S = e^{(-\frac{t}{\tau})} \Rightarrow \ln((V_S - V_L)/V_S) = -\frac{t}{\tau}$$

$$t = -\tau \ln((19-12)/19) = 8,1\mu s$$

Svar: Lengste på tid er 8,1 μs

B. 99% utladet ved 5τ (av $V_L = V_S e^{(-\frac{t}{\tau})}$)

$$- 5\tau = 5 \cdot 8,1\mu s = 40,5\mu s$$

Svar: Korteste tid av er 40,5 μs

C. Dette gir en periodetid på $8,1\mu s + 40,5\mu s = 48,6\mu s$ som tilsvarer en frekvens på 20,6kHz. (Av $f=1/T$)

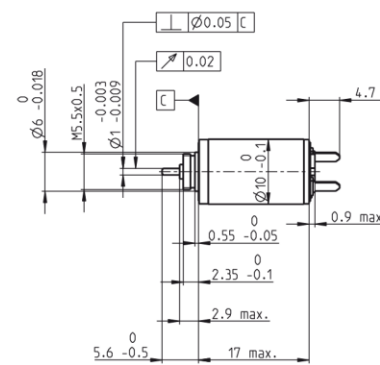
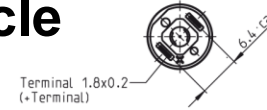
$$- \text{Duty cycle er (tid på)/periode} = 8,1\mu s / 48,6\mu s = 0,17$$

$$- \text{Evt } 1\tau / (5\tau + 1\tau) = 1/6 = 17\%$$

Svar: maksimal duty cycle er 1/6 eller 17% ved 20kHz

D. Maksimal kontinuerlig duty cycle får vi ved høyere frekvens (antar ∞). Maksimal kontinuerlig strøm er 0,0811A, dette tilsvarer en kontinuerlig spenning på $0,0811A \cdot 114 \Omega = 9,25V$. $9,25V/17V = 0,49$.

Svar: Maksimal kontinuerlig duty cycle er 49%



- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

		Part Numbers										
		118382	118383	118384	118385	118386	118387	118388	118389	118390	118391	
Motor Data												
Values at nominal voltage												
1	Nominal voltage	V	2.4	3	3.6	4.5	6	6	7.2	7.2	9	12
2	No load speed	rpm	10300	10400	9930	11300	13000	11400	11700	10600	10700	11600
3	No load current	mA	16	12.8	10.1	9.52	8.51	7.18	6.22	5.47	4.45	3.68
4	Nominal speed	rpm	1670	2010	1520	2970	4680	3160	3350	1860	2000	2790
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	0.76	0.792	0.786	0.788	0.785	0.801	0.784	0.758	0.757	0.746
6	Nominal current (max. continuous current)	A	0.368	0.307	0.243	0.222	0.191	0.17	0.143	0.125	0.10	0.0811
7	Stall torque	mNm	0.924	1	0.949	1.09	1.25	1.13	1.12	0.944	0.957	1.01
8	Starting current	A	0.432	0.375	0.284	0.297	0.292	0.232	0.198	0.15	0.123	0.106
9	Max. efficiency	%	66	67	66	68	69	68	68	66	66	67
Characteristics												
10	Terminal resistance	Ω	5.55	8	12.7	15.2	20.6	25.8	36.4	47.9	72.9	114
11	Terminal inductance	mH	0.0461	0.072	0.112	0.136	0.184	0.24	0.325	0.398	0.605	0.92
12	Torque constant	mNm/A	2.14	2.67	3.34	3.67	4.27	4.87	5.68	6.28	7.75	3.55
13	Speed constant	rpm/V	4470	3570	2860	2600	2230	1960	1680	1520	1230	1000
14	Speed / torque gradient	rpm/mNm	11600	10700	10800	10700	10700	10400	10800	11600	11600	11900
15	Mechanical time constant	ms	8.02	7.96	7.99	7.95	7.95	7.9	7.98	8.09	8.09	8.16
16	Rotor inertia	gcm ²	0.066	0.0711	0.0704	0.0706	0.0706	0.0726	0.0706	0.0666	0.0666	0.0654



Litteratur

- Introduction to Mechatronic design
 - 22.1-22.6 (*DC motorer*)
 - 23.1, 23.2, 23.3 (- 23.1, 23.2), 23.4
 - 26.1 – 26.9 (*Stepper motorer*)
- Oppgaver
 - 22. 1, 3, 6, 8, 9, 10 (1 oz = 28,35gram, 1 in = 2,54 cm)
 - 23. 1, 2, 3, 7, 9, 10