

IN 1080

F-12: STEPPERMOTOR, DRIVERE, GIR

Yngve Hafting, Forelesning 12



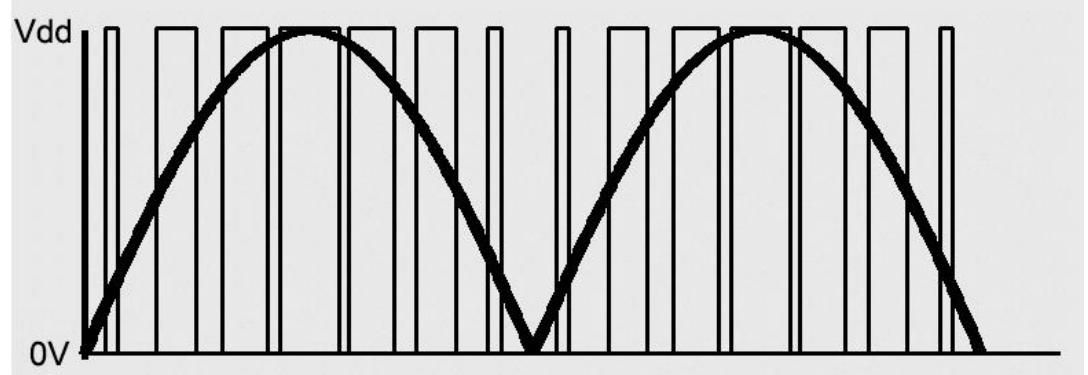
OVERSIKT

- Pulsbredde modulasjon (PWM)
- Steppermotor (fortsetter fra forrige forelesning)
 - Kommutering (repetisjon/ overgang)
 - Mikrostepping
 - Innsiden av en hybrid-steppermotor
 - Varianter
- Motordriverer
 - Transistortyper
 - H-BRU
 - Strømstyring
- Tannhjul og gir
 - Typer tannhjul
 - Kulemutter
 - Harmonic drive

PULSBREDDEMODULASJON (PWM)

Som regel er det upraktisk å generere analoge spenninger til motoren ved spenningsdeling, da dette gir mye tap av effekt og utvikling av varme.

For å unngå varmetap kan man 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 (>2kHz), så kan spolene i en motor utgjøre lavpassfilteret selv. Switchefrekvensen må være minst det dobbelte av signalfrekvensen, og man bruker gjerne noe høyere.

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

STEPPERMOTOR

(repetisjon)

Egenskaper

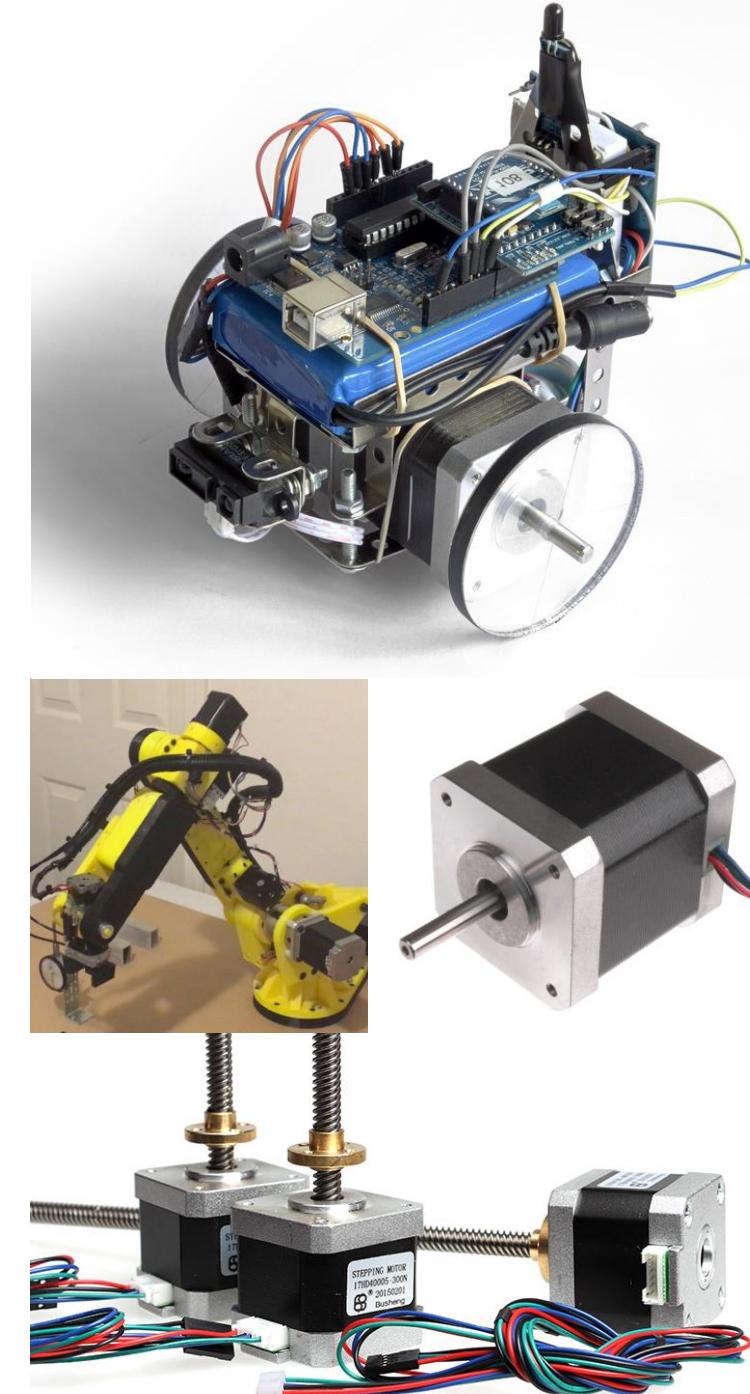
- Presis styring av akselvinkel uten behov for avlesning/sensorer - åpen sløyfe «open loop»
 - Aksel roterer inkrementelt en fast vinkel hver gang man sender en ny spenningskonfigurasjon til motoren
- Gir ofte et system med lav pris / enkel konstruksjon
- Høyt dreiemoment ved lave hastigheter, fullt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

Anvendelser

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

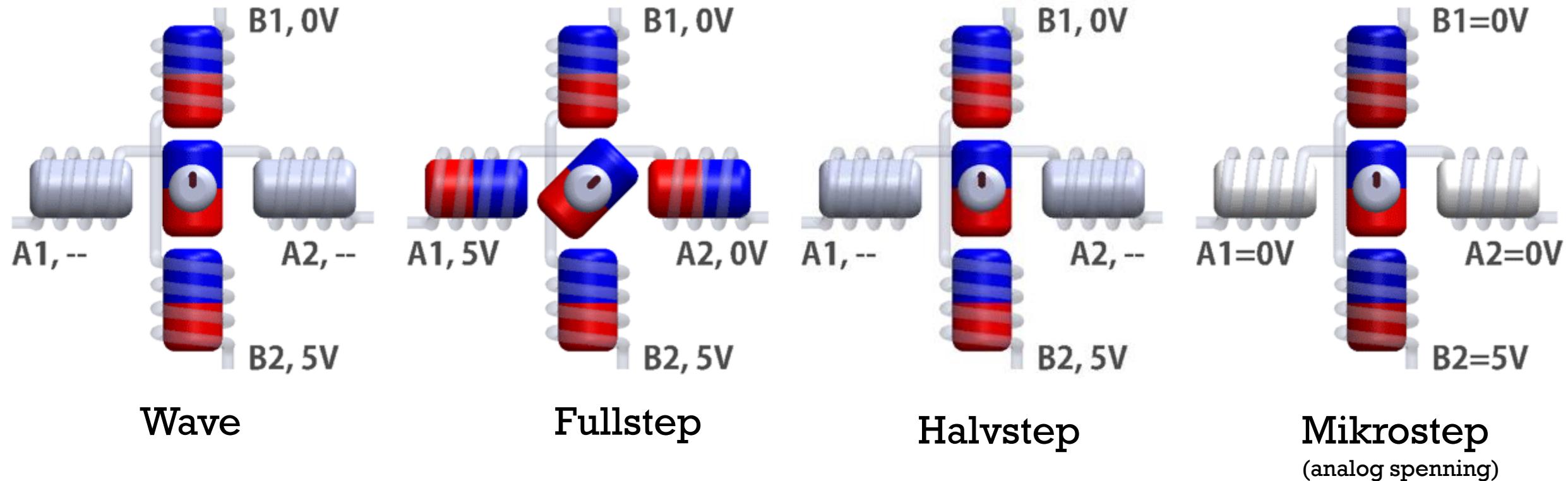
Begrensinger

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



OVERSIKT KOMMUTERING

(GIF-ANIMASJON)



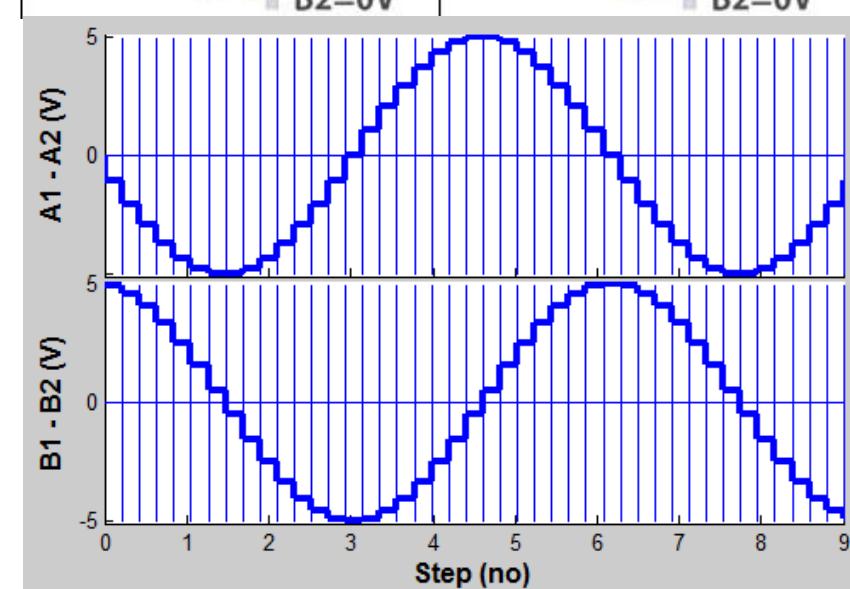
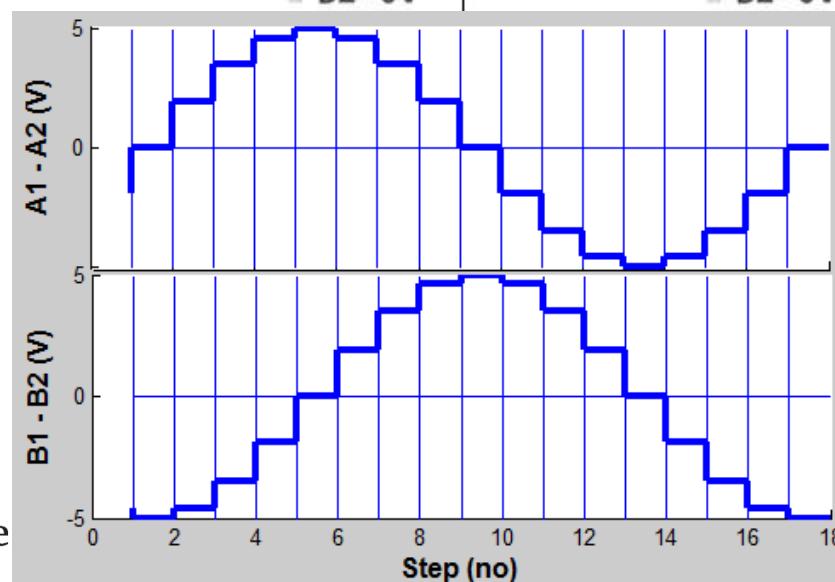
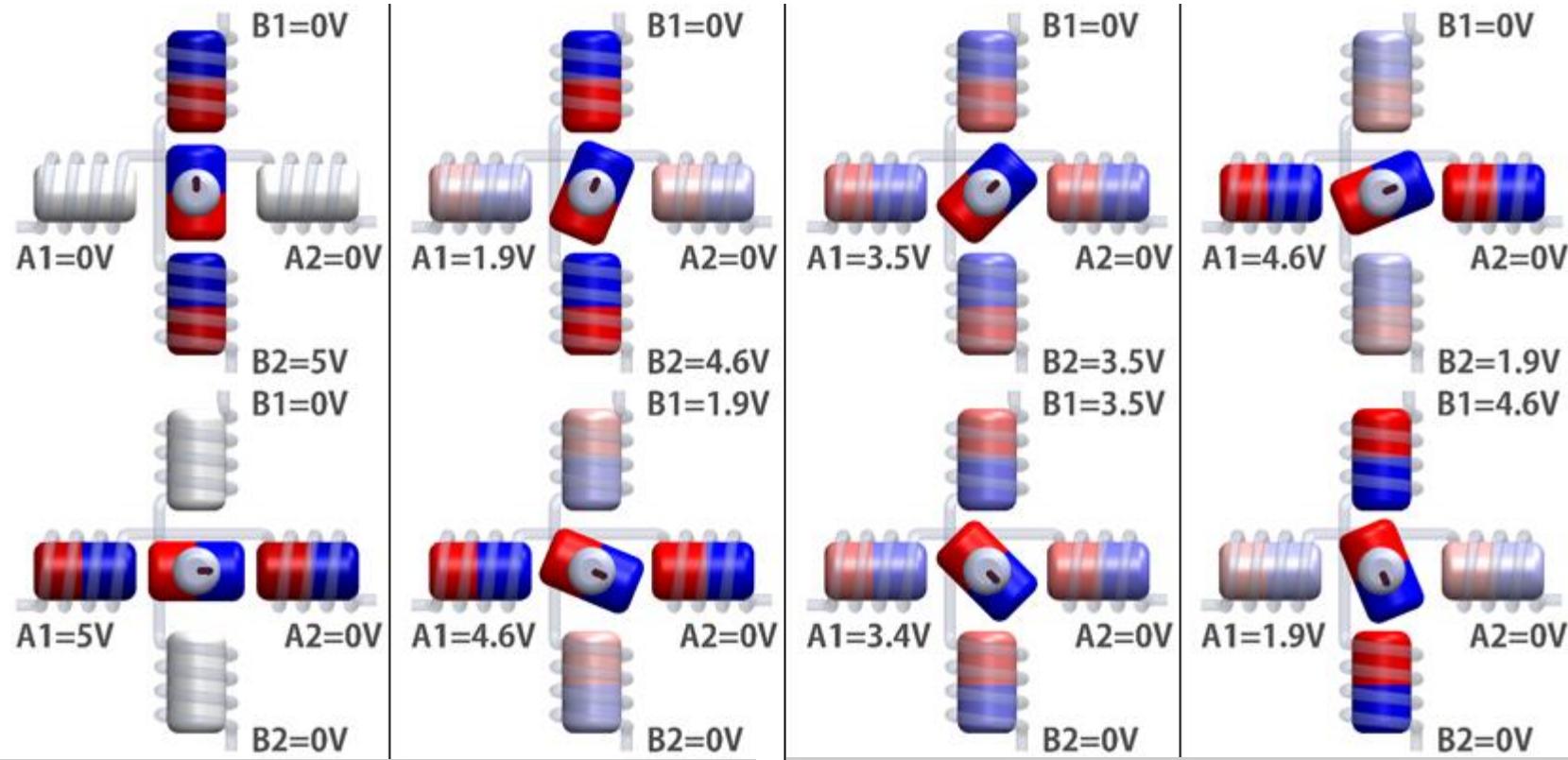
MIKROSTEPPING

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.



STEPPERMOTOR I PRAKSIS

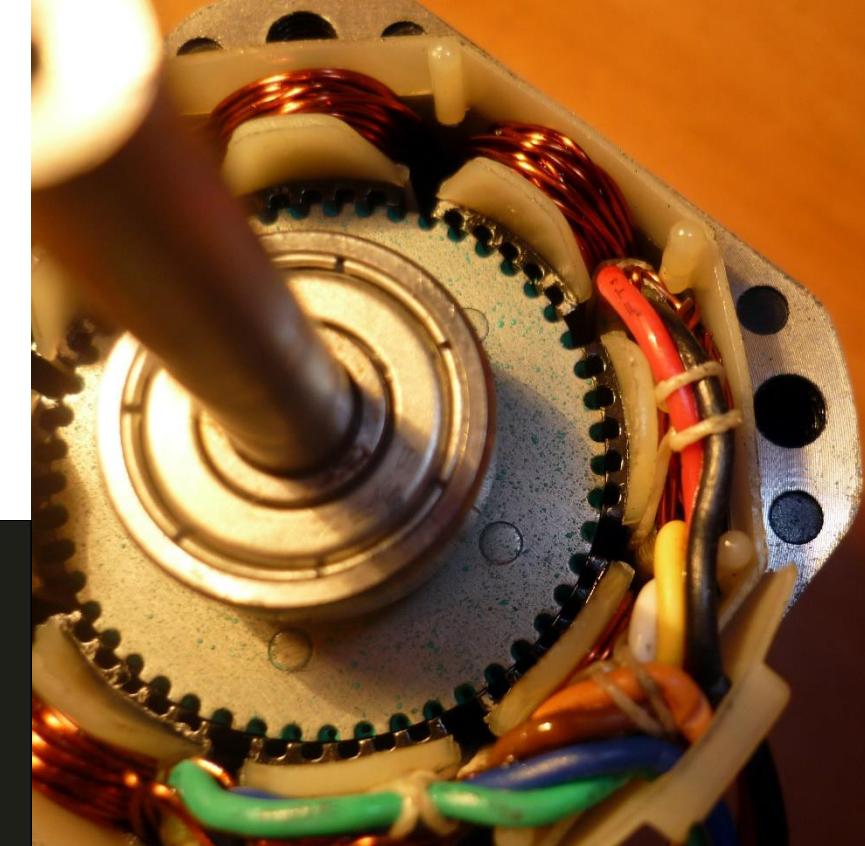
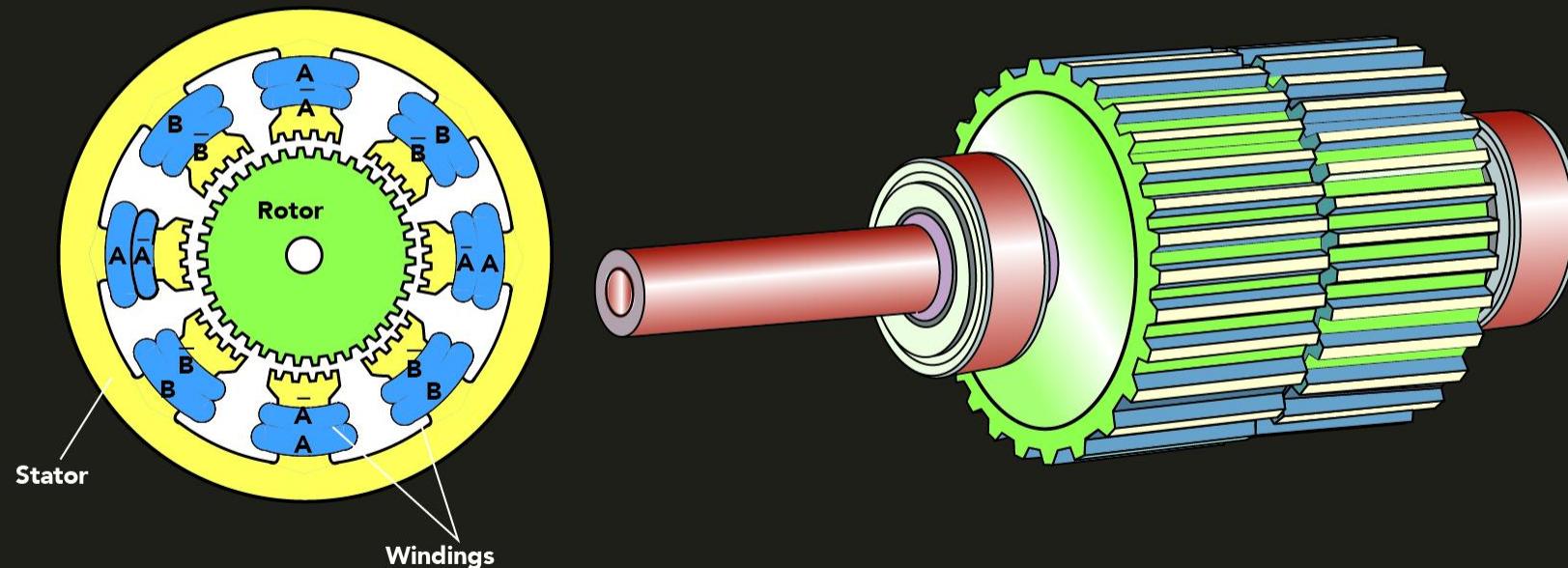
«HYBRID STEPPER MOTOR»

(«Hybrid» fordi den kombinerer prinsippet fra en reluktansemotor 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 - BIPOLEAR UNIPOLAR

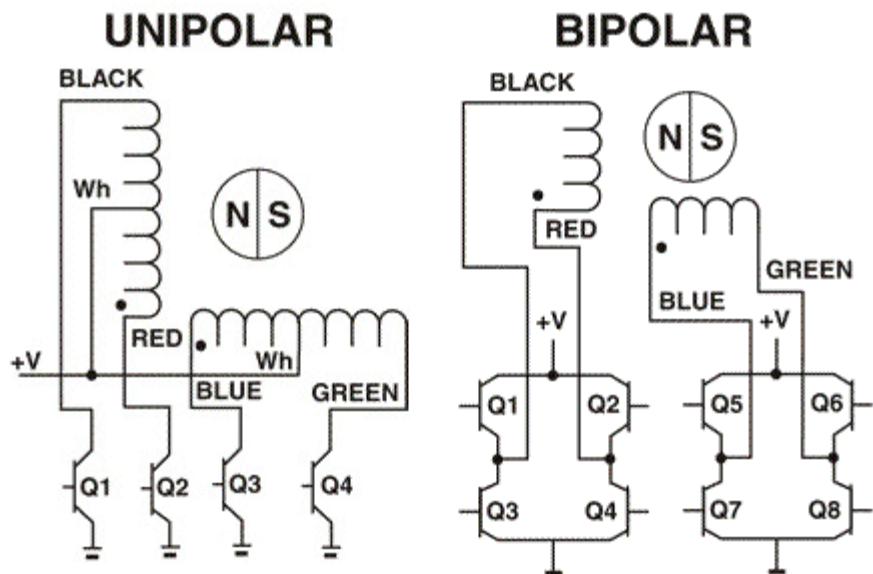
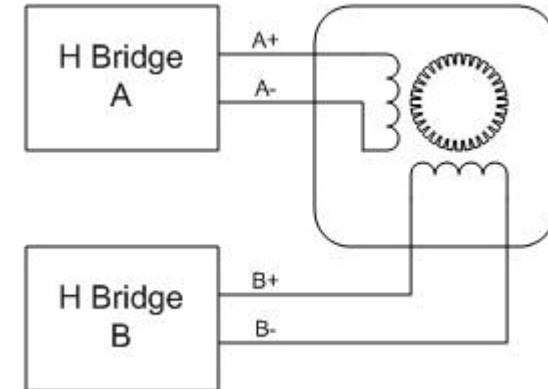
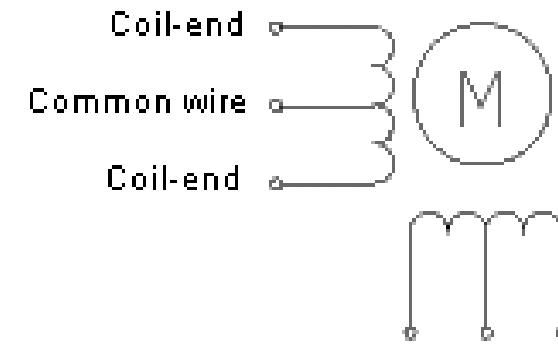
Vi kan dele steppermotorer i hovedsak i to typer:

- Unipolar:

- Strømmen drives kun i en retning gjennom hver spole
- Krever spoler med senter-tapp (eller to spoler på same sted)
- 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 bipolart...

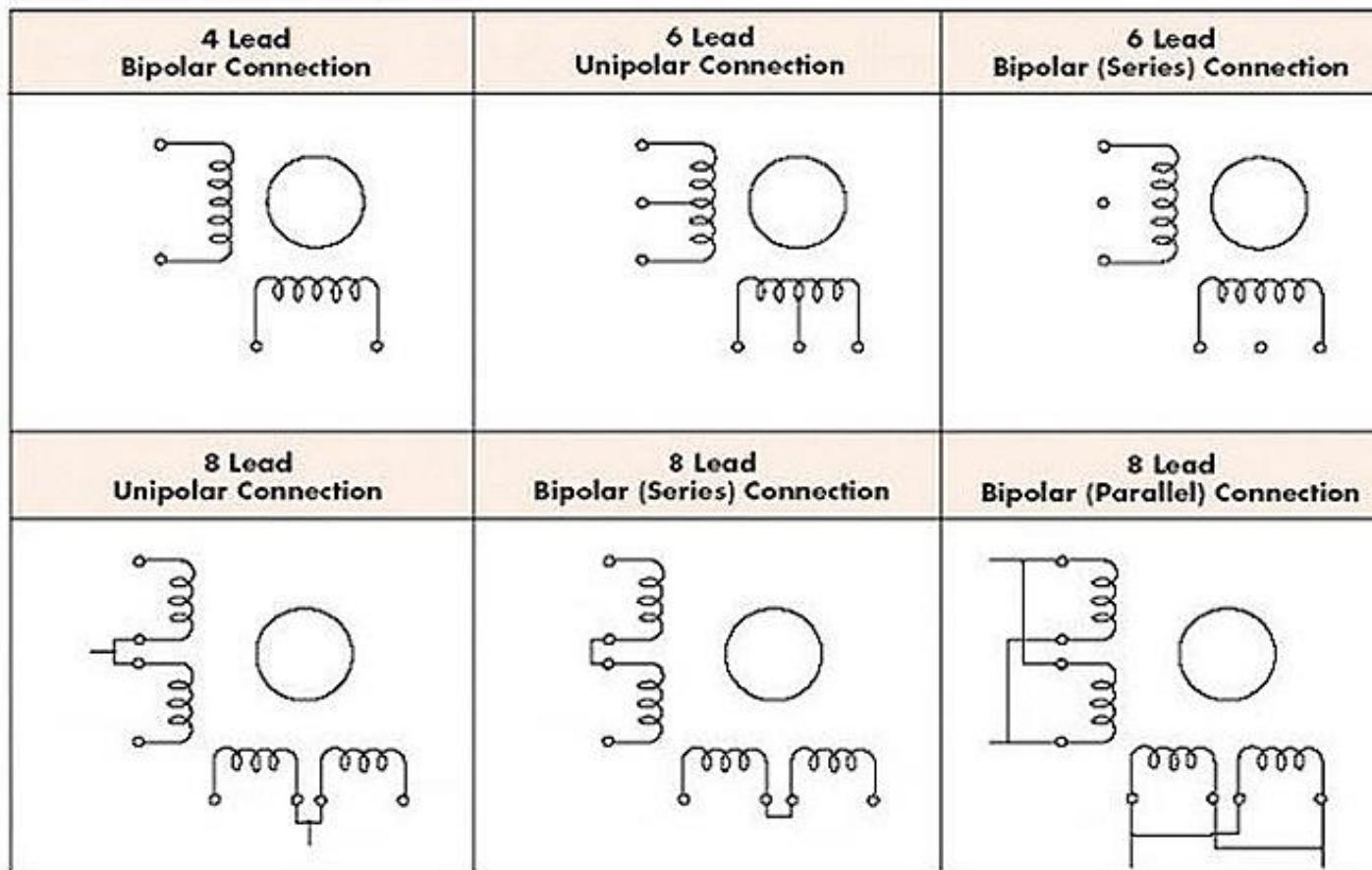
- Bipolar

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



VARIANTER STEPPERMOTORER

Wire Connection Diagrams

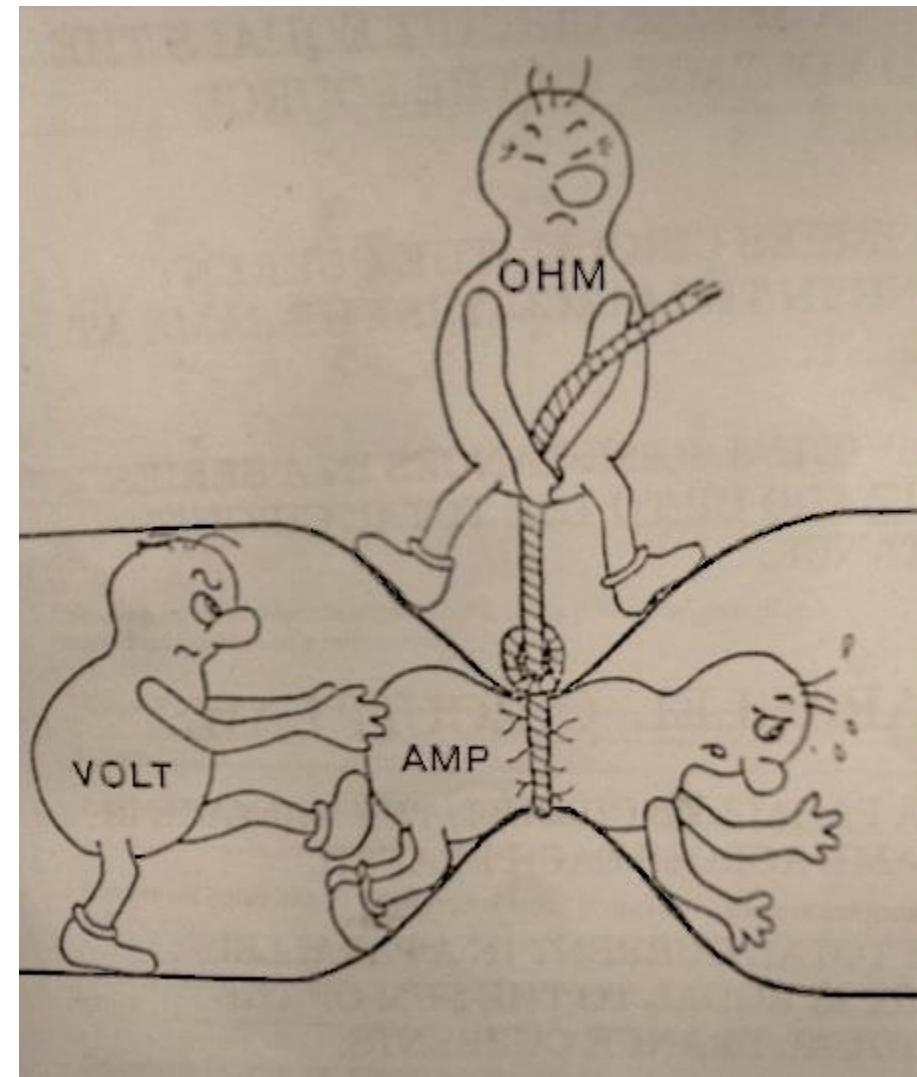


Hvis hver ende av hver spole i et unipolart system er tilgjengelig (8 lead connection), så kan man kjøre systemet bipolart og velge om man vil drive spolene parallellt eller i serie for å tilpasse impedansen til systemet.

HVORFOR MOTORDRIVERE...

Kan man drive en motor direkte fra en mikrokontroller? NEI!

- Motorer trekker typisk mer strøm enn pinnene til en mikrokontroller kan drive. Noen ganger kreves også høyere spenninger.
- Vi trenger spesialiserte kretser for å både beskytte mikrokontrolleren mot overbelastning og spenninger generert av induktive laster.
 - Disse kan være (mye) høyere enn spenningen som ble brukt for å få motoren opp i hastighet
- Tung last kan også senke forsyningsspenningen så mye at en mikrokontroller skrus av.
- Derfor må vi benytte dedikerte kretser som motordriver.



MOTORDRIVER - TRANSISTORER

Vanlige typer transistorer for å håndtere store strømmer/spenninger

Power MOSFET

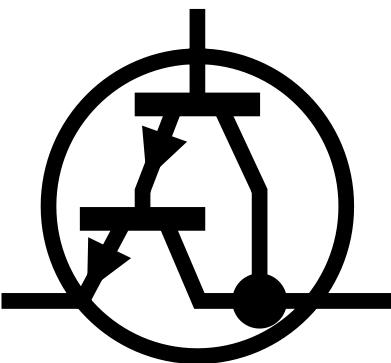
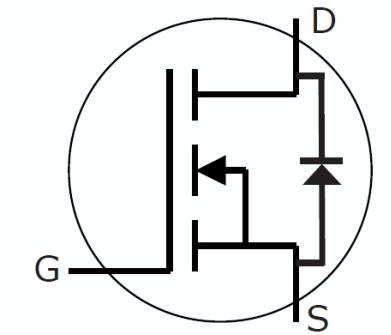
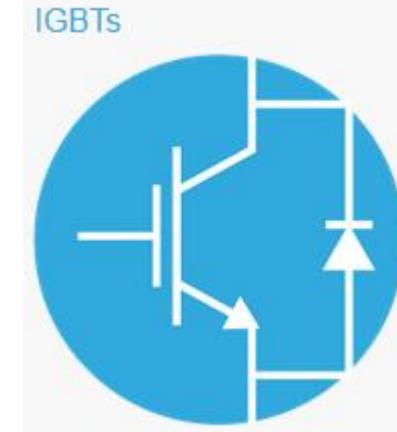
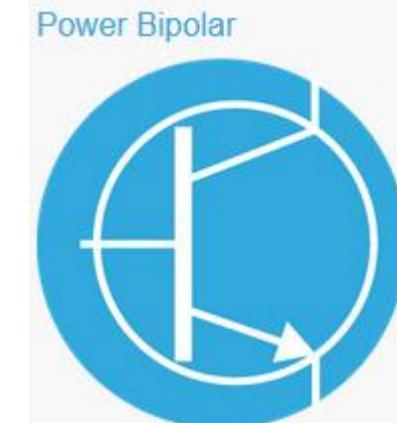
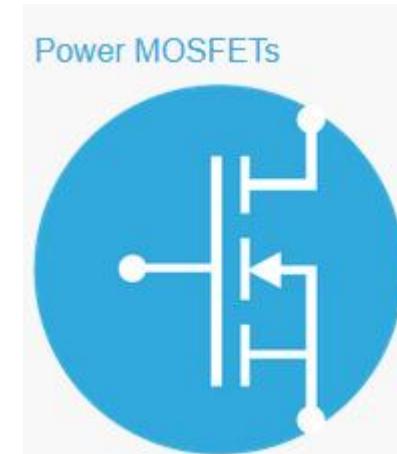
- Nesten ingen statisk styrestrøm på gate
- Gate kapasitansen kan være stor, kan gi utfordringer for trinnet som skal levere gatesignalet ved høye frekvenser
- Kan håndtere opp til 1000V / 100A
- Middels spenningsfall over utgangen under på-tilstand

Bipolar junction transistor (BJT)

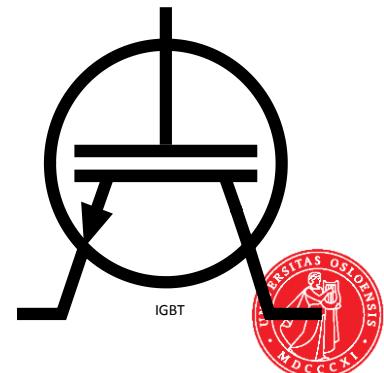
- Lav base kapasitans
- For å håndtere store strømmer trenger man en betydelig basestrøm. Darlington konfigurasjon kan redusere basestrømmen
- Lavt spenningsfall over utgangen under på-tilstand

Insulated-gate bipolar transistor (IGBT)

- Det beste fra MOSFET / BJT
- Relativt lavt spenningsfall over utgangen under på-tilstand
- Mindre gate kapasitans enn MOSFET og ingen statisk gate strøm
- Kan håndtere opp til 3000V / 1500A
- Lengre switchetid og større switchetap enn MOSFET



Darlington transistor



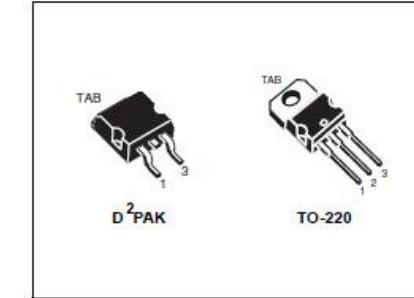
TRANSISTOR - DIGITAL VS ANALOG MODUS

Tilstand	Gatespenning MOSFET, IGBT/ Basestrøm BJT	Egenskaper
Åpen	0	Effekttapet over transistoren blir da 0W siden det ikke går noe strøm
Lukket	Max	Hvis spenningsfallet over utgangen er 0V blir effekttapet over transistoren 0W da det ikke er noen spenning over transistoren ($P=VI$) I praksis vil det bli et lite spenningsfall over utgangen og dermed blir effekttapet: $\text{spenningsfallet} \cdot \text{utgangstrøm}$
Delvis åpen/ lukket	<0-Max>	I denne tilstanden vil effekttapet over transistorer kunne være veldig høyt. Vi får <u>alltid et visst tap ved switching mellom tilstander</u> , avhengig av tiden det tar å skifte tilstand. Normalt ønsker vi å minimere switchetiden.



STB120N10F4,
STP120N10F4
N-channel 100 V, 8 mΩ typ., 120 A, STripFET™ DeepGATE™ Power MOSFETs in D²PAK and TO-220 packages

Datasheet – production data



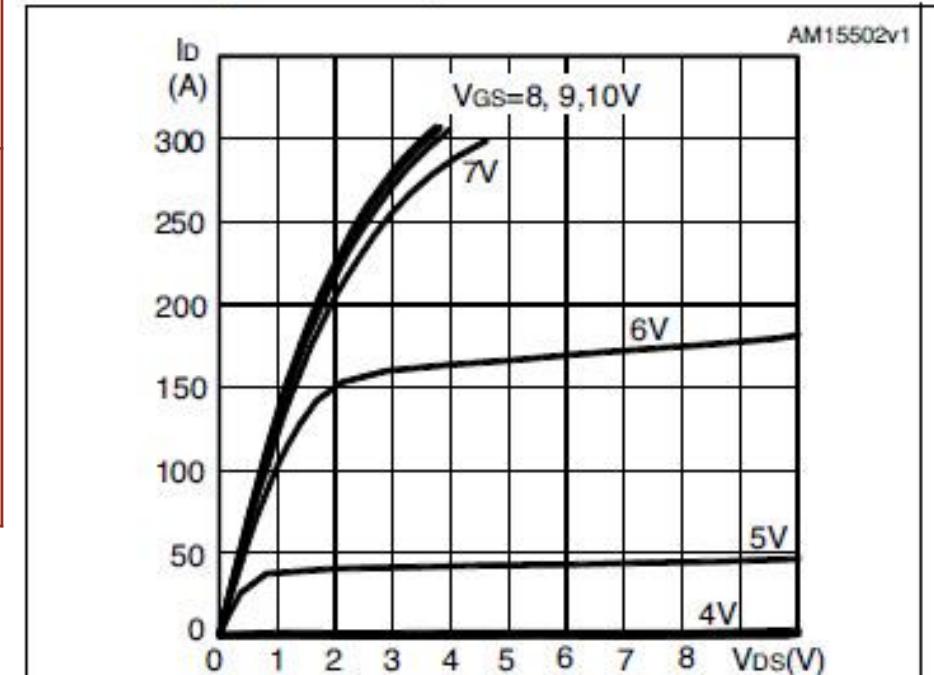
Features

Order codes	V _{DS}	R _{DS(on)} max.	I _D
STB120N10F4	100 V	10 mΩ	120 A
STP120N10F4			

- N-channel enhancement mode
- Very low on-resistance
- Low gate charge
- 100% avalanche rated

Applications

Figure 4. Output characteristics

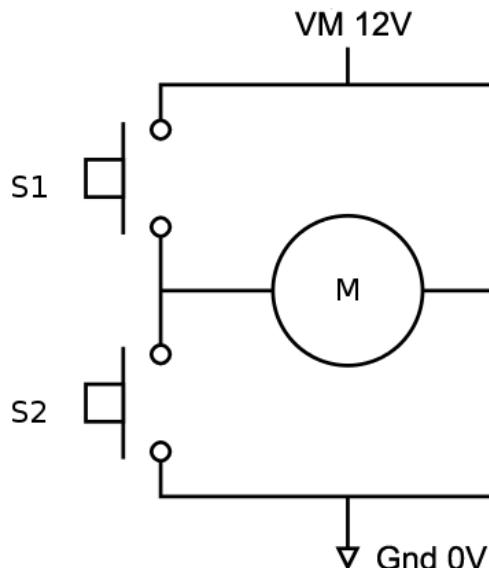


H-BRO «H-BRIDGE»

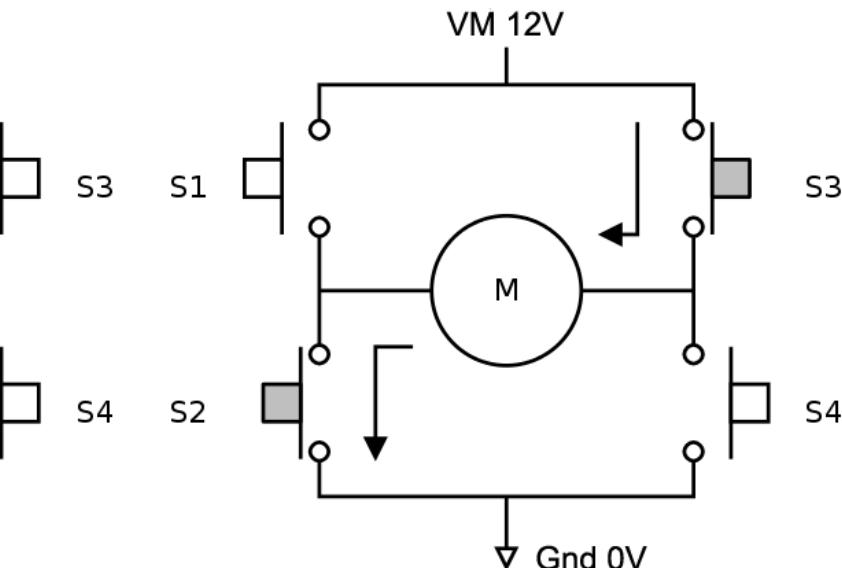
En H-Bro brukes til å forsyne en last med bidireksjonal strøm. En H-Bru kan brukes når vi har høy spenning eller -strømstyrke

H-broen har I hovedsak fire tilstander som kan styres av transistorene S1, S2, S3 og S4:

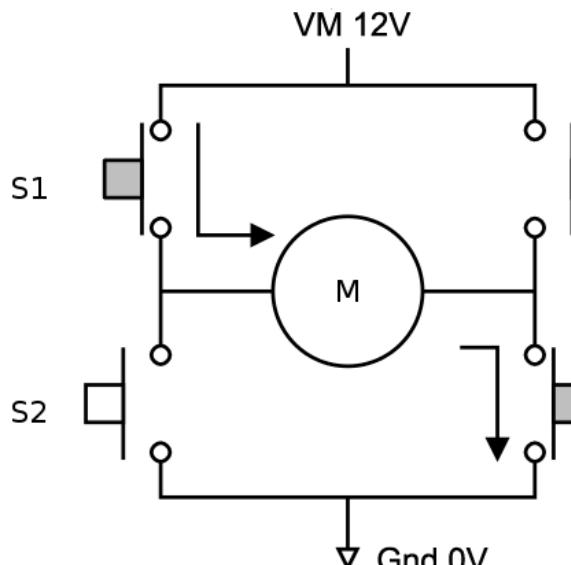
- Høy-impedanse (Free running state): Motoren er koblet fra driveren
- Brems (Brake state): Begge sider av motoren er koblet til strømforsyning (eller begge til jord). Dette vil bremse motoren da det induseres strøm i spolene ved rotasjon.
- Forover (Forward state): Motoren er koblet til strømforsyningen i foroverretning.
- Revers (Reverse state): Motoren får strøm i omvendt rekkefølge av foroverretningen.



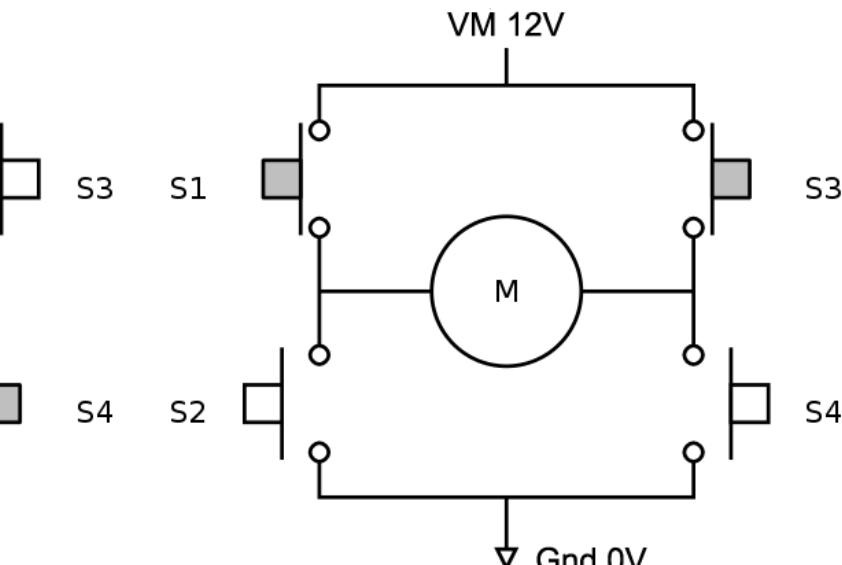
(a) Free Running State



(b) Reverse State



(c) Forward State



(d) Brake State

H-Bru eksempel: TB6612FNG

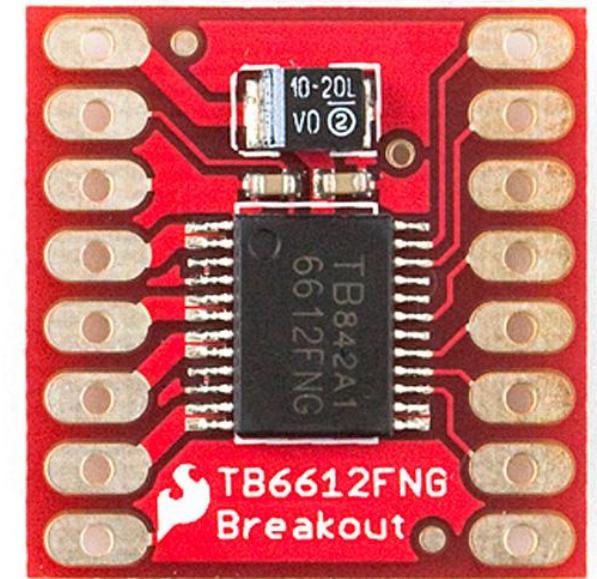
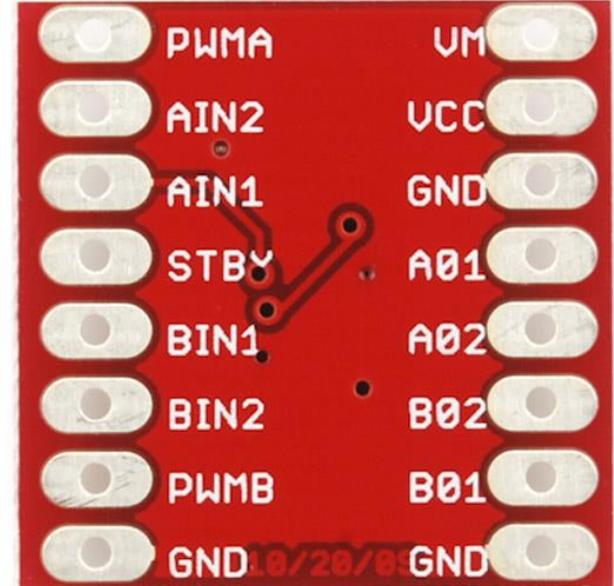
I den obligatoriske oppgaven i denne delen vil vi benytte en TB6612FNG dobbel H-bru fra Sparkfun (se bildet).

Den benyttes fordi den er

- kompakt og robust
- Ett kort inneholder 2 H-bruer (A/B),
 - kan styre én bipolar steppermotor, eventuelt to DC-motorer eller magnetventiler

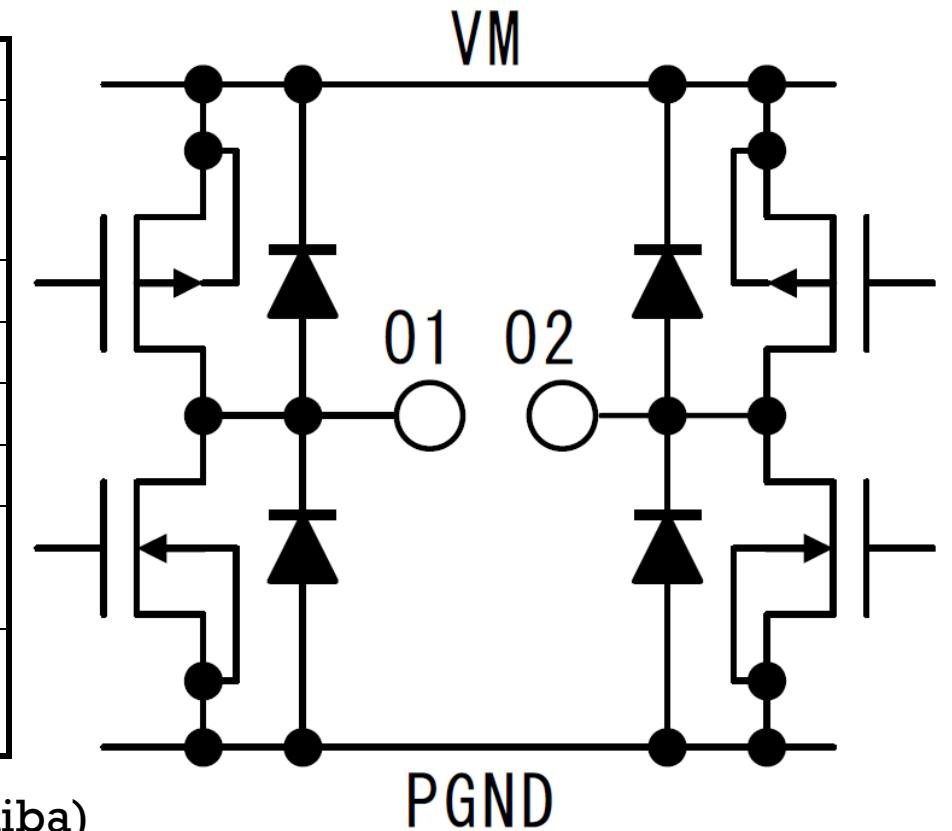
Pinner:

- AINx/BINx/PWMx/STBY: logiske kontrolllinnganger
- VM: forsyningsspenning til motor / H-bru (typisk 5 - 12V)
- Vcc: Forsyningsspenning fra mikrokontroller (arduino), og for intern logikk i H-Bru : 5V
- A01/2, B01/2 H-bru output (til motor el.)



H BRU : TB6612FNG

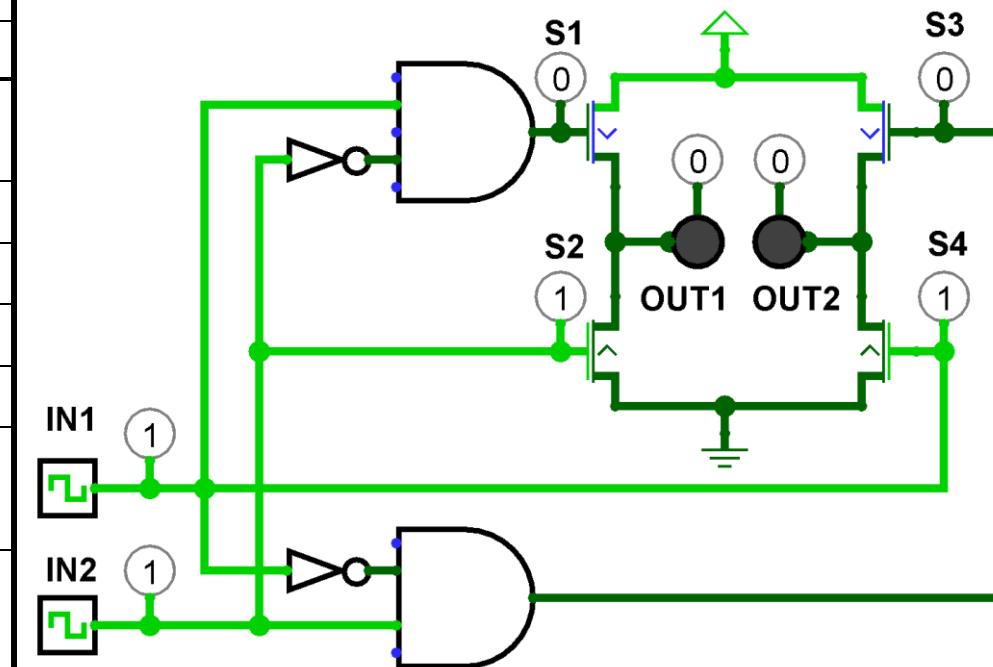
Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby



Kilde: Datablad TB6612FNG (Toshiba)

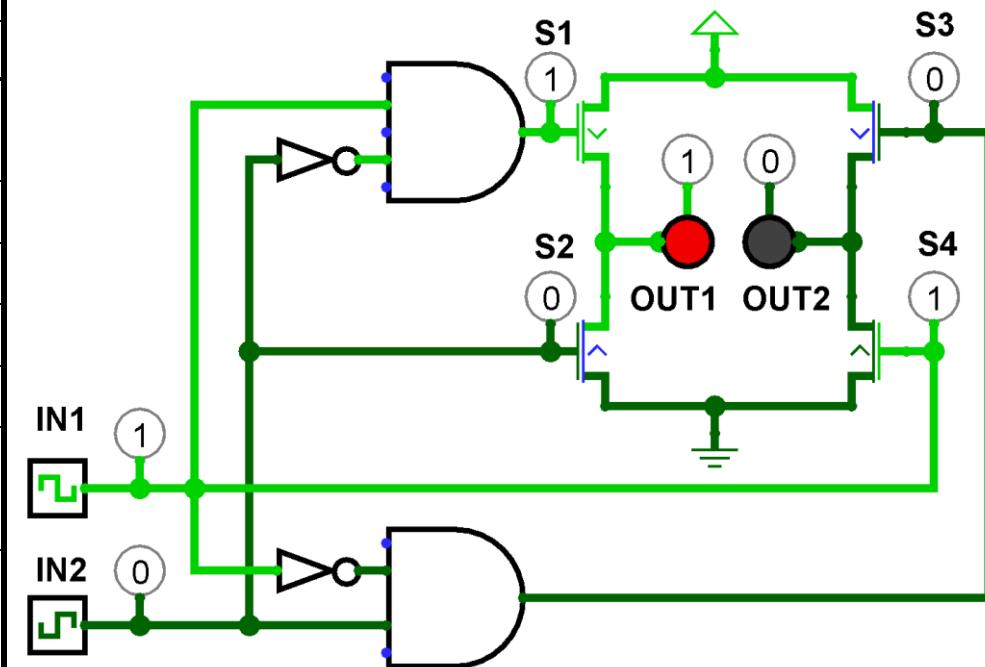
H BRU- BREMS (SHORT BRAKE)

Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby



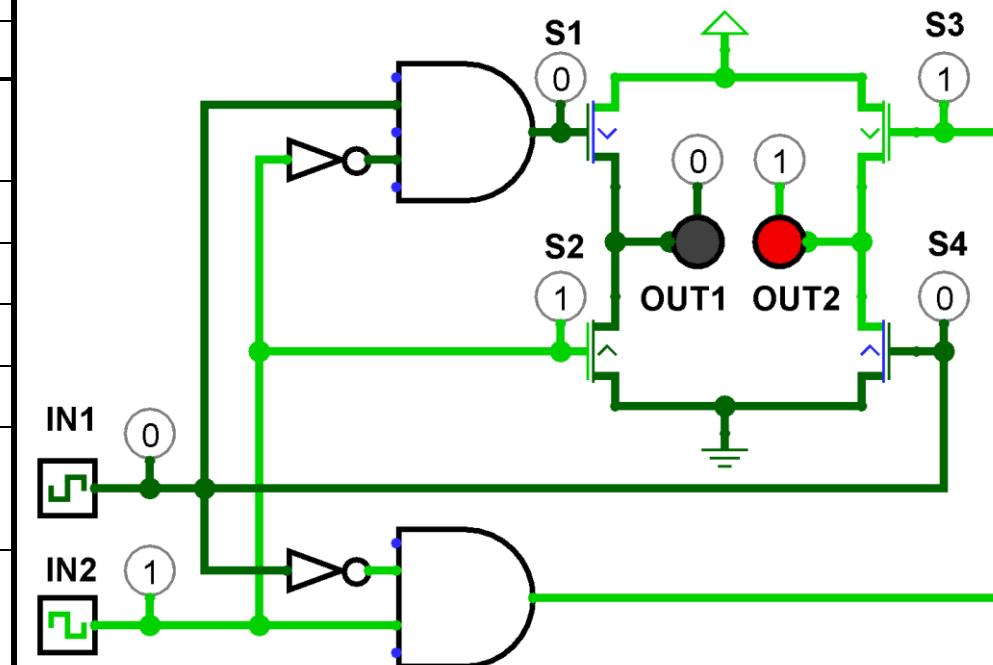
H BRU – FOROVER (CW)

Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby



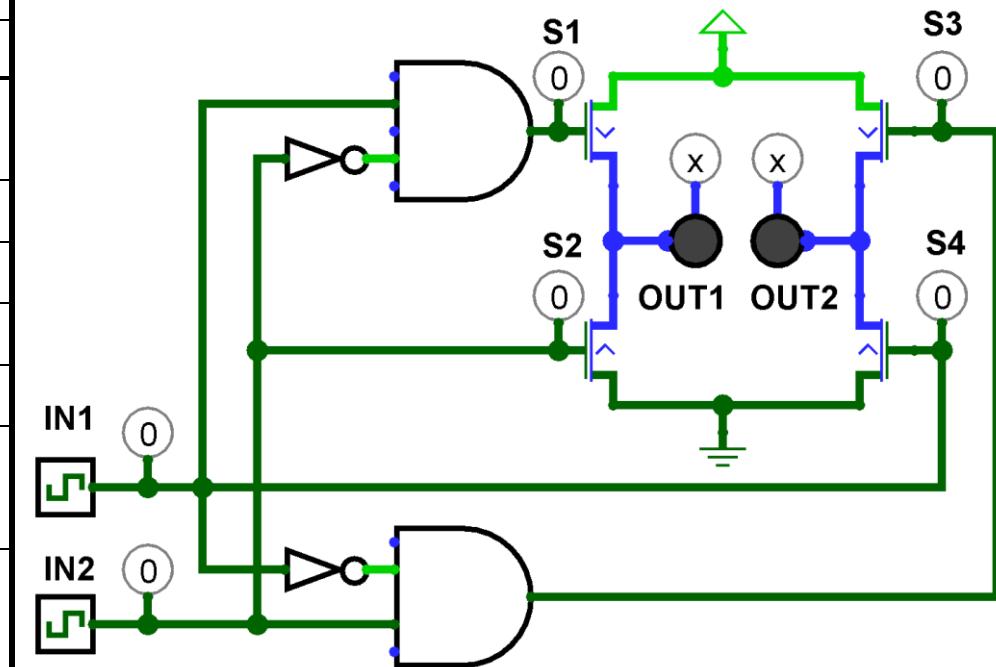
H BRU – REVERS (CCW)

Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby



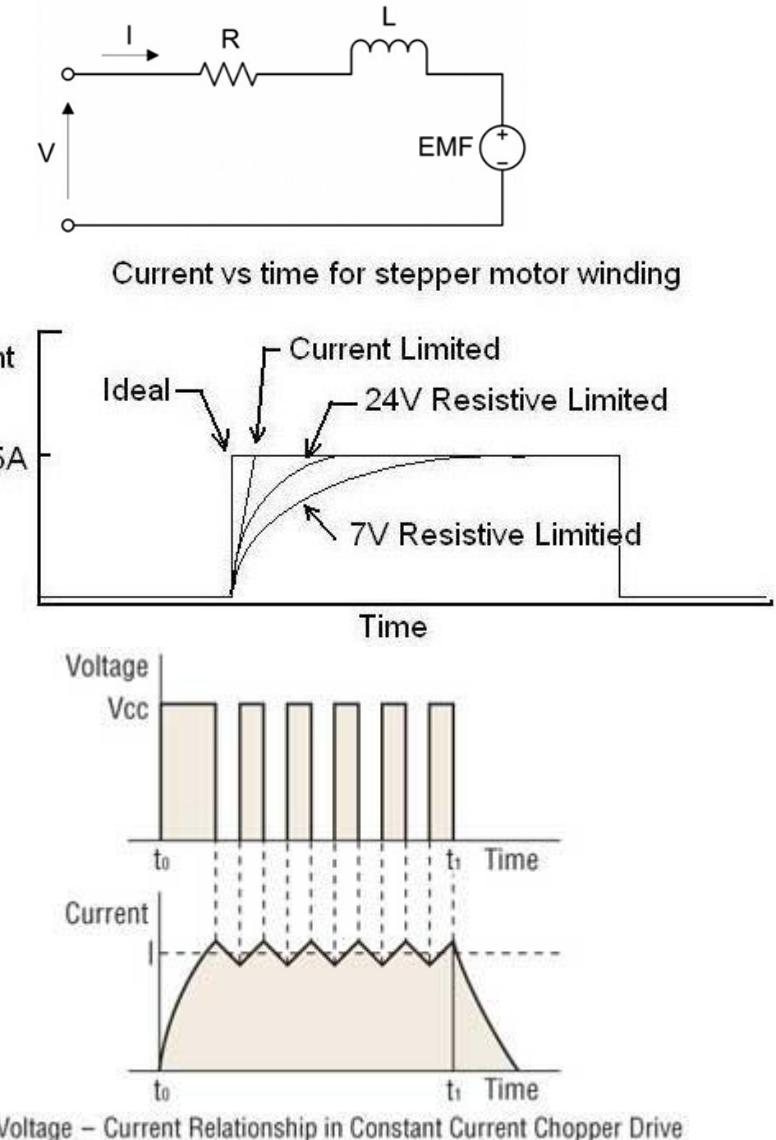
H BRU – HØY IMPEDANSE (TRI-STATE/ HIGH IMPEDANCE)

Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby



STRØMSTYRING AV STEPPERMOTOR

- Spolene i en steppermotor kan modelleres som en induktans i serie med en motstand (+ en indusert spenning). Dette betyr at når man setter på en ny spenning tar det litt tid før strømmen kommer opp i ønsket verdi. Siden dreiemomentet er proporsjonalt med strømmen vil dreiemomentet bli redusert for høye stepfrekvenser.
- 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 kompensere for spenningsfallet over motstanden med å øke forsyningsspenningen, vil man få en forsyningskilde som oppfører seg som en konstant strømkilde. Ulempen er effekttap i seriemotstanden
 - Ved å måle strømmen gjennom motoren kan man ved hjelp av PWM og strømregulering lage en konstant strømforsyning



STRØMSTYRT MOTORDRIVER - EASYDRIVER

EasyDriver: En billig, enkel å bruke, strøm (PWM) regulert motordriver med innebygd mikrostep generator

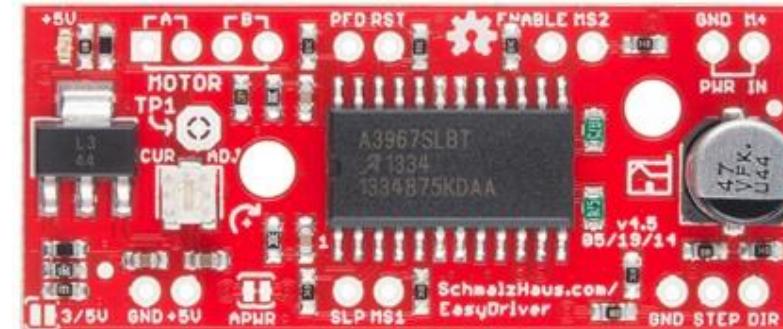
Kommunikasjonsspinner:

- **STEP**: kjører motoren et stepp (eller ett mikrostep hvis spesifisert) fram eller tilbake på stigende flanke
- **DIR**: "Høy" eller "lav", spesifiserer om motoren skal rotere med eller mot klokka når STEP går høy

Dette er i prinsippet alt som trengs for å kjøre en steppermotor med EasyDriver.

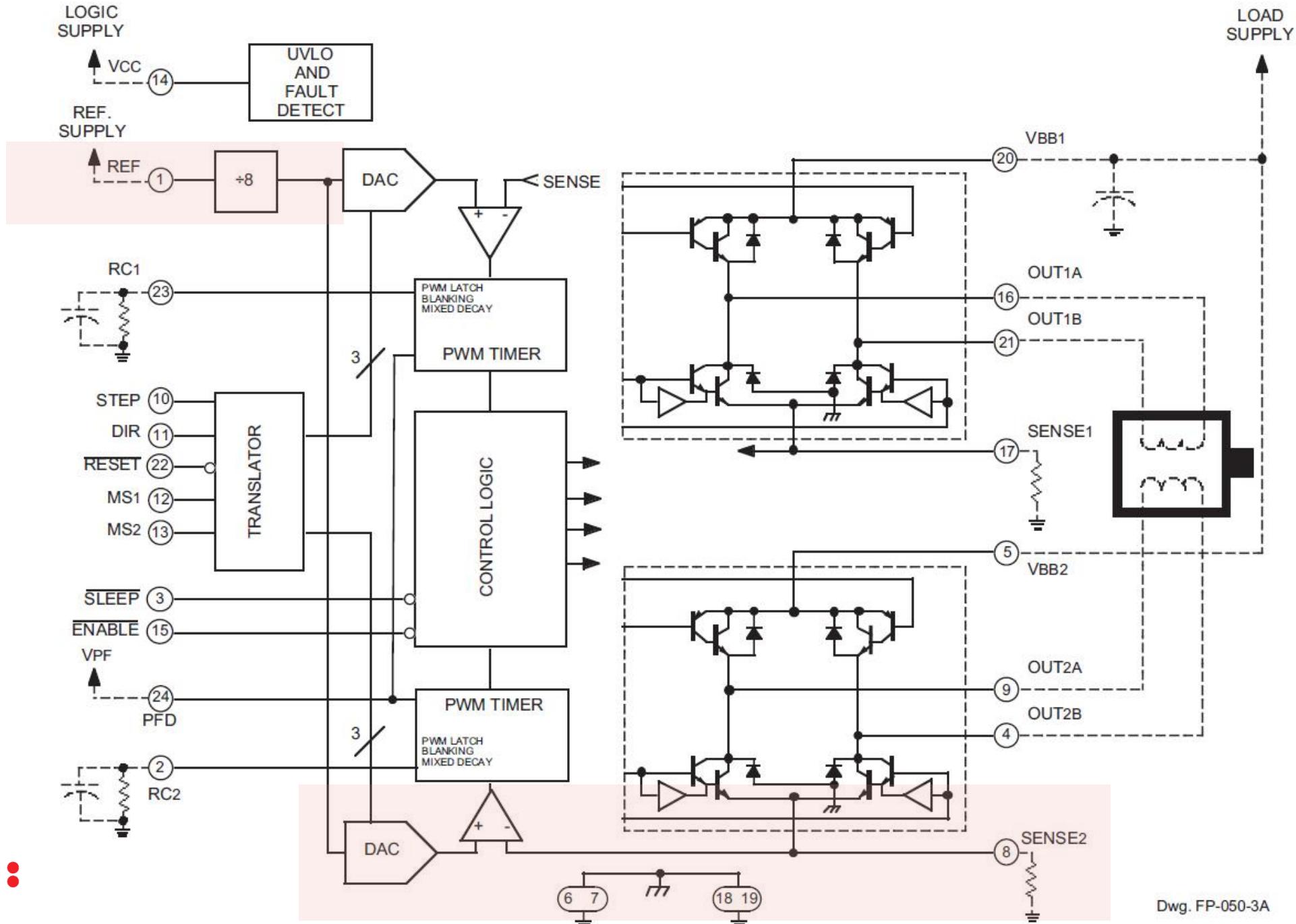
For å spesifisere antall mikrostep man vil benytte brukes pinne MS1 og MS2 slik som vist i tabellen

Siden driveren er strømregulert kan man koble den til en forsyningsspenning på maksimum 30V, selv om steppermotoren har en maksimum spesifisert spenning på 12V. Strømmen kan justeres opp til 750mA. Dess høyere forsyningsspenning man bruker dess mer jevn kan strømmen reguleres



MS1	MS2	Resolution
L	L	Full step (2 phase)
H	L	Half step
L	H	Quarter step
H	H	Eighth step

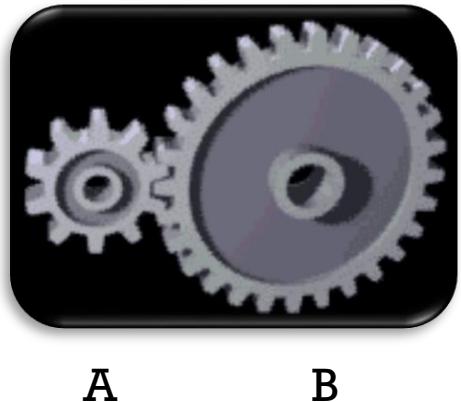
- Skjema neste foil



GIR OG TÅNNHJUL

Sammenheng mellom vinkelhastighet (ω) og antall tenner (N), og utveksling/dreiemoment (τ) :

$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{N_B}{N_A} = \frac{\tau_B}{\tau_A}$$



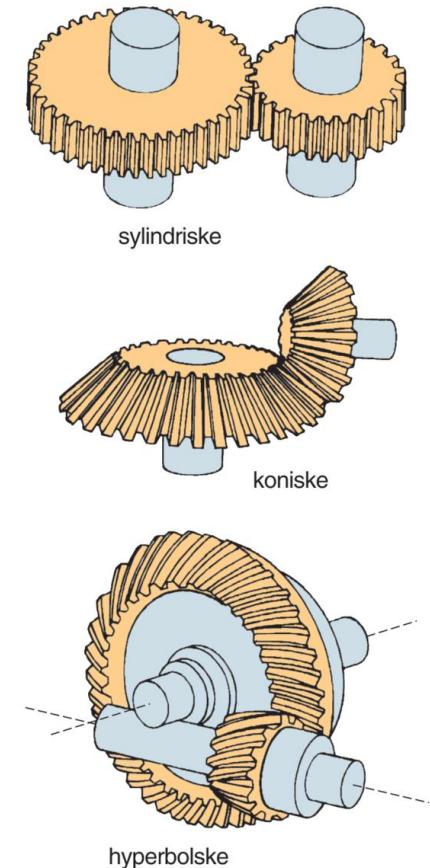
Her: $N_A = 10$, $N_B = 28$

$$\Rightarrow \tau_B = \tau_A \cdot \frac{28}{10} = 2,8 \cdot \tau_A$$

- Sylinderiske tannhjul brukes for parallelle akser
- Koniske tannhjul brukes når aksene er i samme plan
- Hyperbolske tannhjul brukes når aksene er i ulike plan

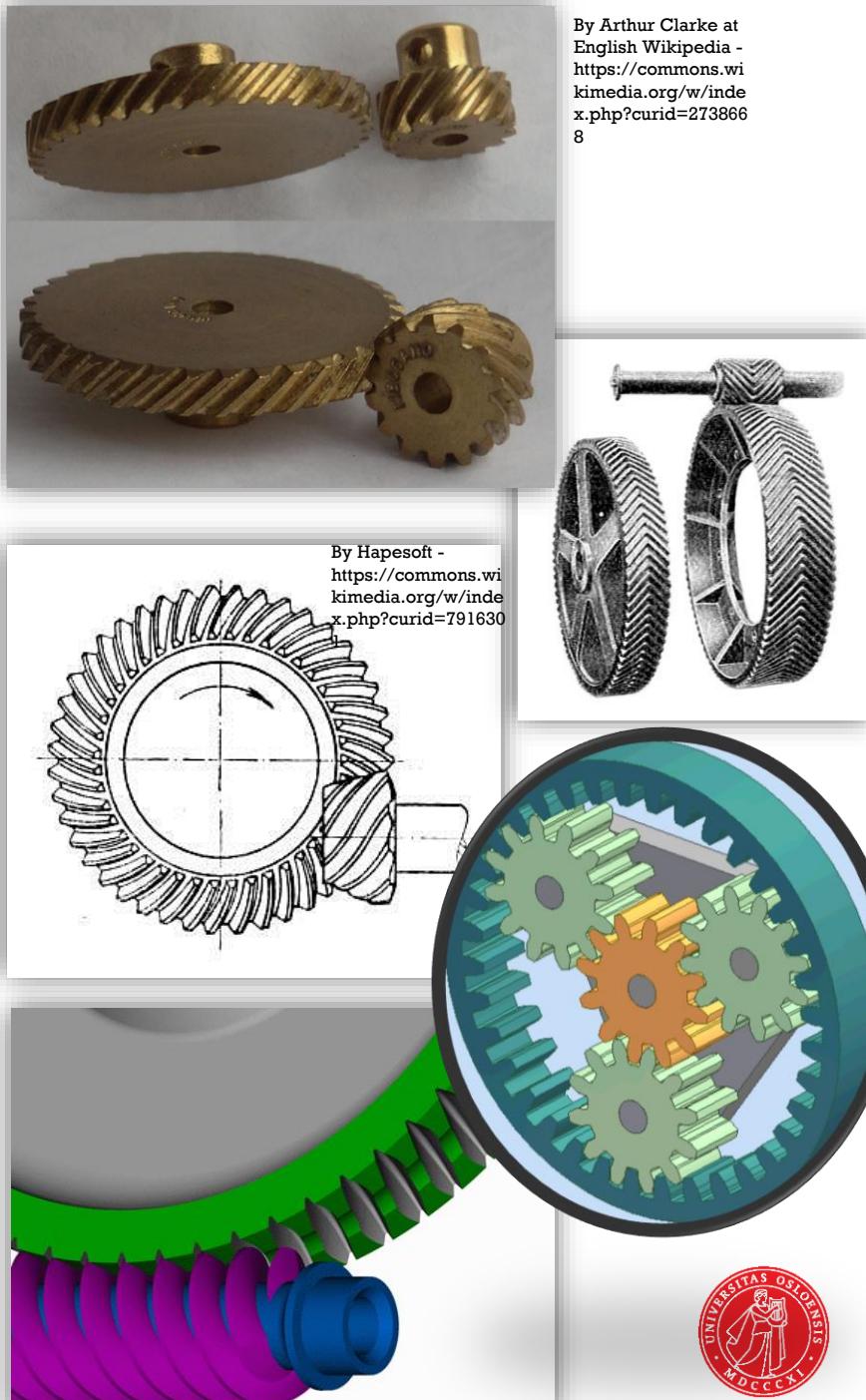
«Backlash»/ Dødgang/ klaring/slark

- Alle tannhjul og gir har noe backlash, både for å kunne gli og for å kunne fungere ved ulike temperaturer.



TYPER TANHJUL

- “Spur gears”: Klassiske tannhjul med rette tenner. Gir lav utveksling, typisk < 10:1.
- Heliske tannhjul, fungerer som klassiske tannhjul, men gir mindre vibrasjon og mindre støy siden de tar tak mer gradvis. Dette gjør dem egnet for applikasjoner med høyere rotasjonshastighet og større krefter. Heliske gir kan brukes i to konfigurasjoner som vist på bildet. Ulempen er kreftene som går i aksiell retning.
- Dobbelt-heliske tannhjul fungerer som heliske tannhjul uten krefter i aksiell retning, men kan ikke kobles med normale akser. Avhengig av retning, vil formen søke å stabilisere eller destabilisere tannhjulet dersom tannhjulene ikke treffer helt sentrert.
- Hypoide tannhjul: Ligner heliske tannhjul, men tennene har hyperbolsk overflate som gir glattere og stillere enn heliske tannhjul. Brukes oftest med akselvinkel på 90 grader. Eksempel på bruk: differensial til biler.
- Planetgir: Lasten i et planetgir deles mellom flere tannhjul, og gir således mulighet for økt dreiemoment. Planetgiret har bedre stabilitet grunnet symmetri og bedret rotasjonsstivhet. Planetgir finns i mange varianter, og brukes f.eks i tradisjonelle automatgirbokser
<https://www.youtube.com/watch?v=ARd-0m2VyiE>
- Ormegir “Worm gear”: Ormegir kan gi høy utveksling men det er bare “ormen” som kan drive tannhjulet. Typisk utveksling 10:1 til 500:1. Gir høy friksjon og krever smøring.



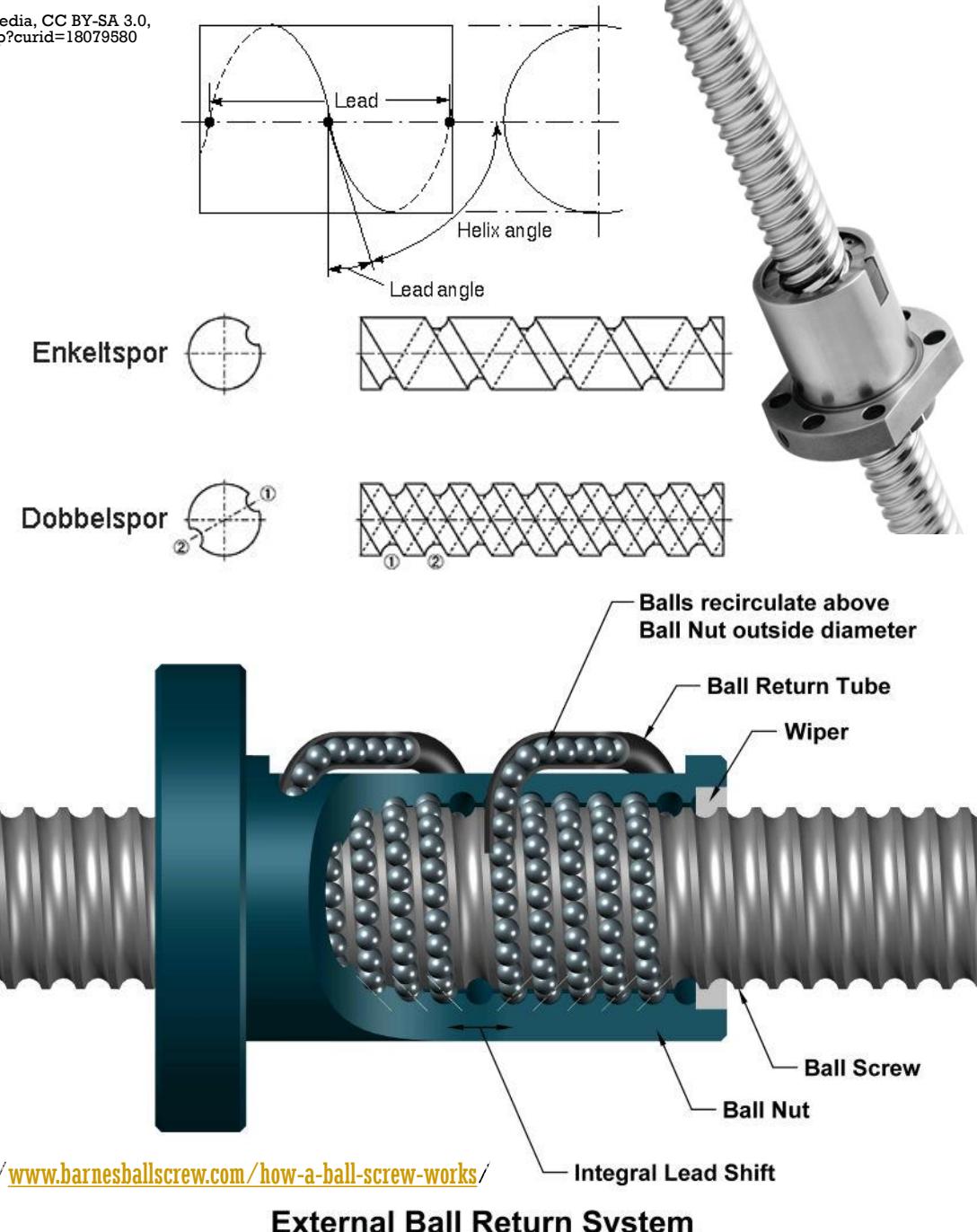
By Arthur Clarke at English Wikipedia - <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2738668>

Kulemutter «Ball Nut»

- Kulelagret mutter på gjengestang. Omformer fra rotasjon til lineær bevegelse med høy utveksling.
- Fins også i varianter uten kuler:
Glidemutter/ «Leadscrew»
 - benytter lavfriksjons plast som glir mot en polert gjengestang i stål eller aluminium
 - I prosjekt 3, IN1080, bruker vi en vanlig mutter på gjengestang
 - Stangen til glidemutter har gjerne rette spor
- Gjengestenger kan både være basert på ett eller flere spor
- Begreper:
 - **Lead:** aksiell distanse per omdreining av mutteren
 - **Pitch:** avstand mellom hvert spor i gjengestangens lengderetning (aksiell distanse)
 - "Lead" = "pitch" · antall spor
- Dreiemoment i Nm som skal til for å generere en kraft F (ved null friksjon) er:

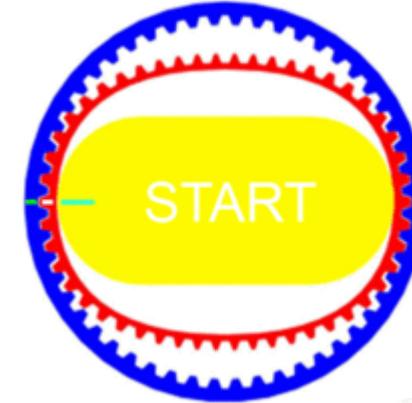
$$\tau = P \cdot F / 2\pi$$

der P er "lead" i meter

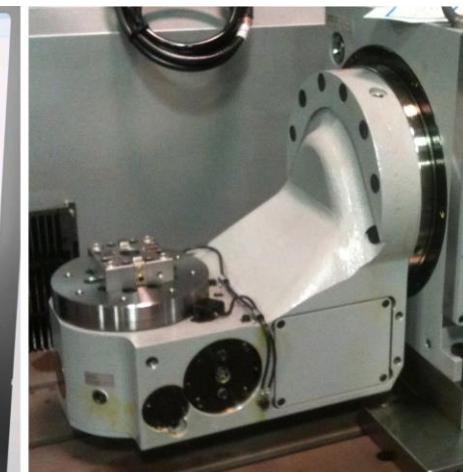


«Harmonic Drive»

- Harmonic drive gir svært stor utveksling
- Nesten ikke backlash
- Kan brukes ved høye dreiemoment
- Brukes typisk i CNC maskiner og roboter.
- Består typisk av tre deler:
 - En roterende oval i midten “wave generator”
 - En fleksibel del “flexible spline” i midten, og
 - En ytre tannring som typisk har 2 ekstra tenner sammenlignet med midtdelen.
- Utveksling (reduksjon) $r = \frac{T_{fs} - T_{yr}}{T_{fs}}$ der T_{fs} er antallet tenner i den fleksible delen og T_{yr} er antallet tenner i den ytre ringen.
- Typisk utveksling
- Kan være hul, slik at rør og wire kan slippe gjennom.
- Kan lett kombineres med enkodere eller bremser.



[Video](#)



«CYCLOID / HYPOCYCLOID»

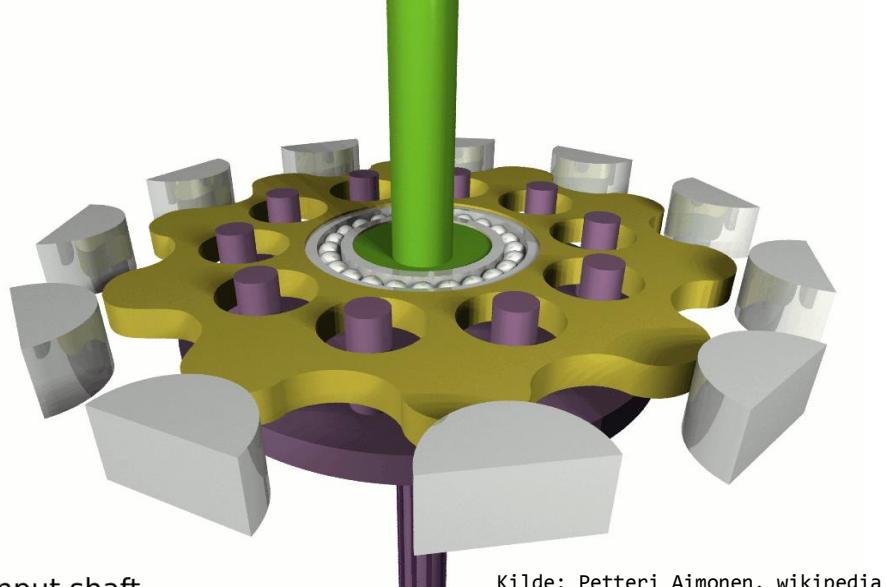
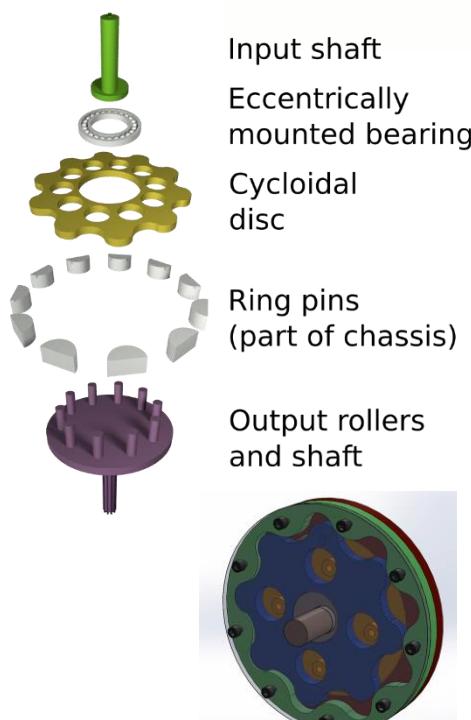
To typer gir kan også konkurrere med Harmonic Drive:

- **Cycloid drive:**

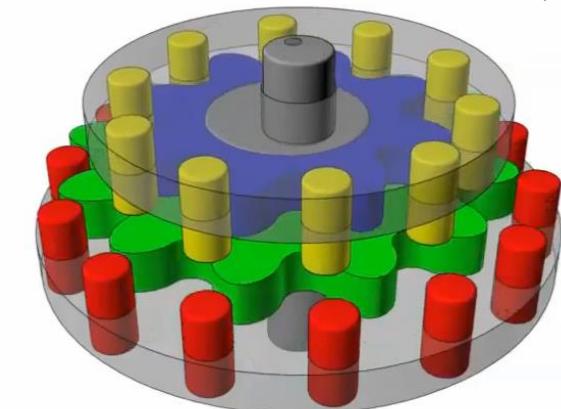
- Er basert på en aksel koblet til et eksentrisk kulelager som driver den hullete skiven "cycloid disk" rundt. Siden skiven holdes av pinnene som sitter i rammen, vil den også drive pinnene i skiven under. Evt kan pinnedisken stå stille og rammen drives rundt.
- Utvekslingen er gitt ved formelen: $r = \frac{P-L}{L}$ der P er antallet pinner i rammen og L er antallet lober på den hullete skiven. (Her $r = 1/10$ dvs girredusjon 10:1)
- Utveksling
- Fordeler: Kraften overføres med rulling fremfor glidning
- Ulemper:
 - Kan ikke drives baklengs (ikke brukbar til å gire opp hastighet)
 - Genererer vibrasjon fordi den er asymmetrisk.

- **Hypocycloid drive:**

- Virker omrent som cycloid drive, men uten (nødvendigvis) å benytte pinner og hull.
- Bruker to ytre ringer med forskjellig (indre) diameter og en indre disk med to lag med forskjellig antall lober.
- IA20 roboten vår med 7 akser var basert på Harmonic drive, mens senere versjoner har kommet med cycloid / hypocycloid drive.
- Cycloid og Hypocycloid drive har vært populært I DIY CNC miljøer, fordi det er mulig å få til. Det kan også lages med 3D printer, men søker viser at mange gjør det med vekslende hell.

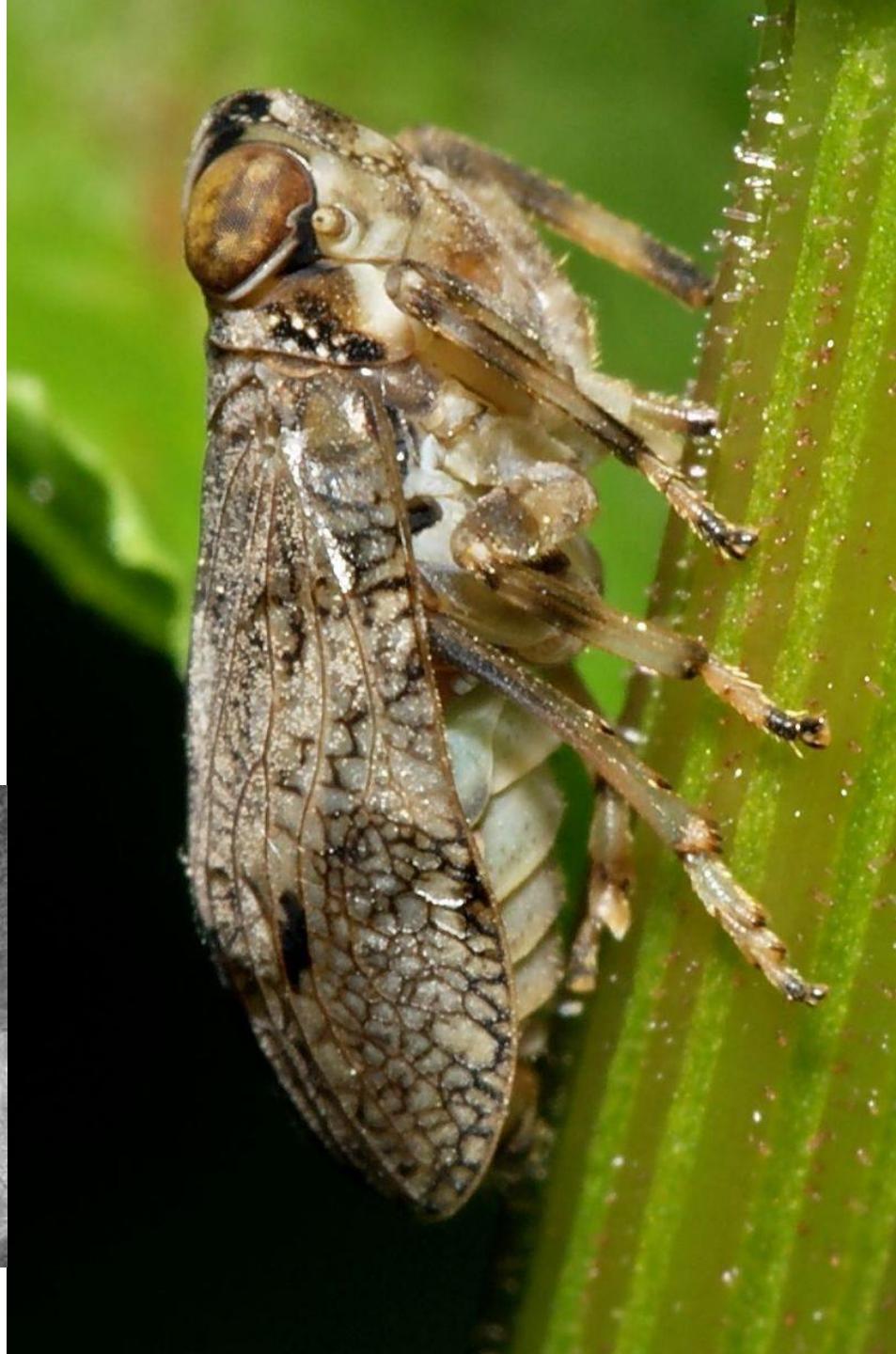
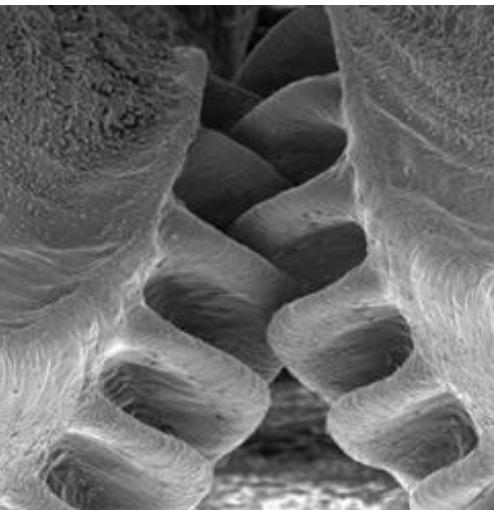


Kilde: Petteri Aimonen, wikipedia



ISSUS COLEOPTRATUS

Man finner også gir i dyreriket. "Issus coleoptratus" og deres slektinger har gir/tannhjul som synkroniserer bakbena for å kunne hoppe rett som nymfer.



Kilde: Wikipedia/
University of Cambridge (Profs.
Malcolm Burrows & Gregory Sutton)