

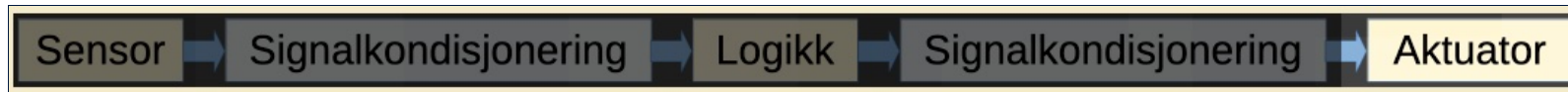
IN1080-V25 Mekatronikk

Forelesning nr.13 - Motordrivere og mekanismer

Mats Høvin. 30:04:2025



Temaer i dag



- Motordrivere
- Batterityper
- Kinematikk og mekanismer
- Kraftoverføringer

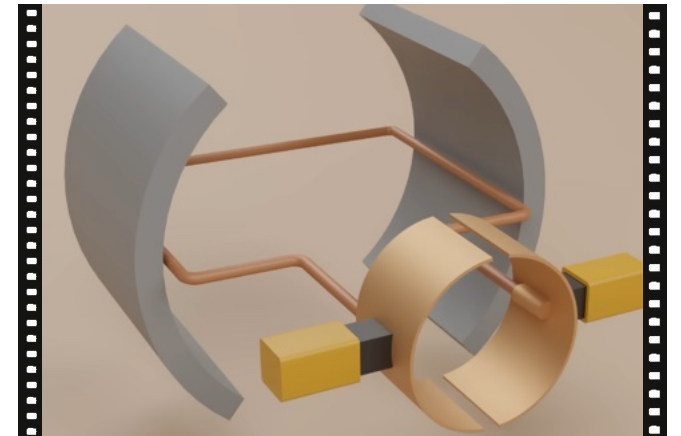
Repetisjon, DC-motor

Anbefalt ressurs for animasjoner

- [Jared Owen](#) - Blender 3D

Eksempel

- Strøm, magneter, kommutator og DC-motor, her forklart uten Lorentz-kraft



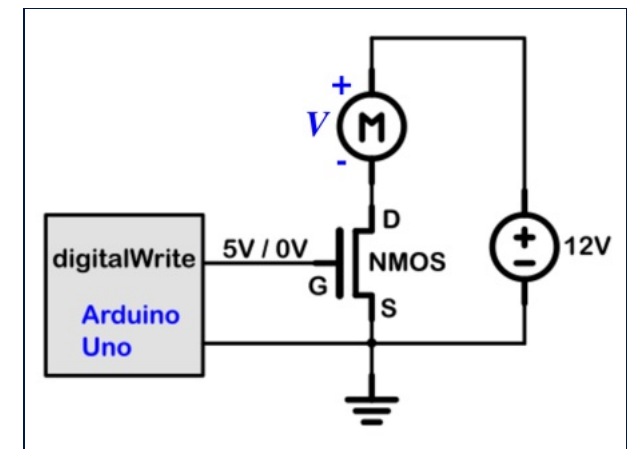
Motordriver, enveis

Vil man styre en motor i kun en rotasjonsretning, holder det med en enkel NMOS bruk som bryter, eller tilsvarende komponent

Vi ser på to situasjoner der motoren drives av en egen 12V forsyningspenning. Først:

Av/på forsyningspenning over motor

- I figuren ser vi en Arduino som slår av og på en motor ved å sende et binært signal med `digitalWrite` til gate-terminalen på transistoren. Dette produserer en binær (av/på) forsyningspenning V på 12V over motoren

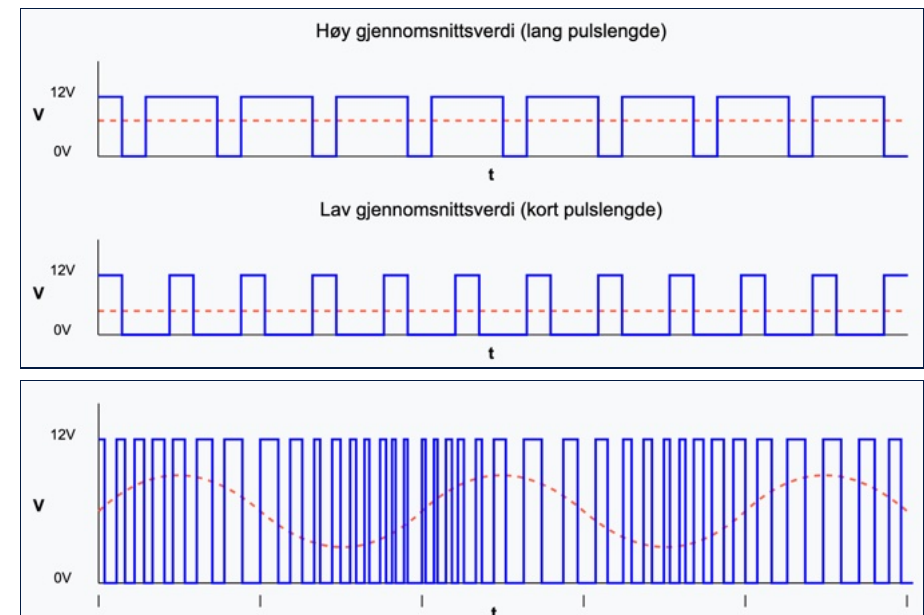
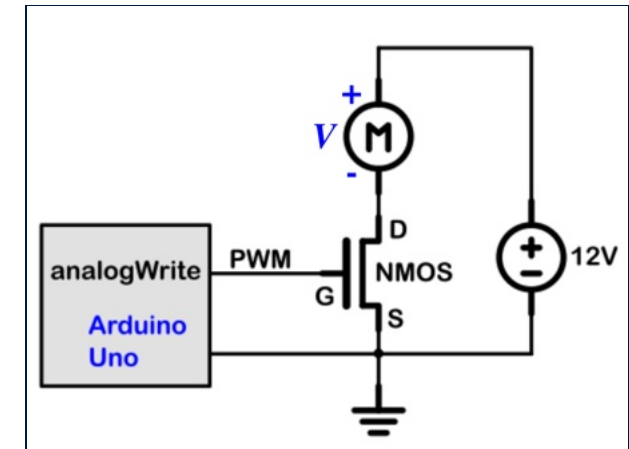


Motordriver, enveis PWM

Vil man styre motoren i kun en rotasjonsretning, men med forskjellige hastigheter gitt av forskjellige forsyningspenninger, kan man også gjøre dette med en enkel NMOS eller tilsvarende komponent

Å kontrollere forsyningspenningen over motoren

- Hvis vi kjører et PWM signal inn på gate-terminalen med `analogWrite`, kan vi kontrollere den resulterende pulslengden på 12V signalet over motoren, og dermed gjennomsnittsverdien på motorens forsyningspenning V
- I midterste figur ser vi dette for 2 forskjellige konstante pulslengder på V , som gir 2 forskjellige gjennomsnittsverdier. Dette gir to forskjellige hastigheter på motoren hvis dreiemomentet er det samme
- I nederste figur varierer vi sakte pulslengden på en måte som gir en saktevarierende sinusformet gjennomsnittsverdi, dette gir en saktevarierende sinusformet hastighet på motoren



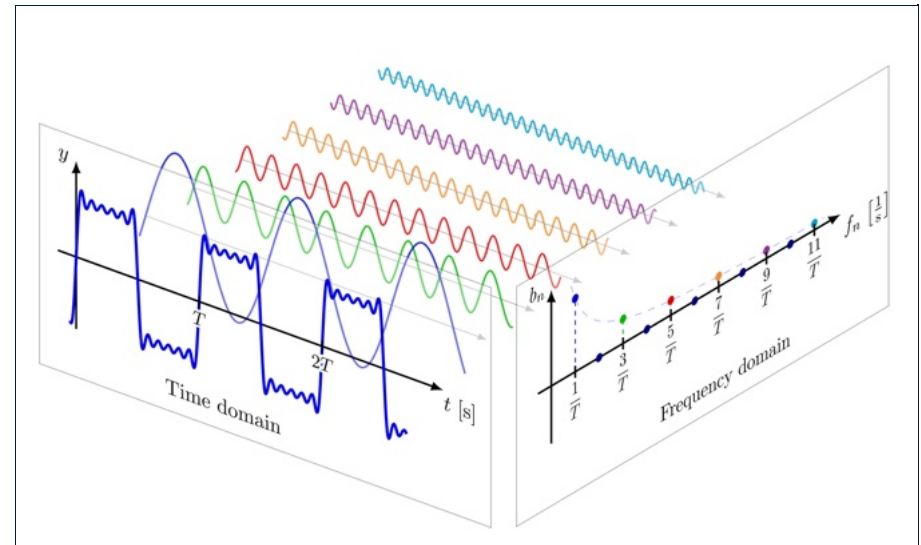
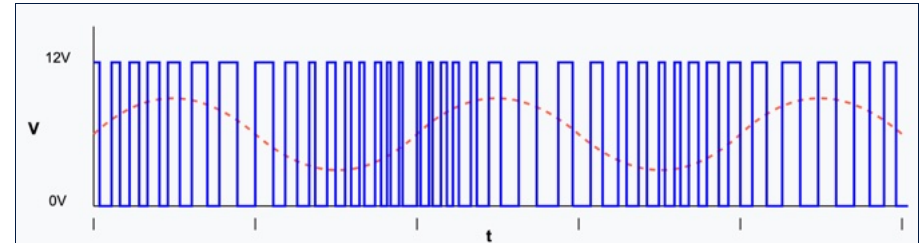
PWM-basert forsyningspenning

Et PWM-signal består av en sum av flere skalerte og faseskiftede sinussignaler (jlf. Fourier-rekke), se illustrert i nederste figur

- Gjennomsnittsverdien som er det signalet som vi styrer motoren med, varierer sakte med lav frekvens, evt. ned mot DC (øverste figur, rød stiplet linje)
- De sinuskomponentene som lager firkantpulsene er høyfrekvente, typisk mange tusen eller titalls tusen Hz
- Merk at i figuren øverst er pulsfrekvensen veldig lav i forhold til frekvensen på gjennomsnittsverdien, dette er kun for å illustrere prinsippet

Som vi har sett tidligere så går det lite strøm gjennom en spole (induktans) for spenninger med høye frekvenser, men for spenninger med lave frekvenser oppfører en induktans seg mer som en ledning og leder lett strøm

- Dette medfører at en spole og dermed magnetfeltet, ikke rekker å reagere på de høyfrekvente signalkomponentene som genererer firkantpulsene, kun på den saktevarierende gjennomsnittsverdien til spenningen
- Mekanisk treghet i motoren vil også hindre motoren å reagere på høyfrekvente strømmer



Snubber

PWM og spoler, noen detaljer

- Når strømmen til en spole plutselig avbrytes, prøver spolen å motstå endringen i strømmen ved å opprettholde den. Dette gjøres ved at spolen genererer en induktiv tilbakespenning, som kan være høyere enn den opprinnelige spenningen. Spenningen oppstår på grunn av det kollapsede magnetfeltet rundt spolen, som følger prinsippet i Faradays lov om elektromagnetisk induksjon.

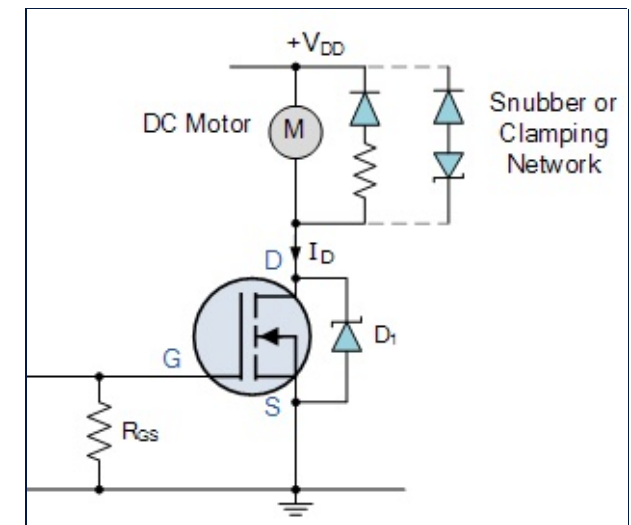
Den høye spenningen kan potensielt skade elektroniske komponenter eller forårsake gnister

For å håndtere denne spenningen brukes ofte beskyttelsesmekanismer som snubber-kretser eller flyback-dioder

Spenningen er som funksjon av strøm over induktans (repetisjon)

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Man trenger ikke å forstå detaljene i dette til eksamen, men ser man dioder brukt på denne måten er dette årsaken



Motordriver H-bru

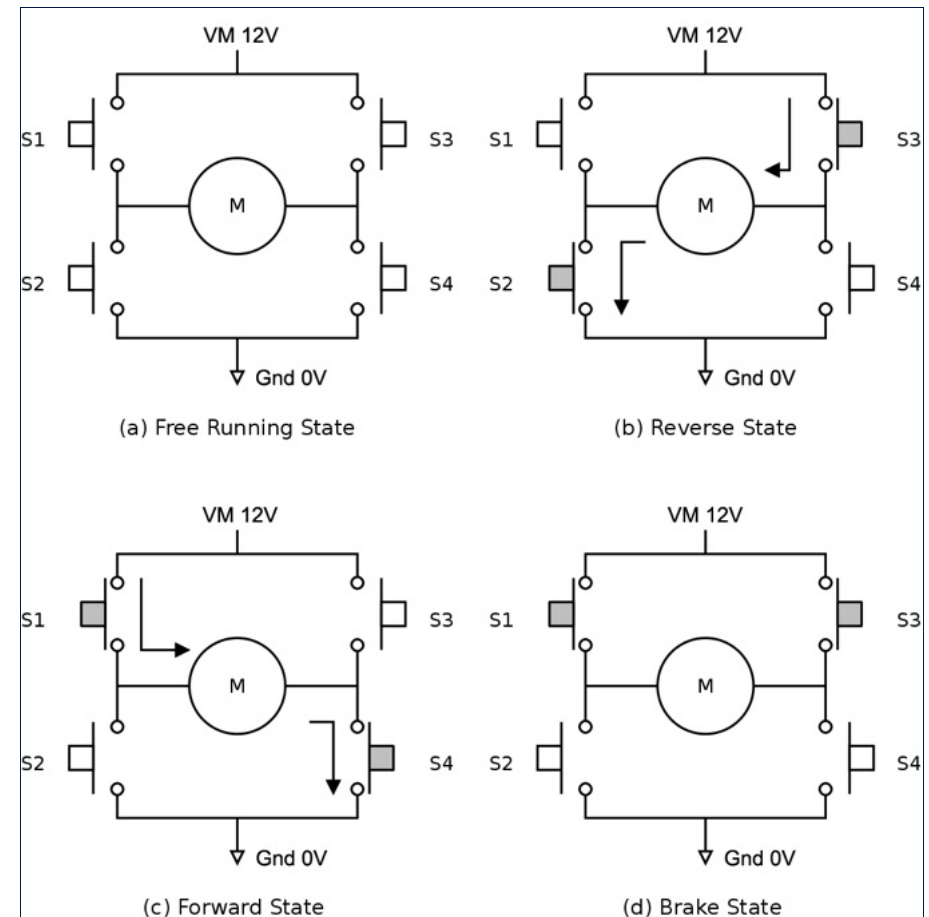
For å styre en DC motor i begge rotasjonsretningene må man bruke en H-bru

Eksempel

- Fire forskjellige tilstander kan settes av interne brytere (transistorer) - S1, S2, S3, S4
- Bryterne styres av innebygd logikk som vi kobler til Arduino-kortet
 - Fri tilstand: Motoren er frakoblet
 - Bremsetilstand: Forsyningslinjene til motoren er koblet sammen. Motoren vil kortsluttes og være vanskelig å rotere da V_{emf} kobles til en kortslutning
 - Fremover kjøretilstand: 12V mates til motoren (+12V)
 - Bakover kjøretilstand: 12V i motsatt retning mates til motoren (-12V)

Ved å kjøre et PWM signal på bryterne kan vi her sette motorens gjennomsnittlige forsyningspenning til en verdi i intervallet

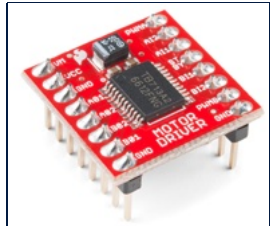
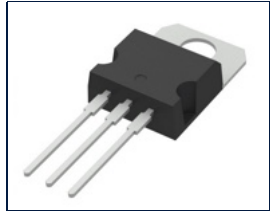
- [-12V, 12V]



Motordrivere, eksempler

Fra øverste til nederste figur

- Enkel NMOS transistor. Typisk maks strøm: 1A til noen titalls ampere avhengig av kjøling
- Dobbel H-bru - TB6612FNG, maks strøm ca. 2A
- Arduino motordriver shield, L293D, dobbel H-bru maks strøm 1.2A
- Odrive_pro, 3000W, 14-58V, Continuous Power, 120A peak
 - Precision Control - Torque, Velocity, Position & Trajectory control, with model based feed-forward, and FOC current control
 - Galvanically Isolated CAN, UART, Step/Direction and GPIO
 - User Interface: Web GUI & Python tools for easy configuration
 - \$229
- DBLS-09 220V 1500W High Voltage BLDC Motor Driver for Industrial Applications



H-bru, eksempel

TB6612FNG dobbel H-bru motordriver

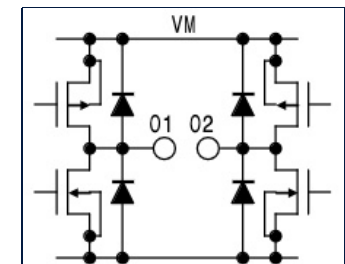
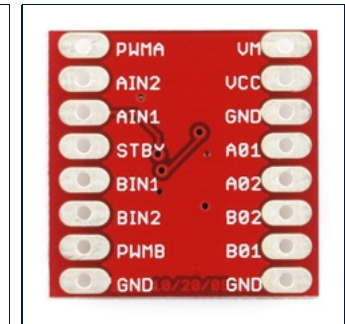
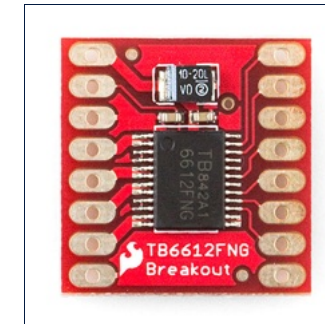
Egenskaper:

- Liten, kompakt, robust
- Ett kort inneholder to H-broer, A/B

Pinout:

- AINx, BINx, PWMx: logiske styresignaler, fra Arduino, (S1-S4) kontroll
 - Virkemåte se datablad eller figur nederst
- STBY, (stand by) - må være høy for at driveren skal være operativ
- VM: motorspenning (H-bro) 12V
- Vcc: Logikkspenning fra Arduino: 5V
- AOx, BOx: utganger til motor

Datablad [SparkFun](#)



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

Batterier

Vanlige typer

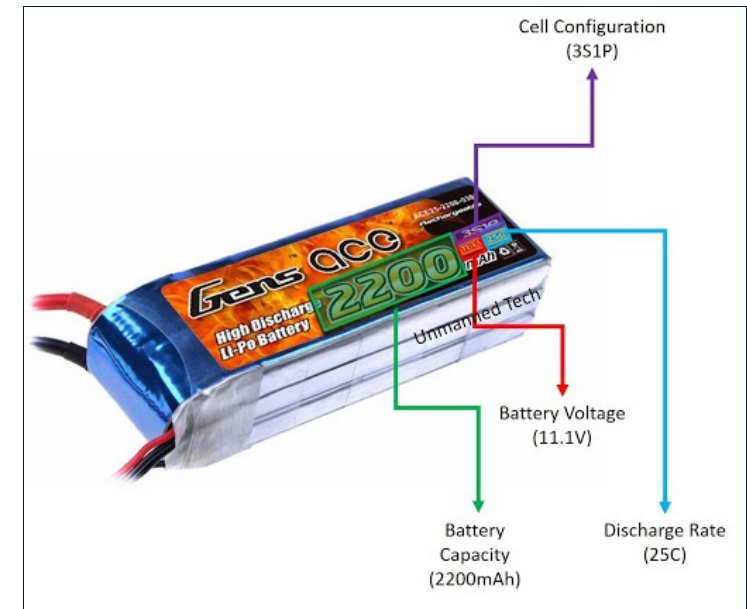
- Bly-syre
 - Billige, tunge, lav energi / vekt
- Nikkel-kadmium (NiCd)
 - Tåler godt dype utladninger
- Nikkel-metallhydrid (NiMH)
 - Høyere kapasitet enn NiCd og mindre miljøskadelig
- Litium-ion (Li-ion)
 - Høy energitetthet, krever avansert styring for sikker bruk
- Litium-polymer (LiPo)
 - Noe bedre energi / vekt enn Li-ion, dyrere enn Li-ion, enda mere følsom for fysisk skade og feil lading enn Li-ion



LiPo batterier - parametre

Vanlige typer

- Nominell spenning er 3,7 volt/celle
- Spenning i S-format - oppgis i antall celler i serie, eksempel: 6S betyr $6 \times 3.7V = 22,2V$
 - Kan også oppgi antall celler i parallell, eksempel 6S2P - 2 celler i parallell
- Maksimal ladespenning er ca. 4.2V/celle
- Kapasitet (C) - oppgis i milliamperetimer (mAh)
- C-rate / utladningsrate - eksempel: 20C betyr at man kan lade ut med en strøm som er 20 ganger større enn tallet for kapasiteten C
- Maks ladestrøm kan være oppgitt i 1C-4C avhengig av batteritype



Lading av LiPo batterier

Man må ha spesielle ladere

- "Intelligente" typer som lader og monitorerer

Brannfare/giftgass

LiPo batterier kan utgjøre stor brannfare ved

- For rask eller høy oppladning
- For høy temperatur under ladning
- For rask utladning, kortslutning
- For dyp utladning
- Fysisk skade
- (Feil ved produksjon)

LiPo batterier inneholder egne oksidanter og brann lar seg derfor ikke slokke ved å fjerne oksygen i lufta rundt. Man må nøye seg med å bremse brannen ved å kjøle ned, typisk med vann



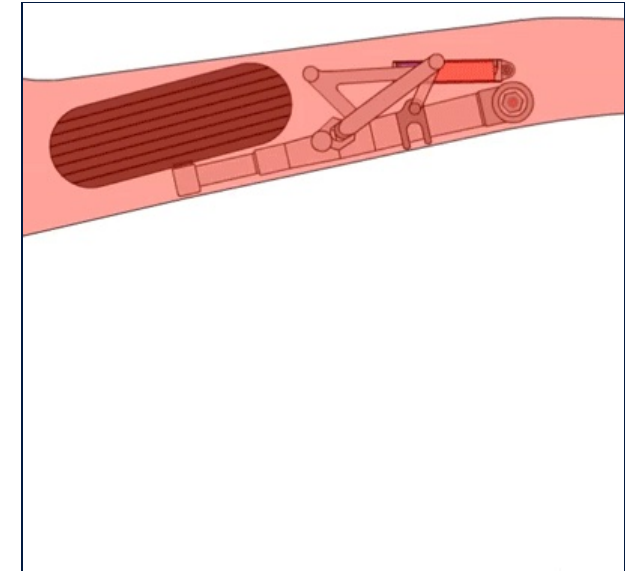
Kinematikk / statikk

Kinematikk

- Kinematikk beskriver bevegelsen til mekaniske systemer, uten å ta hensyn til kreftene som produserer bevegelsen

Statikk

- Statikk omhandler kreftene som produserer en tilstand av likevekt i et system av stive legemer



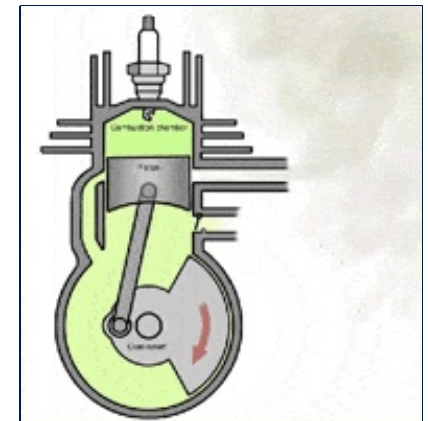
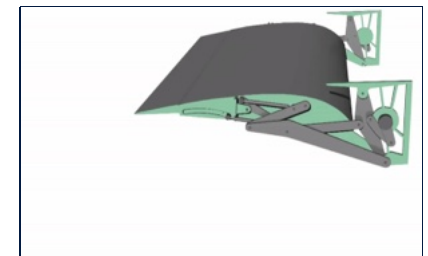
Mekanismer / lenker

Definisjoner:

- En lenke er definert som et stivt legeme med to eller flere forbindelser til andre legemer med formålet å overføre kraft eller bevegelse, eksempel vist i toppfiguren
- En mekanisme er en mer generell innretning designet for å transformere inngangskrefter og bevegelse til et ønsket sett av utgangskrefter og bevegelse

Eksempler på mekanismer eller deler av mekanismer:

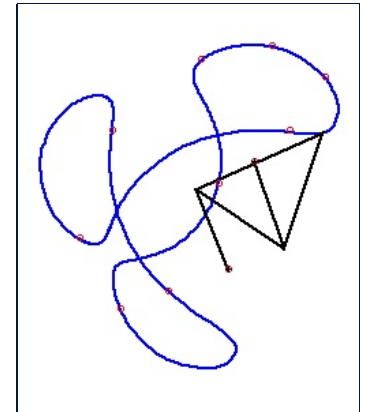
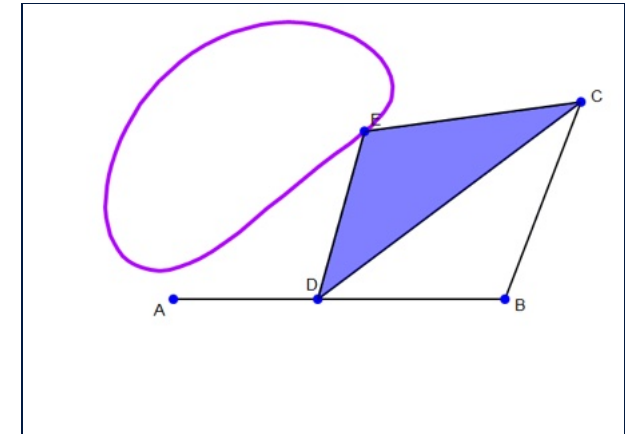
- Ledd
- Gir
- Koblinger
- Kamakslinger og følgermekanismer
- Belte og kjededrev
- Friksjonsenheter som bremses og kløtsjer
- Stempel og veivaksling
- ...



4-lenke mekanismer

Kategorier av lenker

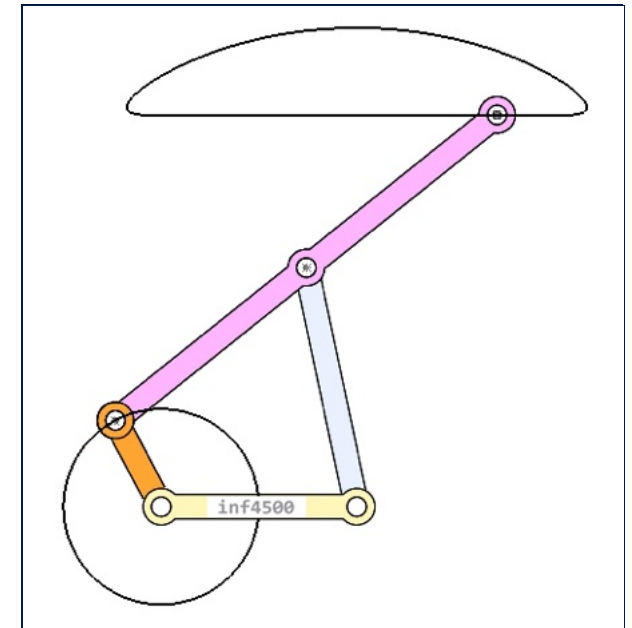
- **Krank:** Kan rotere fullstendig 360°
- **Vippearm:** Kan rotere gjennom et begrenset område av vinkler som ikke inkluderer 0° eller 180°
- **O-vippearm:** Kan rotere gjennom et begrenset område av vinkler som inkluderer 0° , men ikke 180°
- **π -vippearms:** Kan rotere gjennom et begrenset område av vinkler som inkluderer 180° , men ikke 0°



Mekanismer for rett linje

Hoekens

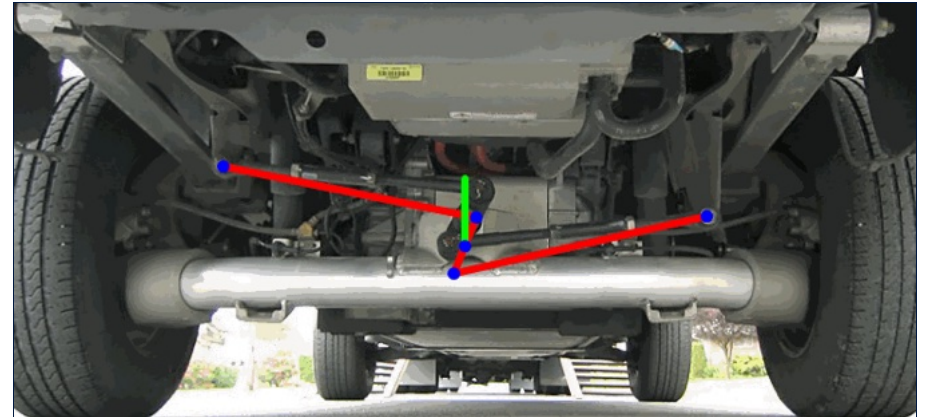
- Hoekens-mekanismen er en fire-lenke mekanisme som konverterer roterende bevegelse til omtrentlig rett-linje bevegelse med omtrentlig konstant hastighet



Watt's mekanisme

En rett-linje mekanisme

Watt's mekanisme brukes i bakakselen på noen biltyper som en forbedring over Panhard-stangen



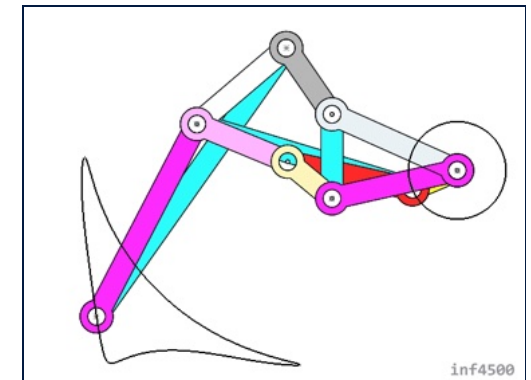
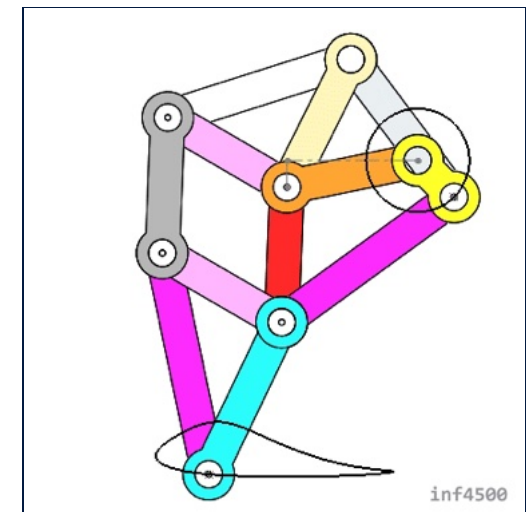
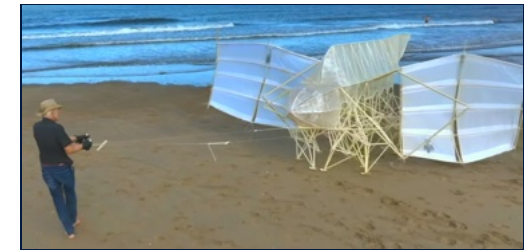
Jansen / Klann

Rettlinjede mekanismer brukt for gange

- Jansen-mekanismen (oppfinner: Theo Jansen, kunstner)
 - Vinddrevet beast
- Klann-mekanismen
- Optimale lenkelengder kan finnes ved simulering/søk simulasjon/søk

INF4500 eksempler

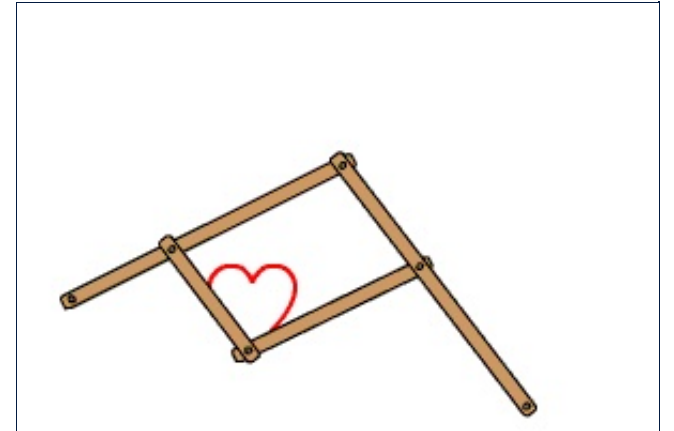
- 2014 studenteksempel - Torjus Spilling
- Mats



Pantograf

En mekanisk kopieringsinnretning

- INF4500-2014 studenteksempel - Thomas Knaplund Benjaminsen, Haakon Drews



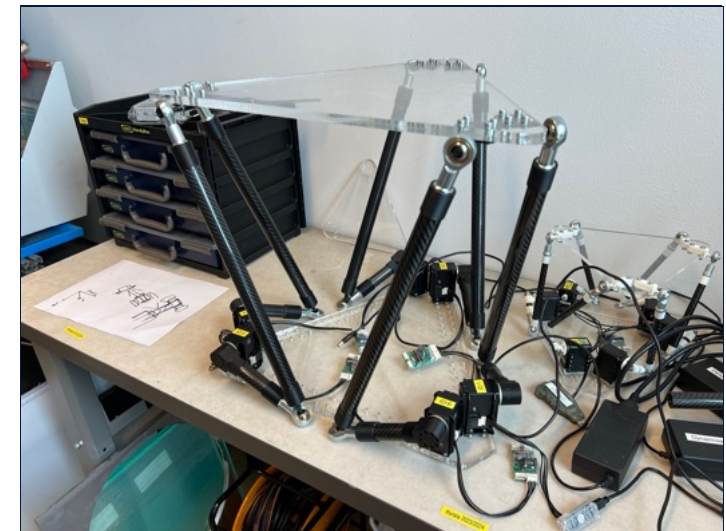
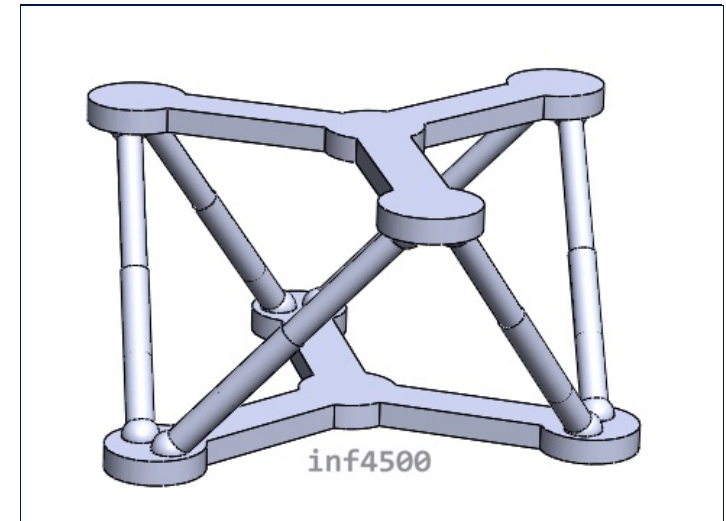
Stewart-plattform

En enkel 6 DOF (frihetsgrader) mekanisme

- Seks lineære aktuatorer
- Enheter plassert på den øvre platen kan beveges i 6 DOF

Eksempel

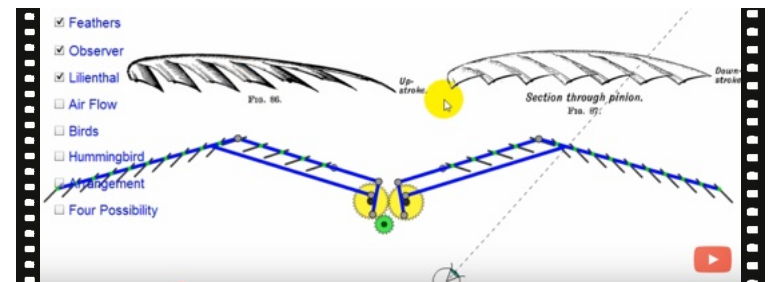
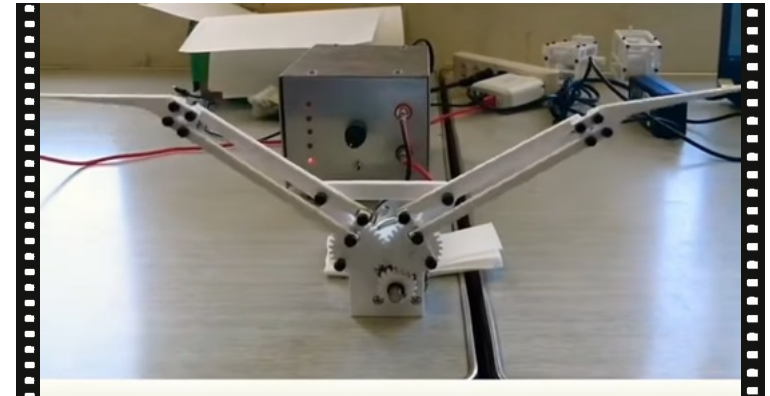
- Hydrauliske sylindere
- Dynamixel-servoer
 - Dynamixel-servoer brukes her også som passive vinkelsensorer
- Masteroppgave ROBIN klubb live prosjekt



Vinger og fjær

En mekanisme inspirert av fugler

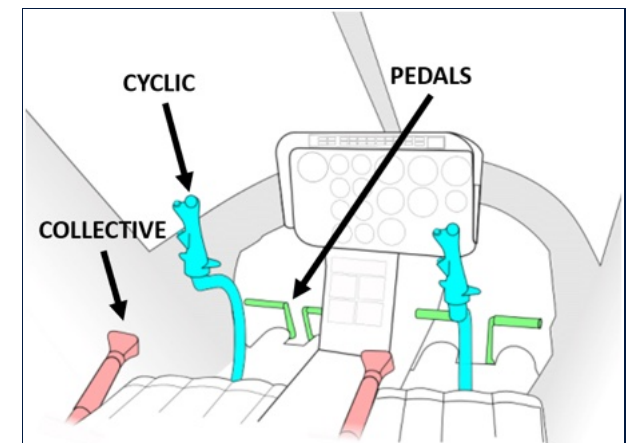
- Filmen nederst viser hvordan fjær optimaliserer luftstrømmene



Helikopter - rotor

I et helikopter må rotorbladenes vinkel (pitch) kunne styres av piloten

- Kregning av helikopteret med pilotens styrestikke (cyclic) - sideveis, fram, bakover
 - Rotorbladene må kunne forandre vinkel automatisk avhengig hvilken side de er på helikopteret
- Øke/minke løft
 - Alle rotorbladene må kunne øke/minke vinkel samtidig avhengig av pilotens collectiv-stikke



Differensial - bil

Eksempel - bakhjulsdrift

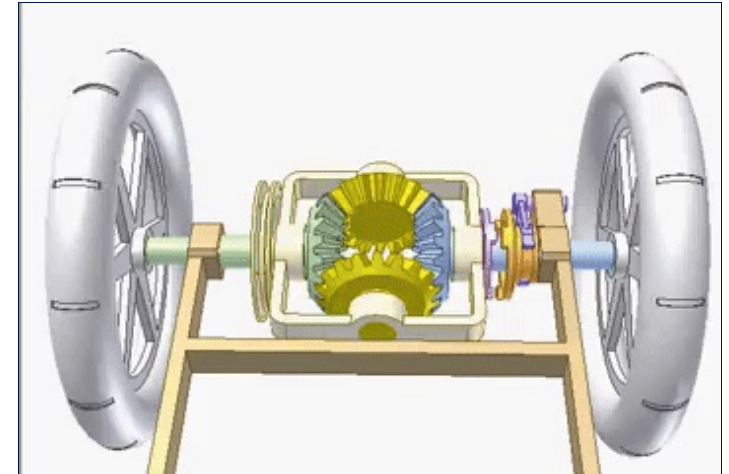
Bakhjulene må kunne rotere med forskjellig hastighet i svinger, samtidig med at all motorkraft må kunne overføres til hjulene

Løsning

- Bruk av en differensiell kobling

I øverste figur ser vi hvordan dette løses hvis vi antar at motorkraften dreier hele huset tannhjulene sitter i

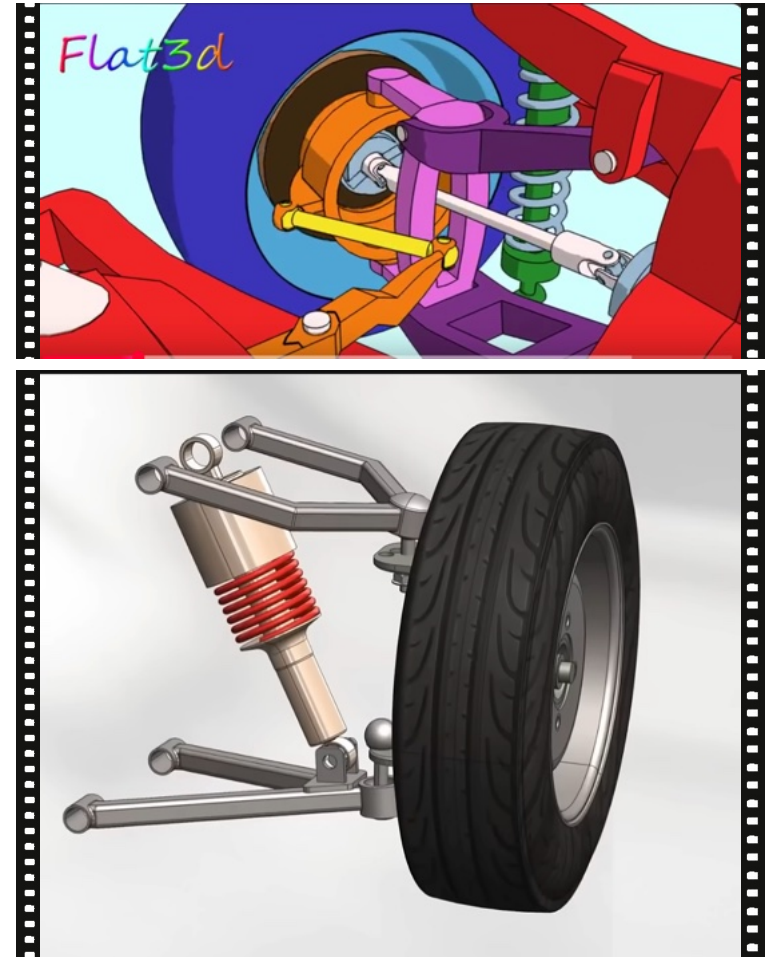
- I nederste film ser vi hvordan motorkraften overføres til huset via et lite tannhjul (hypoid gir)



Fjæring, styring og kraftoverføring - bil

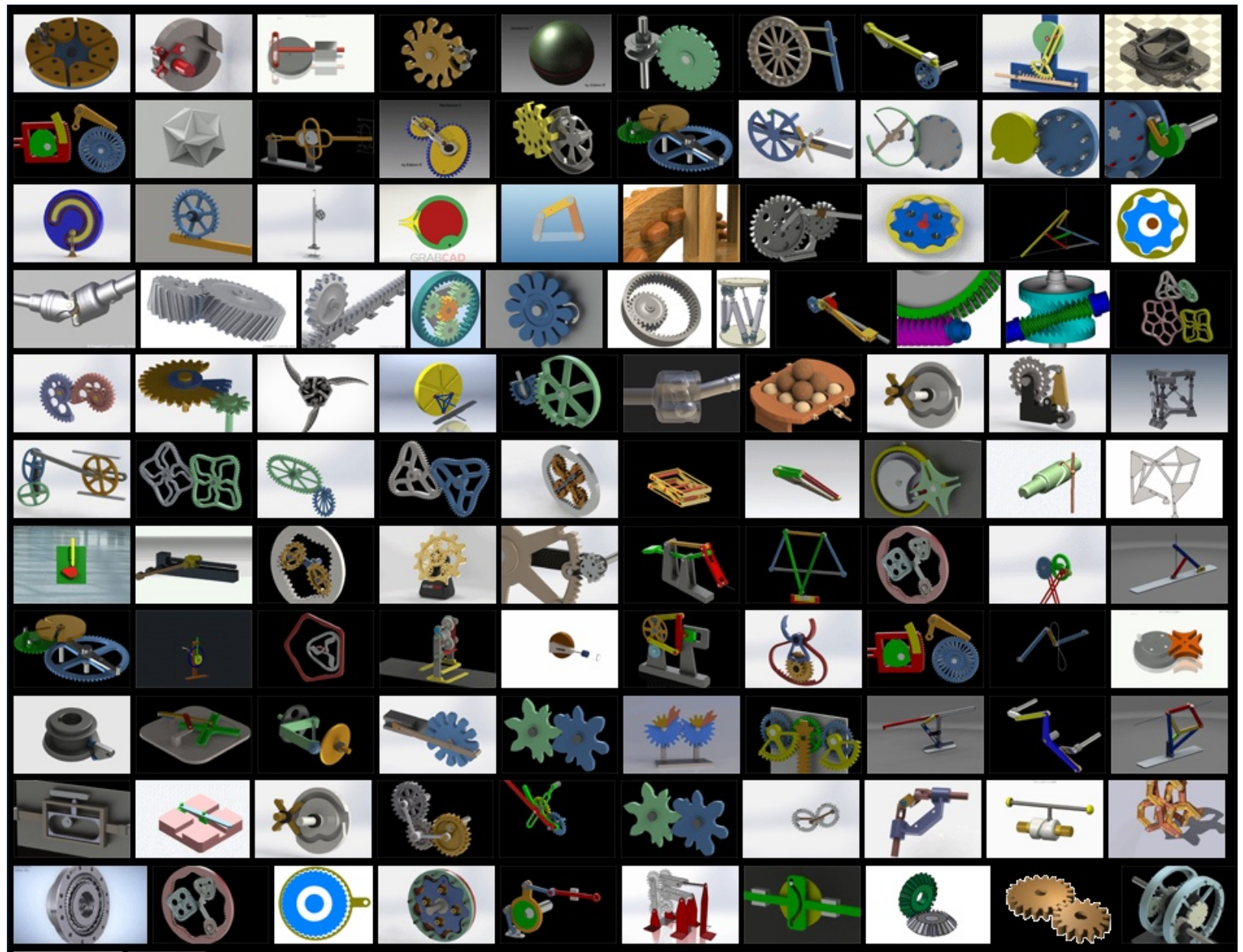
I øverste film ser vi mekanismer som:

- Vrir hjulet sideveis (styring)
- Tillater hulet å bevege seg opp/ned (fjæring)
- Overfører roterende motorkraft via drivaksel og 2 universalledd



Andre eksempler på mekanismer

Fra gamle IN5590



Gir

En mye brukt metode for å skalere dreiemoment og hastighet er å bruke gir

Man kan enklest forstå skaleringen av dreiemomentet ved å tenke at kraft er lik motkraft, og derfor vil kreftene i berøringspunktet være like men ha motsatt retning

I øverste figure er lengde på armvektorene er gitt av radius på hjulene og vi får, med $\theta = 90$ grader

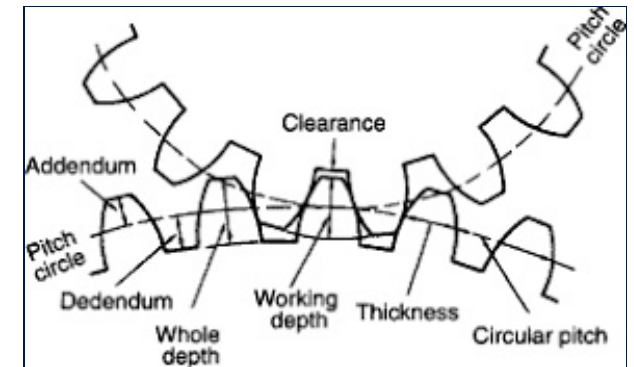
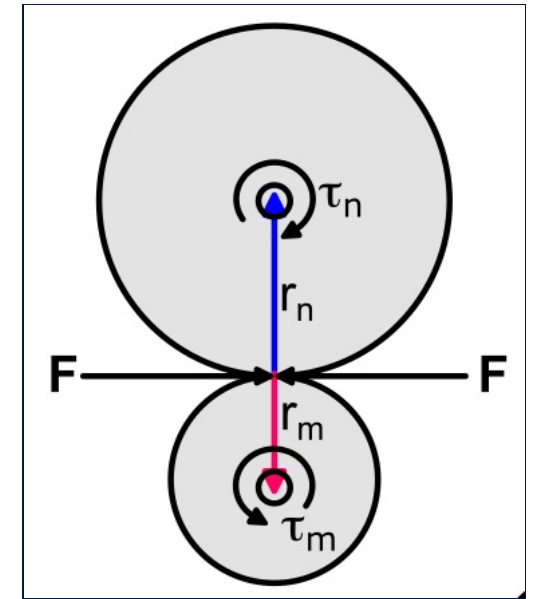
$$F = \tau_m / r_m = \tau_n / r_n$$

Dreiemomentene vil derfor bli proporsjonale med radius på hjulene

$$\tau_m = \tau_n \frac{r_m}{r_n}$$

Vi får tilsvarende men motsatt skalering av hastighet

Vi antar at tannavstand (pitch) er lik på begge hjulene. Dette er et krav for å kunne kombinere to tannhjul, se nederste figur



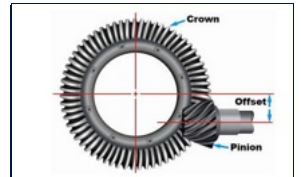
Gir - typer

Typer, illustrert fra øverste figur og nedover

- Rett - enkelt, billig å lage, mye vibrasjoner/slag/støy
- Skrå/helisk - mindre vibrasjoner/slag/støy, jevnere gange
- Konisk - for å endre akseretning
- Hypoid - skrå og forskjøvet, for å endre akseretning - veldig myk gange, brukes der stor kraft skal endre retning, bakakslinger, lastebiler osv. Eksempel: [bil bakaksel](#)
- Planet - stor styrke pga. gunstig kraftfordeling (utøver kun vridningskraft på omgivelsene), kompakt, seriekobles ofte
- Orm - Stor utveksling, kan ikke overføre kraft tilbake, mye friksjon
- Cycloid/harmonic drive - stor utveksling, ekstremt lite slakk, brukes i roboter og CNC maskiner (neste side)

Andre illustrasjoner

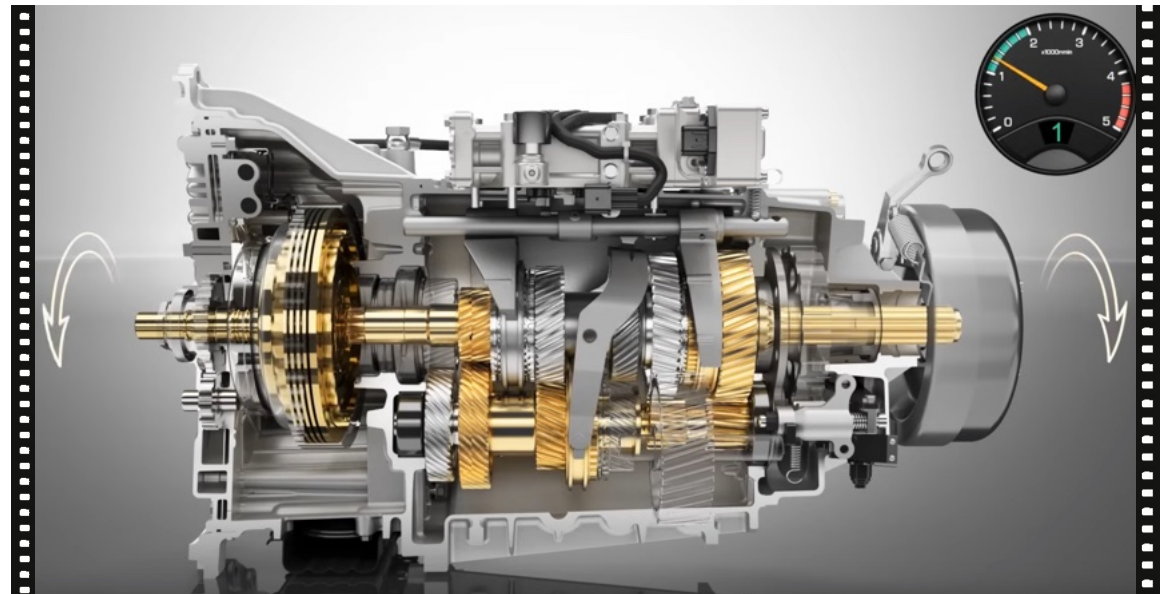
- [IN5590 mekanismer](#)



Girkasse

Eksempel, synkrnosert manuell girkasse for bil

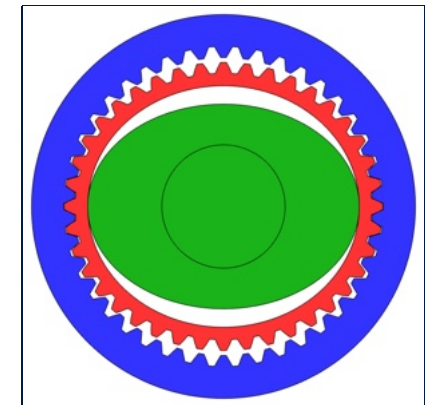
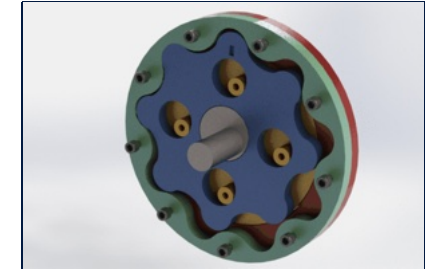
- Alle girene er til enhver tid i inngrep med hverandre, dette for å unngå slitasje på tennene
- Hvilke gir som kobles til drivakselen velges med girspaken via synkroniseringsmekanismer og clutchhylser som sørger for at girskiftet skjer jevnt ved å matche rotasjonshastighetene før giret kobles inn



Gir, sykloid/harmonisk drive

Ofte brukt i robotikksammenheng samt i høypresisjonsanvendelser

- Utveksling kan være mellom 20 og 300
- Lite eller ingen backlash (slakk)
- Kompakt
- Tåler høyt dreiemoment
- Kan lages med hul aksling der man kan føre ledninger og slanger gjennom
- Kan også integreres med motor (BLDC)

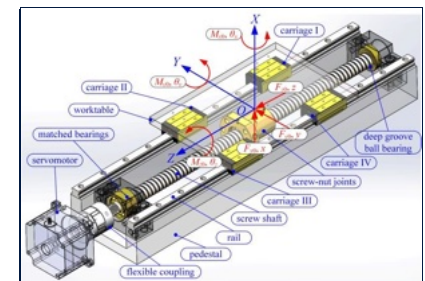
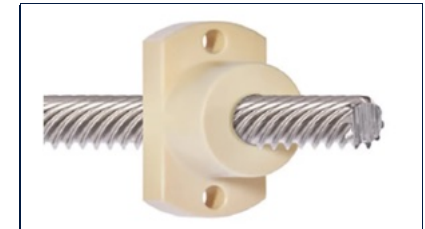


Gir - rotasjon til lineær

Vanlige løsninger

- Tannstag - lav utveksling
- Glidelager - høy utveksling, middels friksjon, lite støy
- Kulemutter - høy utveksling, høy styrke, lav friksjon, endel støy

Kulemutter brukes i CNC-maskiner der man trenger høy styrke, høy utveksling og ingen slark



"Compliant" vs. stive aktuatorer

Ved høy girutveksling virker kraftoverføringssystemet bare en vei. Dette skyldes friksjonskrefter som blir forsterket

- Motorens dreiemoment blir kraftig forsterket og man får en saktegående men sterk bevegelse ut
- Tilfører man kraft på utgangen av systemet vil ikke motoren rotere, vi får et stivt system
- Vanlige industriroboter har ofte høy girutveksling og kombinert med høy effekt/kraft og høy fart, utgjør de en sikkerhetsrisiko for mennesker som måtte være i nærheten. Derfor kreves sikre soner

I noen sammenhenger kan man bruke saktegående motorer med høyt dreiemoment i kombinasjon med lav, eller ingen girutveksling. Dette refereres til som compliant

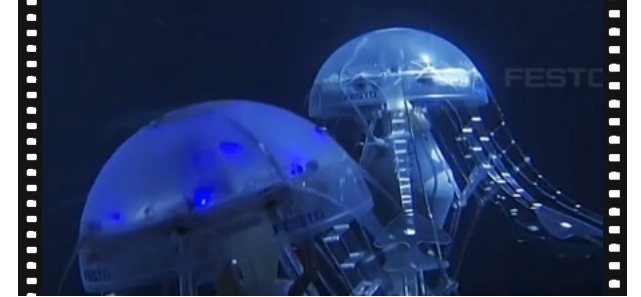
- Motoren, sammen med vinkelsensor og motordriver vil da kunne justeres slik at aktuatoren blir myk. Det er magnetfeltet som da gir mykheten
- Slike roboter er mer egnet til nær omgang med mennesker og dyr
- Lett å lage roboter som er robuste og kan hoppe



Myk robotikk

Eksempler der selve stukturene er laget av mykt/fleksibelt materiale

- I nederste eksempel forandrer strukturene form ved å pumpe inn veske (hydraulikk)

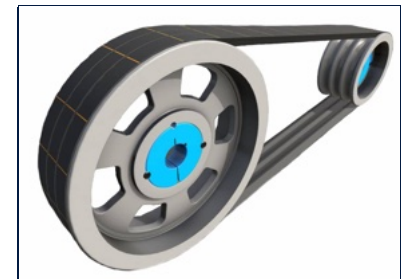


Kjeder og belter

En annen mye brukt måte å overføre kraft på, samt omforme rotasjon til lineær bevegelse på, er kjeder og belter

Vanlige typer

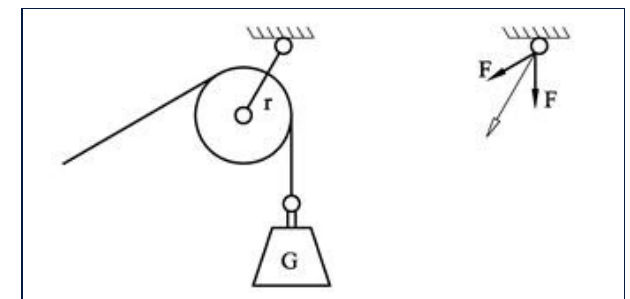
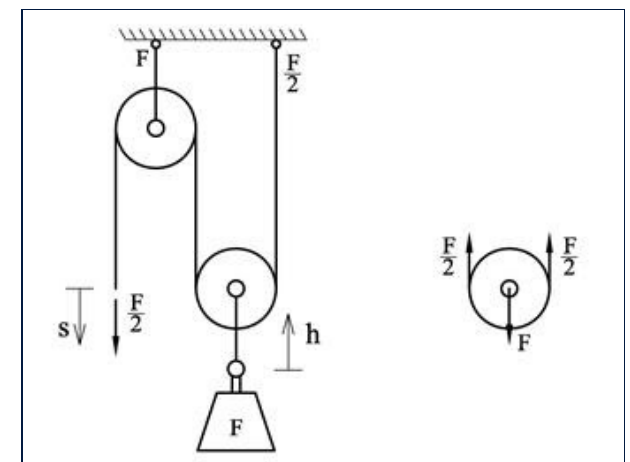
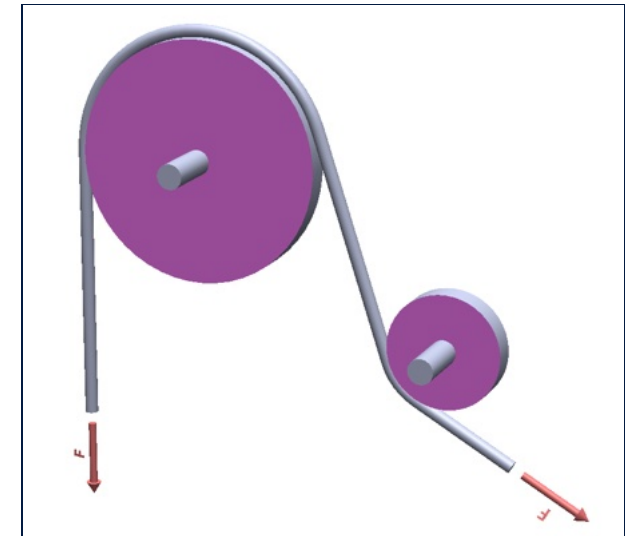
- **Kjede** - Vanligvis i metall, små og store dimensjoner, høy styrke, kontrollert posisjon, mye støy ved høye hastigheter
- **Belte med tenner** - Relativt stor styrke, kontrollert posisjon, middels støy ved høyere hastigheter
- **Belte uten tagger** - Ikke kontrollert posisjon, lav støy ved store hastigheter



Taudrag

Et belte, kjede, tau, wire som går over hjul/trinse som ruller fritt, vil ideelt sett ha samme kraft i seg gjennom hele forløpet. Denne kraften kalles taudrag/ snordrag.

Dette fenomenet er nyttig å bruke i utregninger og analyser av mekaniske systemer som inneholder slike element



Føringer

For å begrense antall frihetsgrader til et objekt, fins det flere typer føringer, der typiske temaer er lav friksjon, høy presisjon, lav støy, slitasje, varmeutvikling, hastighet osv.

Lineære føringer for høy presisjon

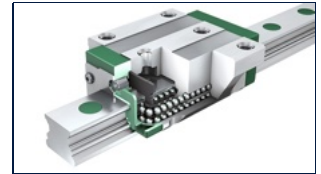
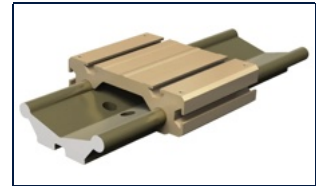
- Glideskinner - spesialmateriale for lav friksjon, billig, lav støy
- Rulle/kulelagerføringer - basert på kuler/sylindre som ruller uten å gli, høy styrke, høy presisjon, lav friksjon

Roterende føringer for høy presisjon

- Glidelager/foringer - foringer laget av lavfriksjonsmateriale, billig, lav støy
- Kulelager - basert på kuler som ruller uten å gli, høy styrke, presisjon, lav friksjon
- Rullelager - basert på sylindre eller nåler som ruller uten å gli, ekstremt høy styrke, presisjon, lav friksjon

For spesielle anvendelser kan også magnetskinner brukes

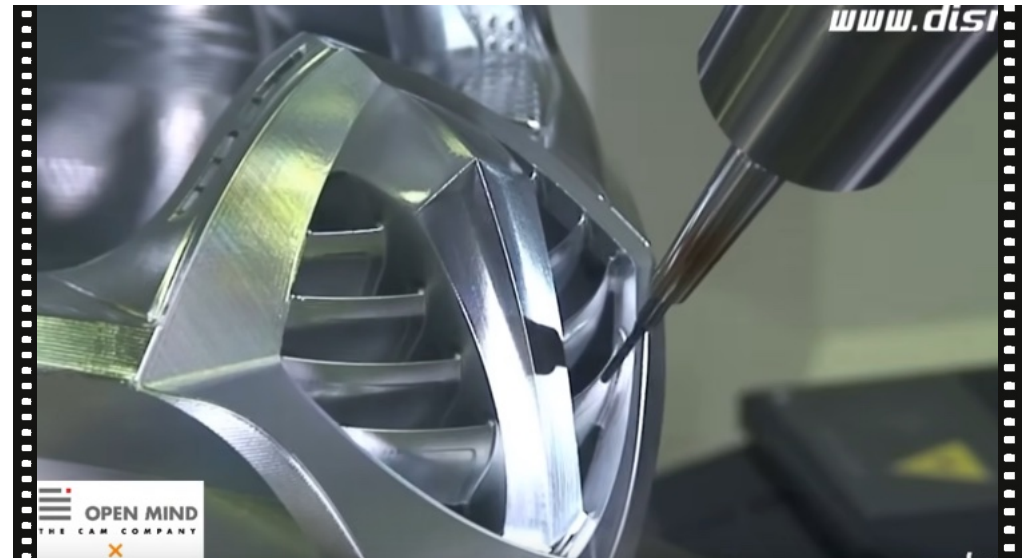
For rask prototyping (kortvarig bruk) slik som i obliger i IN1080 holder det ofte med en skrue som roterer i et hull. Er det lite krav til friksjon kan PLA (3D printet plast) gli greit mot seg selv og andre materialer



CNC

Ved bruk av kulebaserte føringer og lagre, samt vinkel-/posisjons-sensorer og avansert motorstyring, kan svært høy presisjon i kombinasjon med stor kraftoverføring og høy bevegelseshastighet oppnås

- Eksempel: 5-akse Computer Numerical Control (CNC) maskinering



Frihetsgrader

Formelle definisjoner

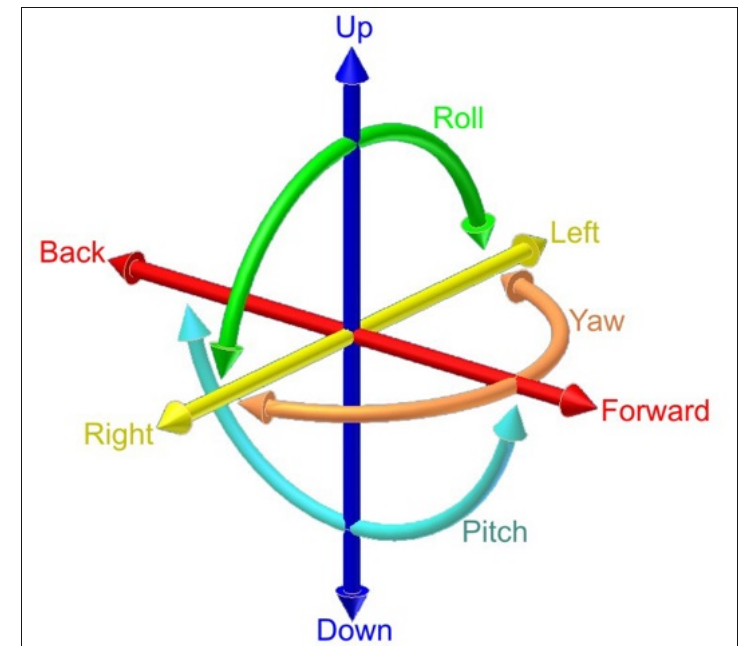
- Et stivt legeme i et tredimensjonalt rom $\mathbb{R}^3$ kan bevege seg på 6 måter

Translasjon

- Bevege seg opp og ned
- Bevege seg til venstre og høyre
- Bevege seg fremover og bakover

Rotasjon

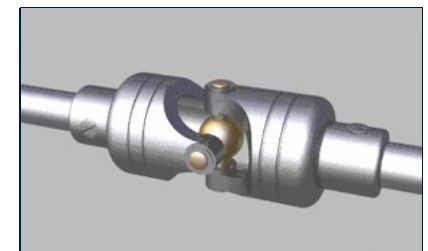
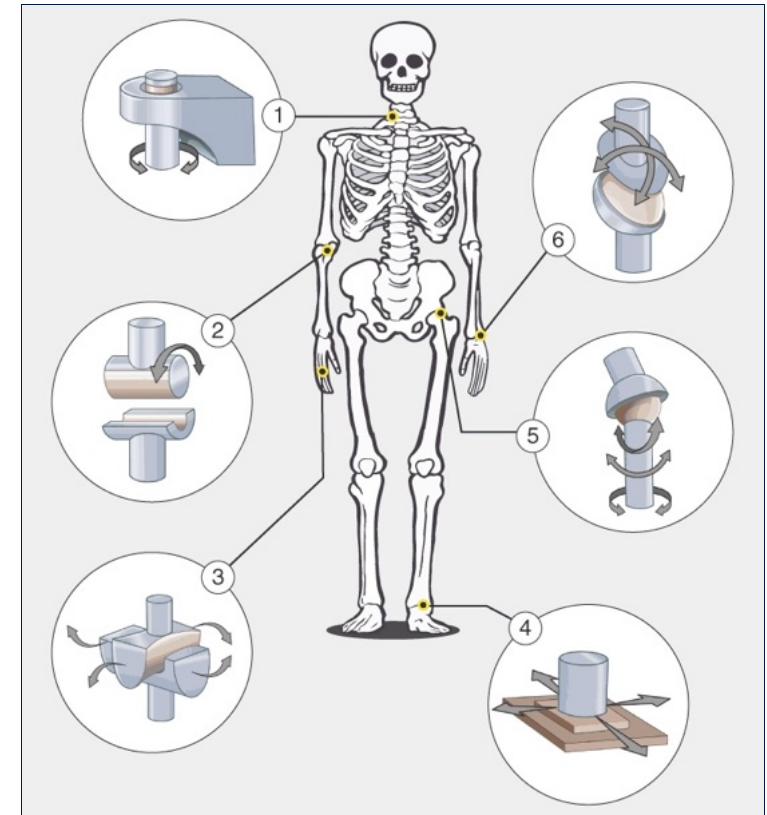
- Krenge fremover og bakover (pitch)
- Dreie til venstre og høyre (yaw)
- Krenge fra side til side (roll)



Ledd

Eksempel

- Dreieledd / hengselledd - rotasjon rundt enkel akse
- Sal-ledd - Tillater bevegelse i to plan, som bøying og strekking samt sideveis bevegelse. Et eksempel er tommelens rotledd.
- Kuleledd - Tillater rotasjon i alle retninger. Eksempler er skulderleddet og hofterleddet.
- Planarledd - glideledd over et plan
- Unversalledd - Mye brukt innen mekanikk - rotasjon i to retninger (nederste figur)
- Prismatisk ledd - Innen mekanikk: Sylindrisk glideledd i en dimensjon (inn/ut)
- Sylindrisk - Innen mekanikk: Prismatisk, men med mulighet for rotasjon

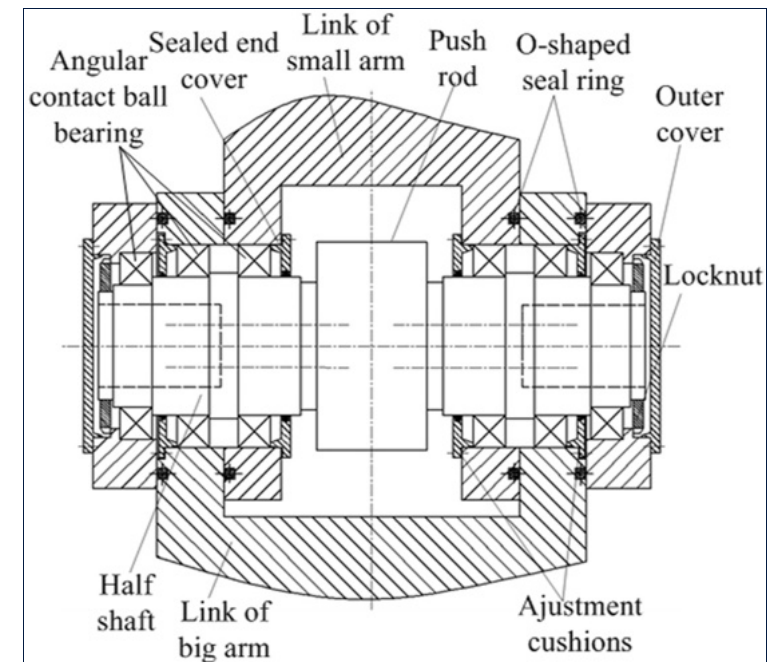


Ledd - prototyping/produkt

For rapid prototyping bruker vi enkle løsninger, ofte bare en skrue i plast

Produkter i salg må ha varige løsninger, noe som ofte krever mer omfattende design

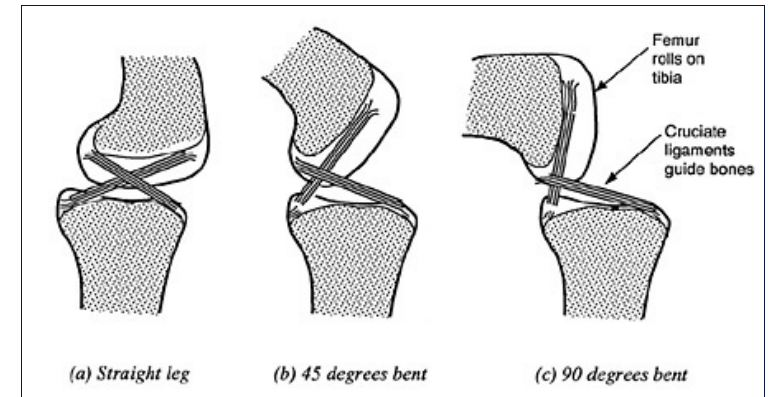
- Eksempel: robot arm



Biologiske myke mekanismer

Eksempel

- Korsbåndene i kneet
 - Korsbånd er alltid stramme under leddbevegelse og begrenser de to stive delene (beinene) til riktig posisjon for alle leddvinkler



Fingerledd/ligamenter

En avansert biologisk mekanisme

Eksempel

- Den samme senen bøyer eller strekker de to nest ytterste knoklene avhengig av vinkelen mellom dem

