



UiO • **Institutt for informatikk**

Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

IN1080

Steppermotorer, pulsbreddemodulasjon og driverkretser



Hvor står vi og hvor går vi...

Kort om emnet

- *Grunnleggende analog elektronikk*, sensorer og sensor grensesnitt, aktuatorer. **Programmering av mekatroniske systemer.**

Hva lærer du?

Etter å ha tatt IN1080 kan du:

- *forstå virkemåten til analoge kretser. Aktuelle begreper er: strøm, spenning, motstand, effekt, impedans, likestrøm, vekselstrøm, RCL, MOS, FET, OPamp*
- *bruke klassiske analysemetoder basert på Kirchoff, Thevenin og Nortons teoremer*
- forstå og anvende sensorer, signalkondisjonering og konvertering, samt noen komponent-komponent busser
- **bygge og programmere enkle mekatroniske systemer med mikrokontroller, aktuatorer og sensorer**
- forstå grunnleggende kontrollteori og virkemåte for PIDkontrollere

Lab (Koronarestriksjoner)

- — Lage 2 stk H-bro, for å styre egenprodusert motor
 - **Gi beskjed til labveileder dersom du trenger å lage ny motor.**
- — Programmere Arduino til å styre H-Bro

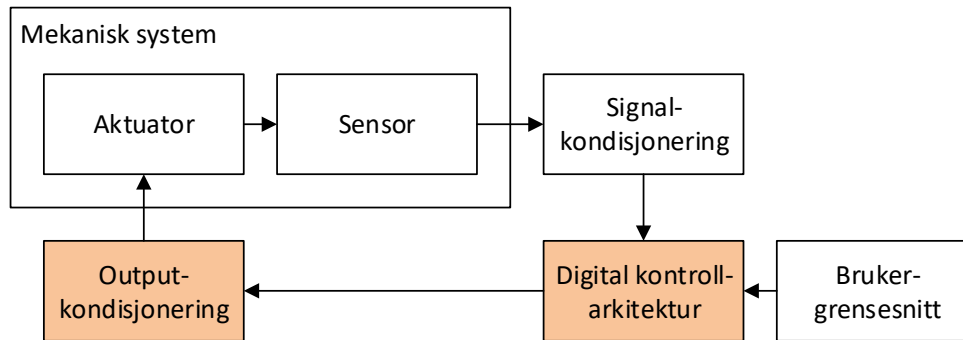
Forelesning (i dag, Onsdag)

- Styling (Kommutering) av steppermotorer
- Drivekretser
- Pulsbreddemodulasjon

Neste gang:

- Sensorer og sensorinterface
-

Systemperspektiv



- Vi skal se på
 - Styring av steppermotorer
 - Kommutering
 - ~~Programmering av kontrollsystem (Arduino)~~
 - Strømstyring
 - Pulsbreddemodulasjon
 - Induktive laster

Steppermotor

Egenskaper

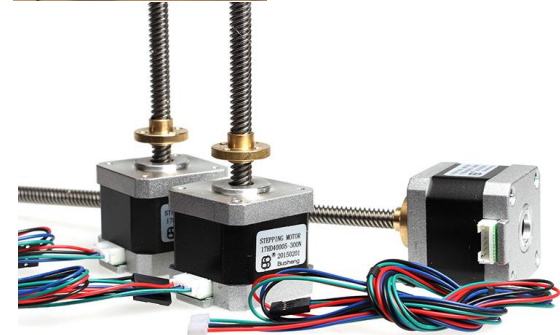
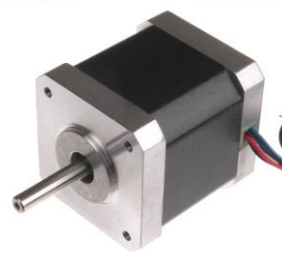
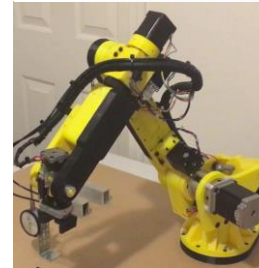
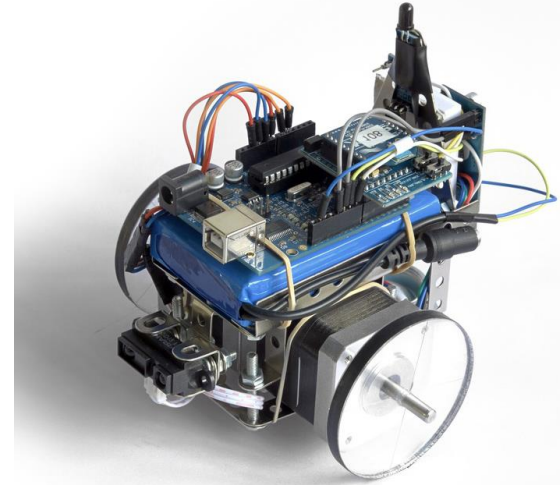
- Presis styring av akselvinkel *uten behov for avlesning/sensorer*
 - åpen sløyfe «open loop»
 - Aksel roterer inkrementelt en fast vinkel hver gang man sender en ny spenningskonfigurasjon til motoren
- Gir ofte et system med lav pris / enkel konstruksjon
- Høyt dreiemoment ved lave hastigheter, fullt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



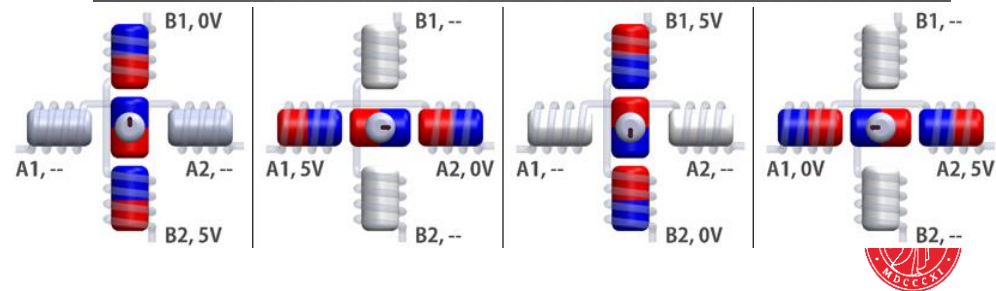
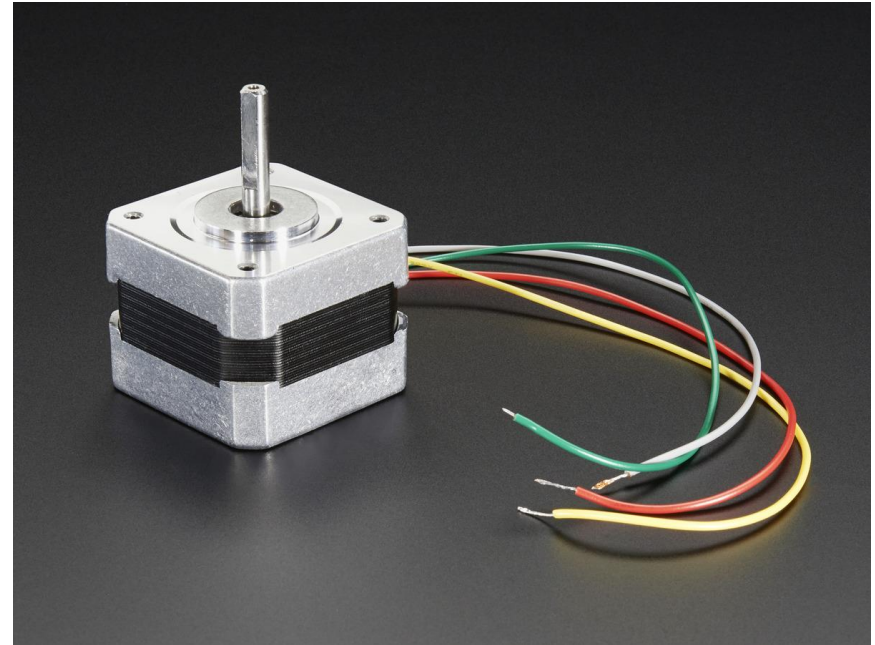
...Hvordan styre (kommutere) en steppermotor

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

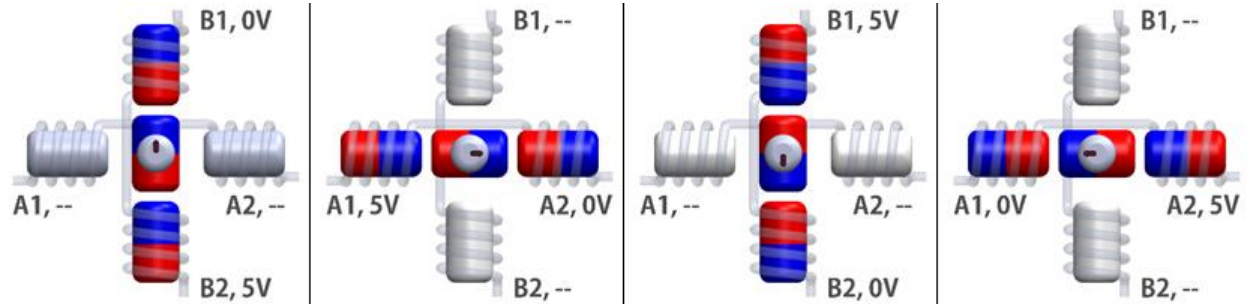
Vi ser på en stepper-motor med 4 faste spoler (stator) og en permanent magnet festet til den roterende akselen (rotor)

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

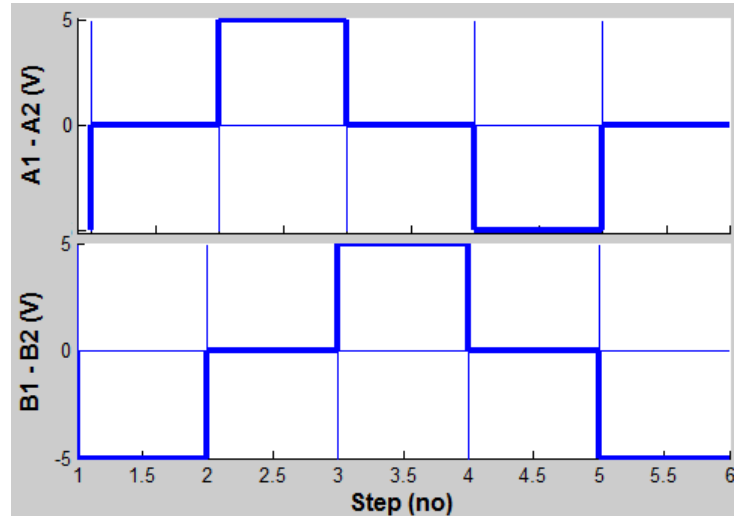
- De vertikale spolene er koblet i serie og ledningene ut har navn B1 og B2
- De horisontale spolene er koblet i serie og ledningene ut har navn A1 og A2
- Over hvert spolepar A og B kan man sette enten 5V, -5V eller koble løs (--), slik som illustrert i figuren
- Avhengig av spenning over spolene vil 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



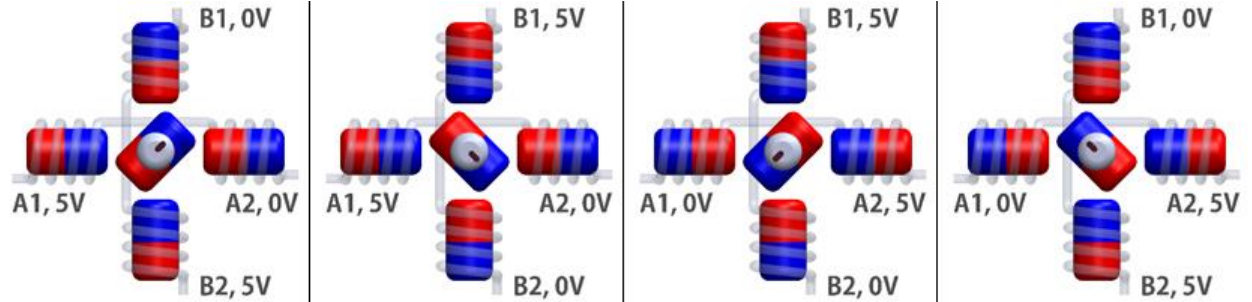
«Wave commutation»



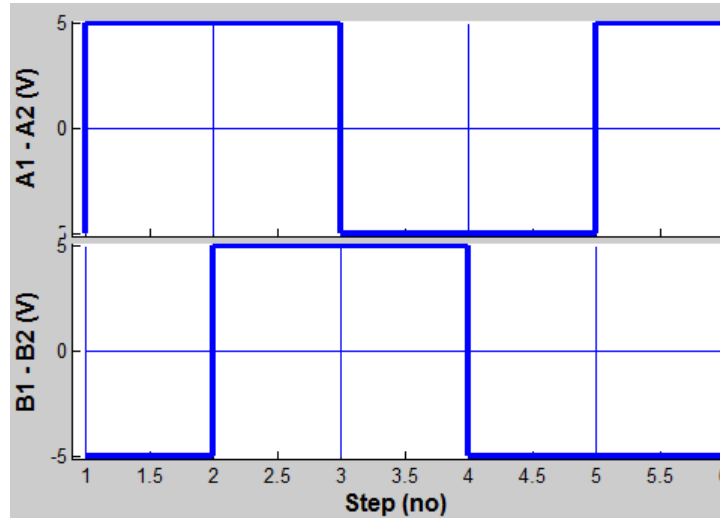
Kun ett spolepar er aktivt av gangen
 Gir 50% effekt bruk og lavt
 dreiemoment.
 Går "ett steg" av gangen.



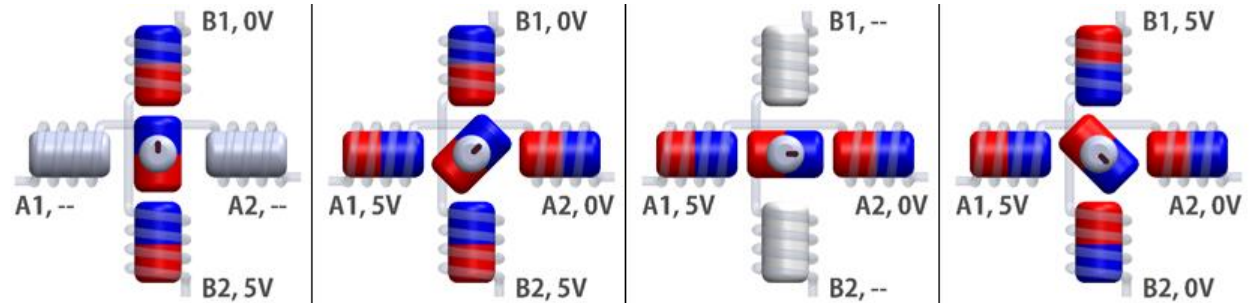
Full steps kommutering (Full Step)



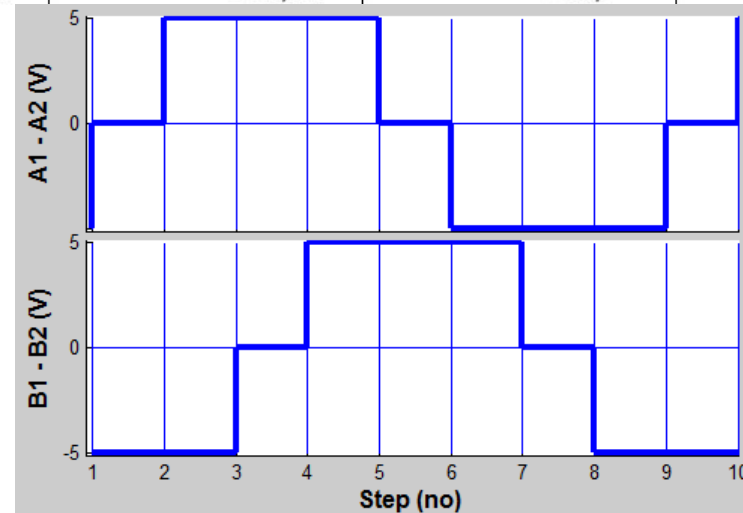
Bruker alle spoleparene samtidig
Gir maksimal effekt og dreiemoment



Halvstegskommutering «Half step commutation»



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



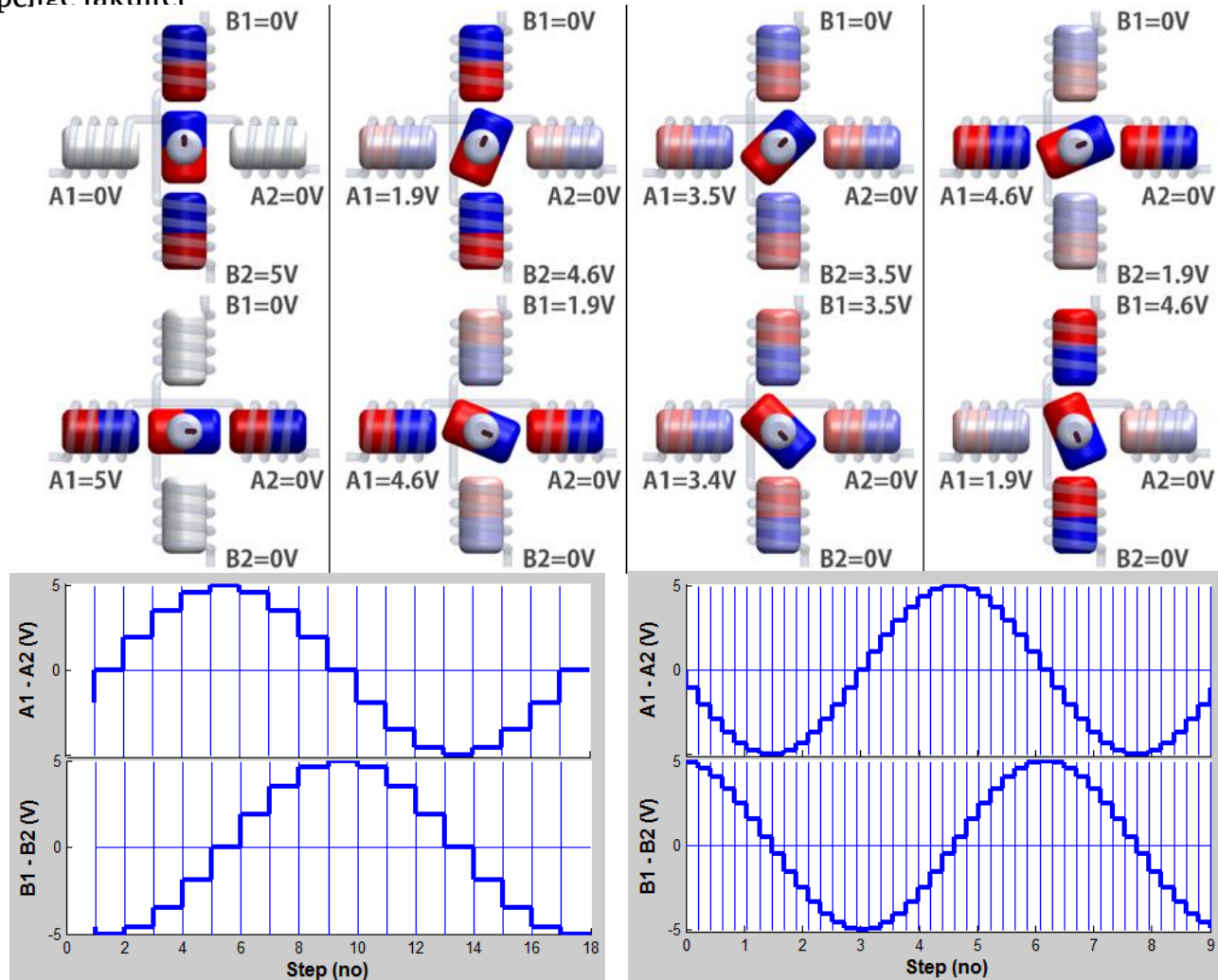
Mikrostepping

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

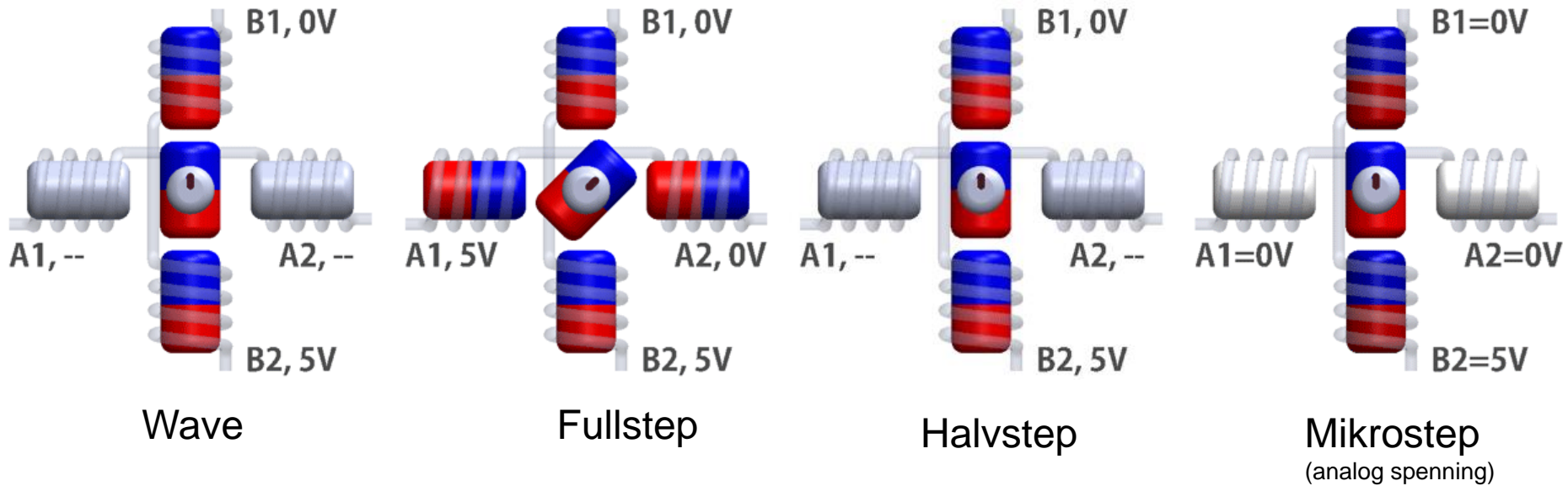
Kan gi konstant dreiemoment, men behøver ikke.

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)



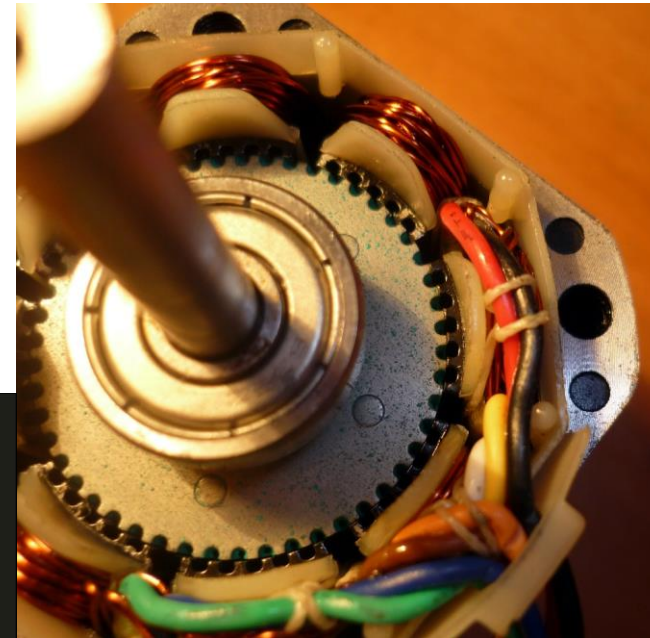
Steppermotor i praksis

«Hybrid Stepper motor»

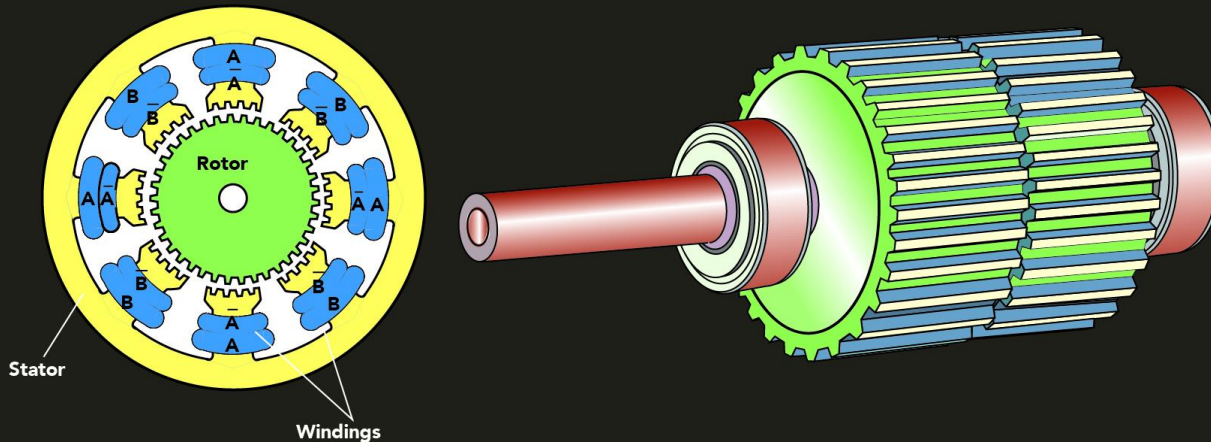
(«Hybrid» fordi den kombinerer prinsippet fra en reluktansmotor med bruk av permanentmagnet)

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.

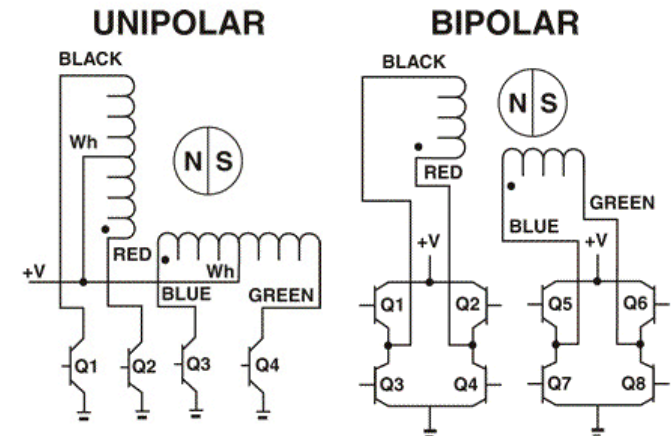
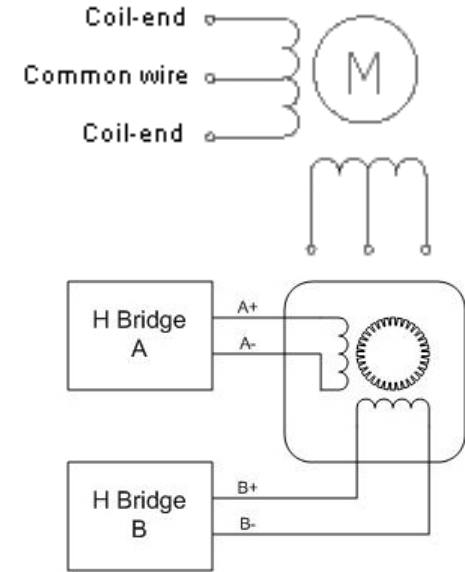
Steppermotor - Oppkobling

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...

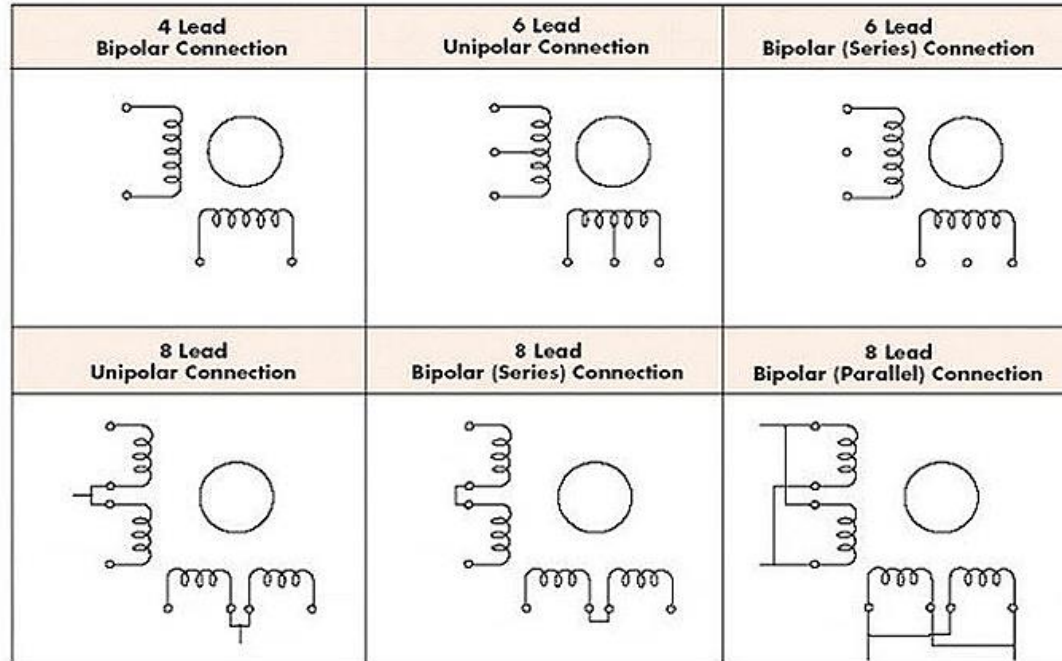
- Bipolar
 - Strømmen drives i begge retninger gjennom spolene.
 - Krever to H-bruer eller tilsvarende for å drive strømmen i to retninger gjennom spolene.

- 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 bipolar drive spolene parallellt 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

...Hvorfor Motordrivere...

Kan man drive en motor direkte fra en mikrokontroller?

- NEI!

- Overbelastning:

- Pinnene til en mikrokontroller kan ikke drive nok strøm =>*

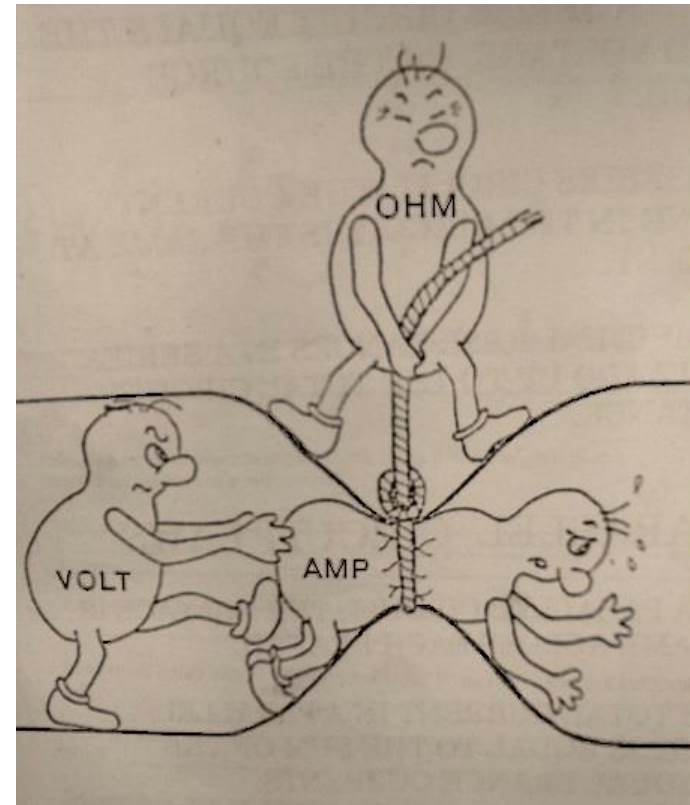
- Chipen brenner opp *og/eller*
 - Spenningen i chipen faller og kortet slutter å virke *og/eller*
 - Spenningen på pinnen faller

- Motorer trenger ofte høyere spenning enn en mikrokontroller

- Mikrokontrolleren må beskyttes mot strøm fra induktive laster.

- Disse kan gi (mye) høyere enn spenning enn den som ble brukt for å få motoren opp i hastighet...

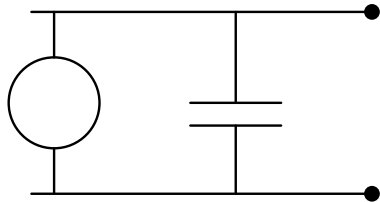
- => vi må benytte dedikerte kretser for å drive aktuatorer/motorer.



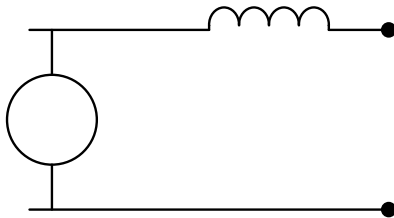
REPETISJON

Spoler og kondensatorer

- Kondensatorer «lagrer»?



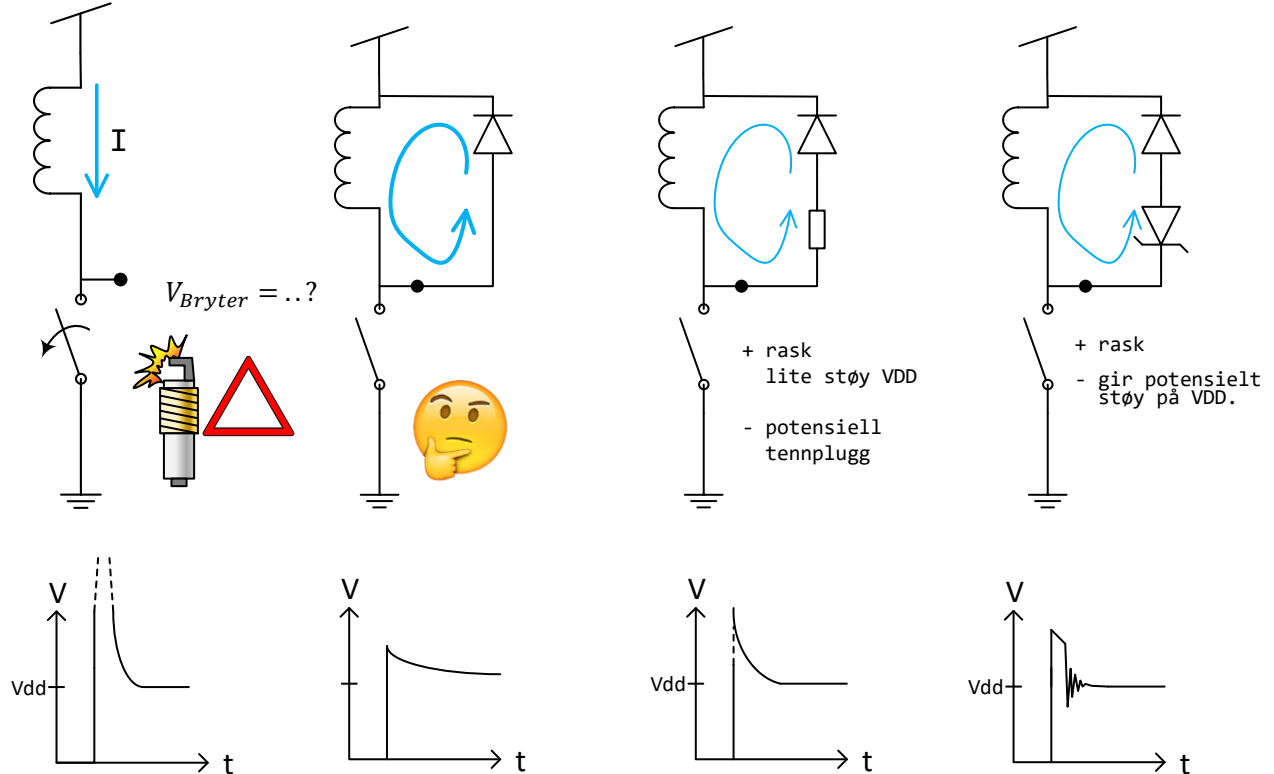
- Spoler «lagrer»?



Selvinduksjon - "Inductive Flyback/kickback" og "snubbing"

Vurdér:

- Hva skjer med spenningen over bryteren når vi brått skruer bryteren av?
- Hva kan vi gjøre for å løse dette?
- Med en vanlig (rask) diode og en tilpasset zenerdiode (*breakdown diode*) kan man skreddersy størrelsen til induksjonsspenningen slik at vi reduserer induksjonsstrømmen så raskt så mulig uten å skade komponentene.



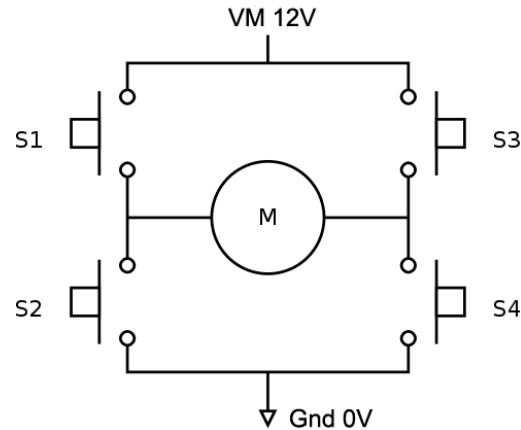
Best egnet PWM-baserte løsninger

Best egnet for fullstep/halfstep/wave



H-Bro «H-Bridge»

- Brukes til å forsyne en last med bidireksjonal strøm.
- kan brukes når vi har høy spenning eller strømstyrke
- fire lovlige tilstander som kan styres av transistorene S1, S2, S3 og S4 (her: tegnet som bryter):
 - Høy-impedanse (Free running state):
Motoren er koblet fra driveren
«Frikoblet»
 - Forover (Forward state):
Strømforsyningen i foroverretning.
 - Revers (Reverse state):
Motsatt strømretning av foroverretningen.
 - Brems (Brake state):
Begge sider koblet til strømforsyning
(eller begge til jord).
Dette vil bremse motoren da det induseres strøm i spolene ved rotasjon.
- NB: Ulovlige tilstander:
 - S1 og S2 samtidig, evt S3 og S4 samtidig
 - Gir kortslutning...
 - NB: Switchetider ulike på høy og lav side
 - Transistorene må skrus av en tid før neste tilstand skrus på



(a) Free Running State

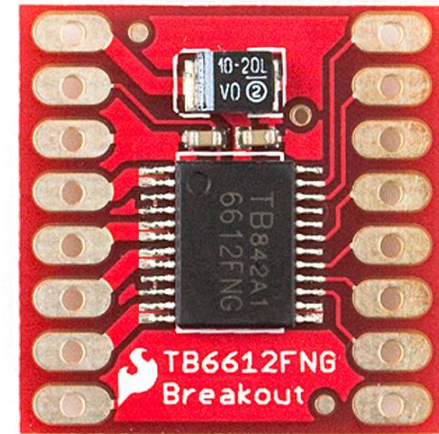
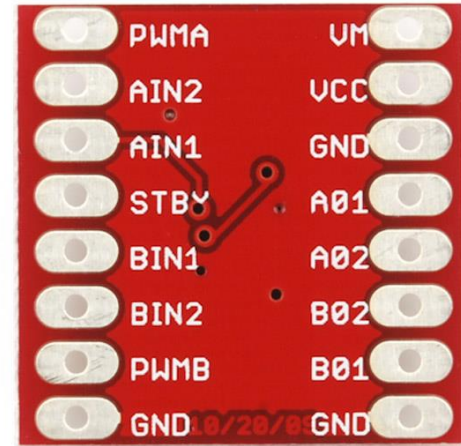
H-Bru eksempel: TB6612FNG

Eksempel: TB6612FNG dobbel H-bru fra Sparkfun (se bildet).

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

Pinner:

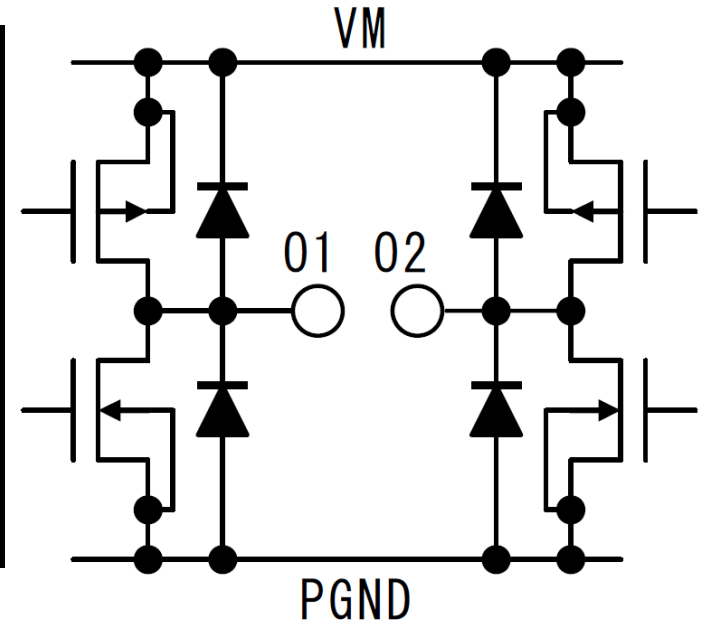
- AINx/BINx/PWMx/STBY: logiske kontrollinnganger
 - Ikke direkte koblet til S1-4 (forklaring neste slide)
- VM: forsyningsspenning til motor / H-bru (typisk 5 - 12V)
- Vcc: Forsyningsspenning fra mikrokontroller (arduino), og for intern logikk i H-Bru : 5V
- A01/2, B01/2 H-bru output (til motor el.)
- PWMA, PWMB gir mulighet til å pulsbreddemodulere utgangene



H bru : TB6612FNG– SE notater-> Endre foiler bak

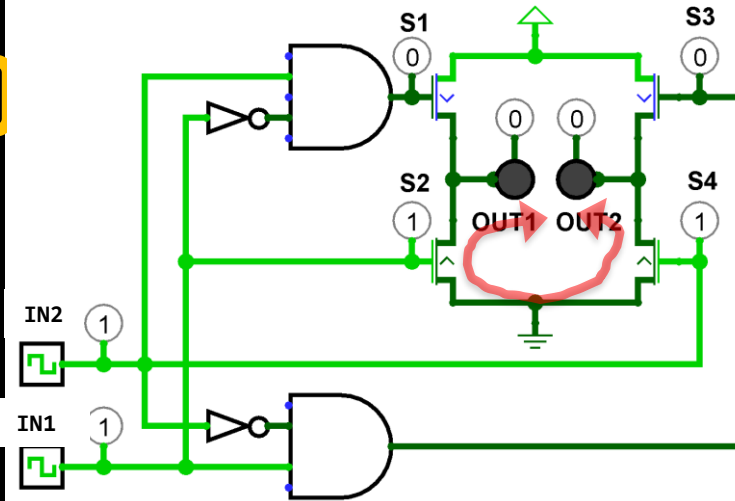
Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby

Kilde: Datablad TB6612FNG (Toshiba)



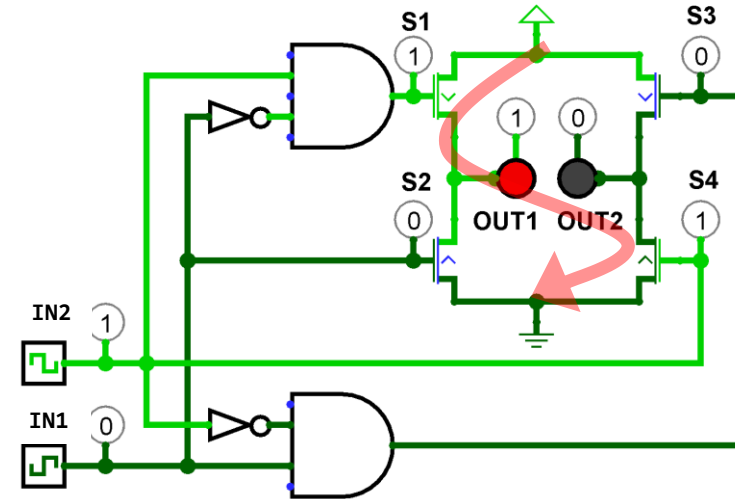
H bru- Brems (Short brake)

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



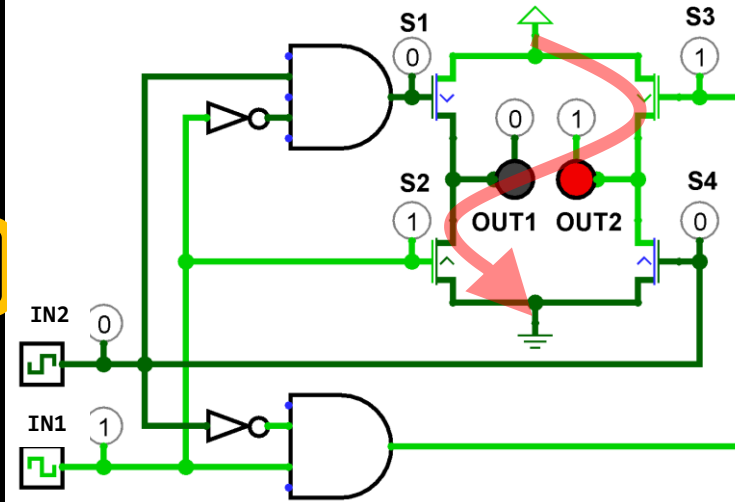
H bru – Forover (CW)

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



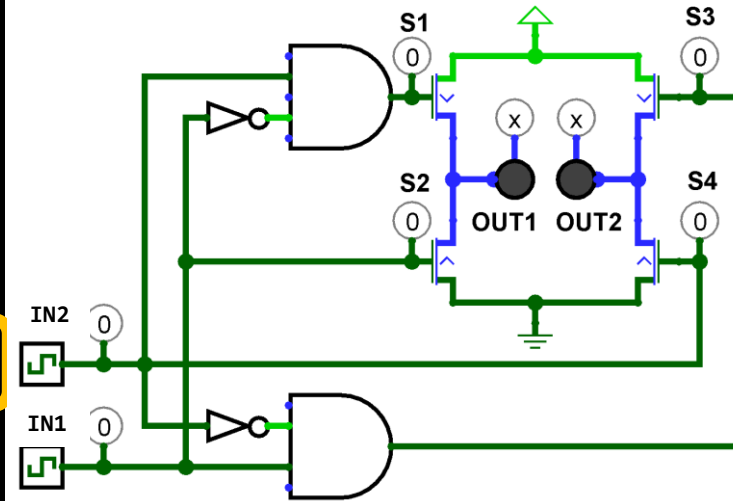
H bru – revers (CCW)

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)

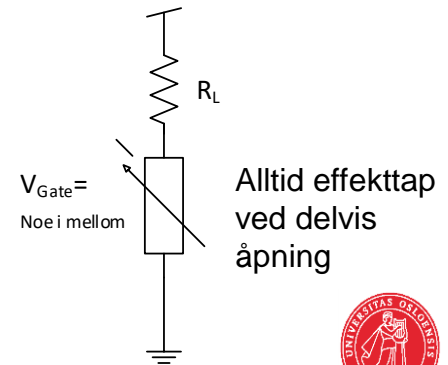
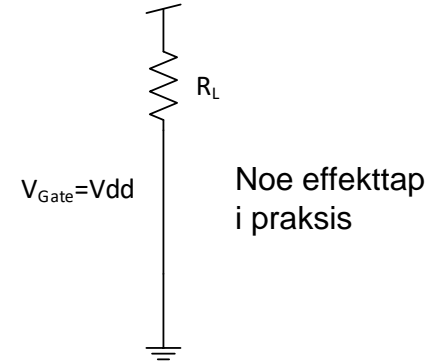
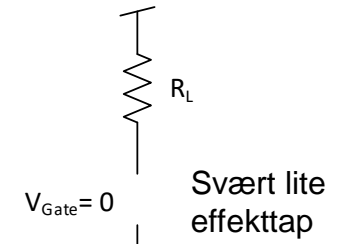
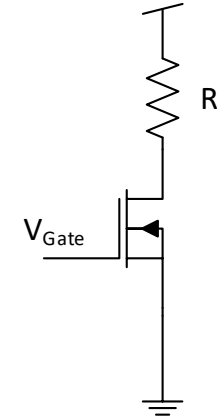
Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby



- Merk: Kretsen gjør mer enn det diglog-modellen viser
- Den sørger også for
 - timing ved skifte mellom tilstander
 - pulsbreddemodulering, standby

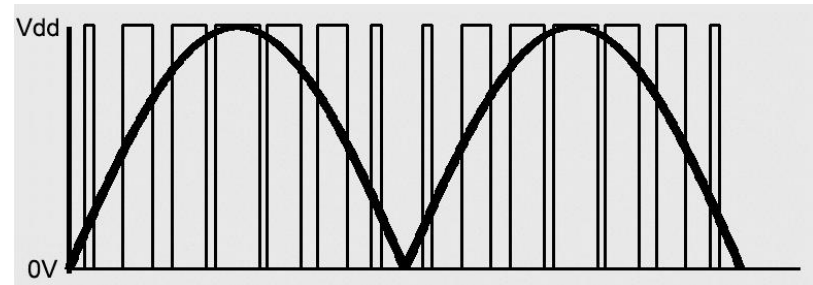
Transistor - digital vs analog modus

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.



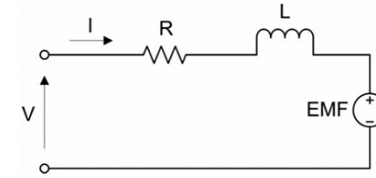
For høyere switchefrekvenser ($>2\text{kHz}$), så *kan* spolene i en motor utgjøre lavpassfilteret selv.

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

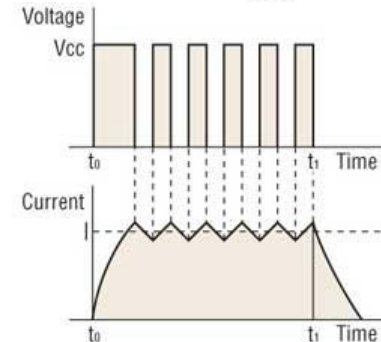
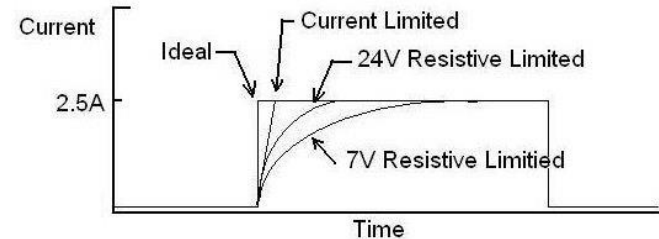
Motordrivere har ofte en egen inngang for pulsbreddesignaler som kan genereres med en mikrokontroller (Arduino el.).

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.



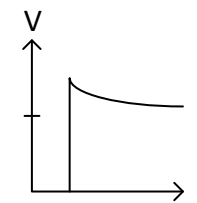
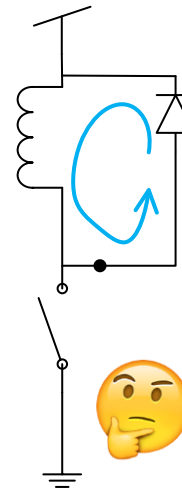
Current vs time for stepper motor winding



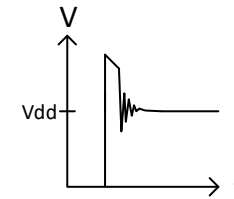
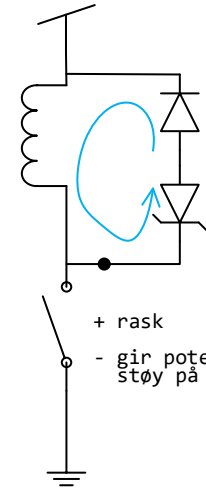
Voltage - Current Relationship in Constant Current Chopper Drive

Snubbing

- Ved pulsbreddemodulasjon er det greit at strømmen fortsetter å gå i motoren mellom de korte pulsene
- Ved wave/full-/halvstep-kommutering ønsker å avslutte strømmen kvikt
- Induktansen i spolen spiller også en rolle for hvilken løsning som er mest egnet.
 - Svært mange viklinger => lang utladning
 - Elektromotorer har ofte



Best egnet PWM-baserte løsninger



Best egnet for fullstep/halfstep/wave

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 $f=1/T$)

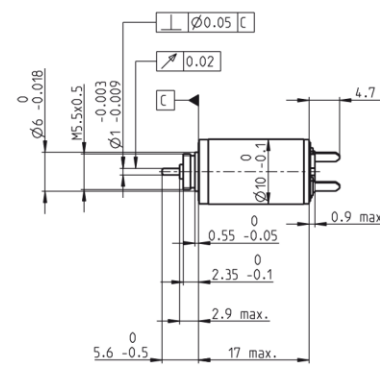
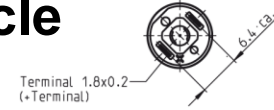
$$- \text{Duty cycle er (tid på)/periode} = 8,1\mu s / 48,6\mu s = 0,17$$

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

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										
Motor Data		118382	118383	118384	118385	118386	118387	118388	118389	118390	118391	
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



Strømstyrt motordriver - Easydriver

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

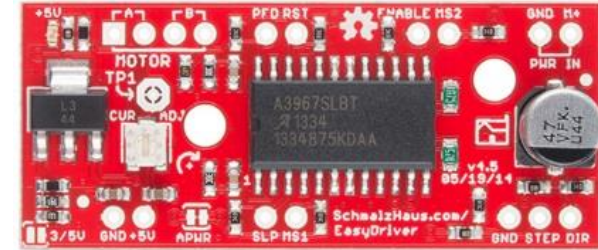
Kommunikasjonspinner:

- **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.

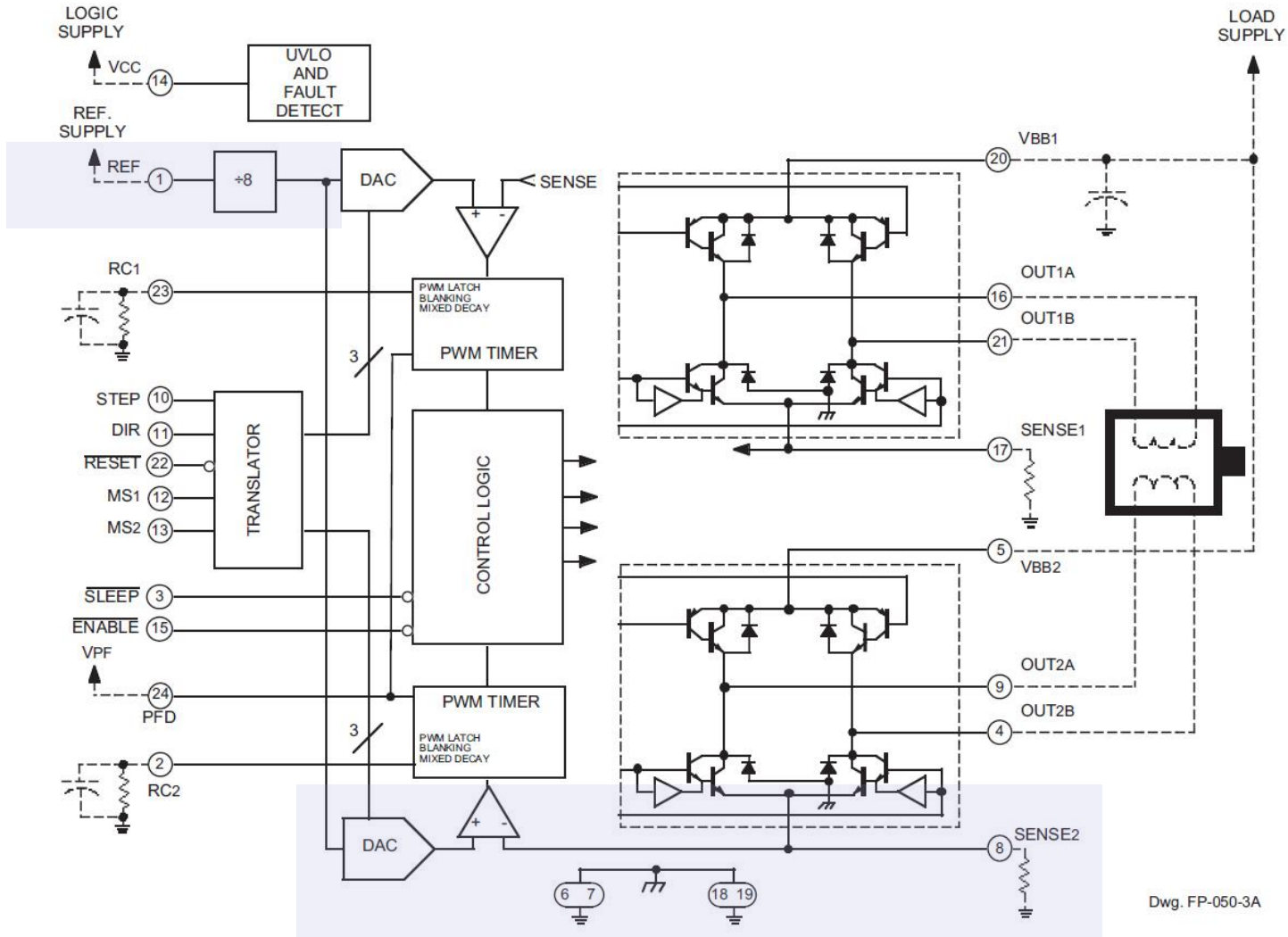
For å spesifisere antall mikrostep man vil benytte brukes pinne MS1 og MS2 slik som vist i tabellen

Siden **driveren er strømregulert** kan man koble den til en forsyningsspenning på maksimum 30V, *selv om steppermotoren kun er ratet for 12V*. Strømmen kan justeres opp til 750mA vha potensiometeret. Dess høyere forsyningsspenning man bruker dess mer jevnt 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



Dwg. FP-050-3A



Litteratur

- COK: Introduction to Mechatronic design
 - 23.1, 23.2, 23.3, 23.4 (Strømstyring)
 - 26.1, ... tom 26.9 (*Stepper motor*)
- Oppgaver kap 23.5:
 - 23. 1, 2, 3, 7
- Oppgaver kap 26.14:
 - 26. 2, 5, 6, 7, 9
- MERK: Boka bør leses!
 - Dybdelæring.
 - Flere praktiske betraktninger enn forelesningene kan ta opp.