

Samenvatting Werktuigkunde – Machines aan het werk (Patrick De Baets, 2017, UGent)

Deel 1: Inleiding

Niet te kennen

Deel 2: Productietechniek

Gieten

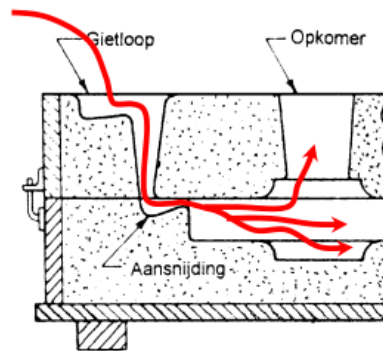
Het gietproces

Belangrijkste aspecten:

- Stroming van het gesmolten metaal in de gietvorm
- Warmtestroom tijdens het stollen
- Vermindering van het volume vóór, tijdens en na het stollen

Proces:

- 1) Gesmolten metaal uit een gietpan in de gietvorm
 - Turbulentie zo laag mogelijk: vorm gietloop
 - o Beschadiging wand gietvorm
 - o Lucht meegezogen → holtes
 - Slak → bescherming gesmolten metaal
 - Viscositeit → voor volledige vulling
- 2) Stollen
 - Afkoelsnelheid
 - o Verhouding oppervlakte tot volume
 - Afkoeling langzamer voor grote, zware stukken
⇒ Grote kristallen, lage sterkte
 - o Warmtegeleidbaarheid gietvorm (metaal > zand)
 - **Slink** → volumevermindering van *vloeibaar* metaal en door fase overgang
 - o Compenseren door opkomers
 - o Holtes
 - Vrijkomen van gassen → gasbellen (porositeit)
- 3) Vaste fase: verdere afkoeling
 - **Krimp** = volumevermindering van *vast* metaal → krimpscheuren
- 4) Verwijderen van gietloop, opkomers en bramen



Materialen

- **Gietijzer**
 - ⇒ Hoog C-gehalte → lager smeltpunt → korter stollingsinterval (+)
- **Gietstaal**
 - ⇒ Laag C-gehalte → hoger smeltpunt → groter stollingsinterval (-)
 - ⇒ Lasbaar
 - ⇒ Zeer goede mechanische eigenschappen:
 - o Treksterkte
 - o Vloeigrens
 - o Hardheid
 - o Taaiheid

- Legeringen van:
 - o Aluminium → licht en goed bewerkbaar
 - o Koper (brons: koper + tin en messing: koper + zink)
 - o Zink → laag smeltpunt, lage viscositeit
 - o Magnesium → zeer licht

Gietmethodes

Gieten met eenmalige vorm

Zandgieten

- Sterkte: slecht
- Vormcomplexiteit: slecht
- Ruwheid oppervlak: hoog (zandkorrel)

Verloren modellen in was

- Middelgrote tot grote series → wasboom
- Sterkte: iets beter → warmte beter afgevoerd
- Vormcomplexiteit: slecht
- Ruwheid oppervlak: lager (fijner dan zand)

Verloren schuim methode → piepschuim (polystyreenschuim)

- Vergelijkbaar met verloren was gieten

Gieten met matrijzen

(+)

- Snelle productie → grotere reeksen
- Hoge nauwkeurigheid
- Mooi oppervlak

(-)

- Hoge investering

Manuele gietmatrijs

- Voor non-ferrolegeringen → lager smeltpunt
- Sterkte: goed → betere conductie, korter stollingsinterval
- Vormcomplexiteit: slecht
- Ruwheid oppervlak: nog iets lager

Spuitsgieten (gemechaniseerd)

- Vloeistof onder *hoge druk* ingespoten
 - o Goede vulling
 - o Minder kans op holten
- Ontluchting! (ontluchtingskanalen, afzuigen, vacuüm)
- Sterkte: goed
- Vormcomplexiteit: beter
- Ruwheid oppervlak: idem metalen gietmatrijs

Centrifugaal gieten

- Gieten van ronde stukken → bv. walsrollen, glijlagers
- Gietvorm: holle cilinder

Continu gietproces

- Warmhoudoven → buffervat → matrijs → waterkoeling → transportrollen → snijwerktuig
- Matrijs = watergekoelde coquille
- Gietijzer, staal, legeringen van lichte en zware metalen

Voordelen van gieten

- Definitieve vorm en afmetingen → weinig of geen nabewerking nodig (+: moeilijk bewerkbare stukken vervaardigen)
- Vrij ingewikkelde stukken in één bewerking
- Efficiënte seriefabricage mogelijk
- Heel zware stukken mogelijk

Poedermetallurgie

Proces

- 1) Poeder: korrels (0,1 μm tot 1 mm)
 - Zuivere metalen → ijzer, koper, aluminium, tin, nikkel, titaan, wolfram
 - Legeringen → staal, roestvast staal, messing, brons
- 2) Mengen
 - Zeer fijne poeders → vlugge oxidatie → ontploffingsgevaar
- 3) Persen
 - M.b.v. matrijs en een pers (hydraulisch of mechanisch)
 - Gepaste gradatie in korrelgrootte van korrels
 - Hoge druk (enkele duizenden bar)
 - Stroomt niet zoals vloeistof: grote wrijving (inwendig tussen korrels en op wand van matrijs)
 - o Geen gelijkmatige druk → geen ingewikkelde vormen mogelijk
 - **Isostatisch verdichten**
 - o Poeder omsloten door zak in kunstrubber of pvc
 - o Onderworpen aan hoge vloeistofdruk (tot 4000 bar)
 - o (+): druk op alle plaatsen en in alle richtingen gelijk + geen drukverlies door wrijving
- 4) Sinteren
 - Verhitten van korrels tot op temperatuur waarop ze net niet smelten
 - o Korrels klitten aan elkaar door diffusie
 - o Verharden van materiaal (verbetering mechanische eigenschappen)
 - Warm isostatisch persen → eliminatie porositeit
- 5) Kalibreren
 - Eigenschappen vaststellen

Voordelen/nadelen

Voordelen:

- Gewenste eigenschappen
- Vrij nauwkeurige maten → geen nabewerking nodig
- Geautomatiseerd → geen speciaal geschoolde arbeidskrachten

Nadelen:

- Minder hoge mechanische eigenschappen
- Geen al te grote stukken
- Geen ingewikkelde vormen
- Hoge investering

Toepassingen

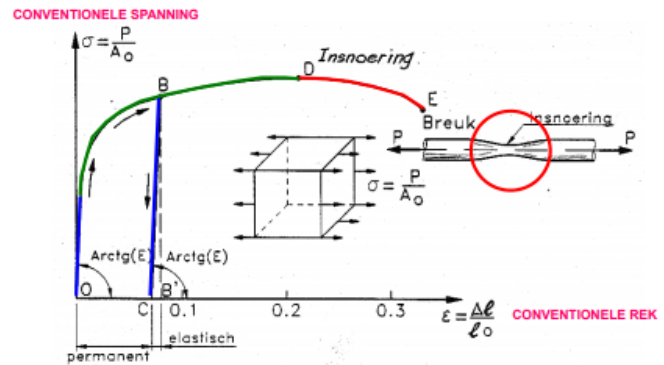
- Automobiellbouw → tandwielen
- Vliegtuigbouw → turbineschoepen
- Productie van machineonderdelen
- Snijgereedschap → wolframcarbide korrels

Bewerken door vervormen

Vervorming van metalen

De trekkromme

- Conventionele spanning: $\sigma = \frac{F}{A_0}$
vs ware spanning: $\sigma = \frac{F}{A}$
- Rek: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$
vs ware/logaritmische rek: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
 $\Rightarrow \varepsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}$
- Elasticiteitsmodulus: $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \rightarrow$ helling
- Plastische vs elastische verlenging
- Insnoering → breuk
- Treksterkte = maximumkracht (in D) gedeeld door oorspronkelijke oppervlakte van doorsnede.
- **(Koud)verstevinging**: spanning moet toenemen om de permanente vervorming te laten groeien:
 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > 0$



elastische vervorming $\sigma = E \varepsilon$ lineair verband

plastische vervorming = permanente vervorming

Driedimensionale spanning

- Spanning → inwendige krachtwerking binnen een materiaal
 $\Rightarrow$ Normaal- en schuifspanningen
- Normaalspanning (trekspanning) → positief vs drukspanning → negatief
- Vervormend materiaal: spanning splitsen
 - o Hydrostatische spanning $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$
 - o Deviator s
- Grotere rekken zonder breuk: hogere temperatuur & **spanningstoestand**
 - o Veel grotere verlengingen zonder breuk door in geschikte richtingen te drukken.

Plasticiteitscriteria

- **R. von Mises** → som van de kwadraten van al de componenten van de deviator
 $\Rightarrow$ Plastische vervorming van zodra: vergelijkingsspanning $\sigma_{vgl} =$ vloeigrens σ_x
 $\Rightarrow$ Vloeigrens $\sigma_x =$ spanning waarbij permanente verlenging x % bedraagt

$$F(s_{ij}) = \left[\frac{3}{2} (s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{zz}^2 + s_{xy}^2 + s_{yx}^2 + s_{yz}^2 + s_{zy}^2 + s_{zx}^2 + s_{xz}^2) \right]^{1/2}$$

$$\sigma_{vgl} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6\sigma_{xy}^2 + 6\sigma_{yz}^2 + 6\sigma_{zx}^2]^{1/2}$$

$$\leq \sigma_0$$

- **Criterium van Tresca**
 $\Rightarrow$ Hoofdspanningen

$$\max \{ |\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}|, |\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz}|, |\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx}| \} \leq \sigma_0$$

Arbeid

Arbeid (= energie) nodig om een stuk permanent te vervormen.

→ Kracht x verplaatsing (verlenging)

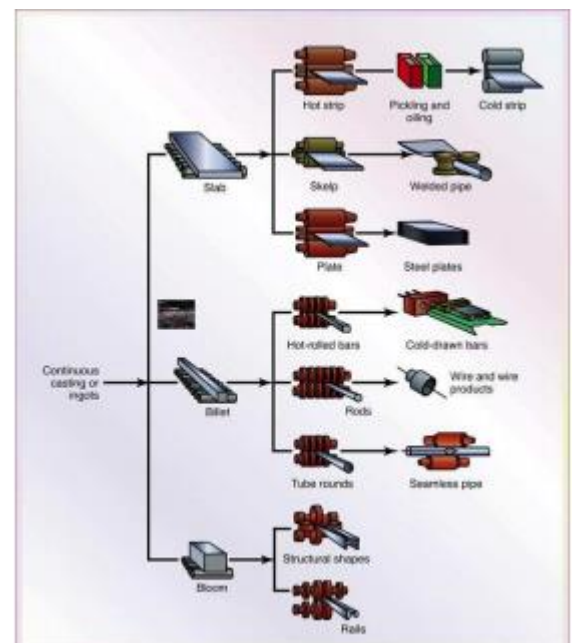
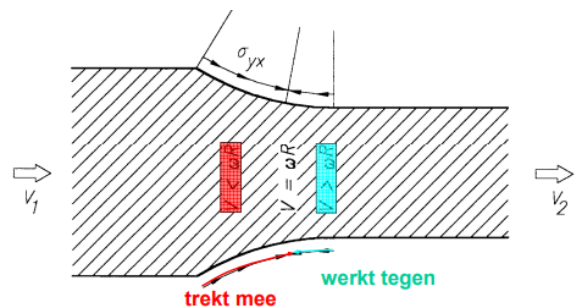
Temperatuur

- Hogere temperatuur: **warm vervormen**
 - o Lagere elasticiteitsgrens → minder kracht en arbeid nodig om bepaalde vervorming te bereiken
 - o Grotere vervormingen zonder versteviging of breuk
 - o Vervorming boven rekristallisatietemperatuur
- Lagere temperatuur: **koud vervormen**
 - o Effen oppervlak (geen oxidatie)
 - o Nauwkeurigere maten
 - o Hogere elasticiteitsgrens en treksterkte → betere mechanische eigenschappen

Walsen

Walsen van een plaat

- Dikte plaat verminderen
- Continu
- **Warm** → dikke staalplaten (> 5mm) (schepen, bruggen)
- **Koud** → dünnere staalplaten (enkel µm dik) (autocarrosserie, behuizing)
- Behoud van massa: $V_1 \cdot h_1 = V_2 \cdot h_2$
- Snelheid walsrollen: $V_1 < \omega R < V_2$
- Resultierend moment van de wrijvingskrachten → geleverd door de aandrijving
- Hydrostatische spanning = grote druk → veel vervormen met weinig neiging tot scheuren
 - ⇒ $\sigma_m = \sigma_{xx} - s_{xx}$
 - σ_{xx} negatief en s_{xx} positief
 - σ_m negatief : DRUK
- Negatieve σ_{xx} → grote σ_{yy} nodig
 - o Smering contactoppervlak → σ_{xx} minder groot
 - o Kleinere diameter walsrollen → σ_{xx} minder groot
 - o Trekken aan de plaat (door o.a. andere walsrollen) → positieve σ_{xx} toegepast
- Ingot (blok metaal) vs slabs (dikke platen)
- Grote drukkracht → doorbuigen walrollen → platen met ongelijke dikte
 - o Tonvormige walsrollen
 - o Ondersteuning door andere rollen (bv. troswalstuig: 20 rollen)



Staven, profielen, buizen

Mogelijkheden walsen:

- Staven (rechthoekig, rond → draad getrokken)
- Naadloze buizen (m.b.v. doorn) → chemische nijverheid
- Liggers en spoorstaven
- Profielen → walsrollen met gepaste groeven

- Schroefdraadwalsen:
 - o Hoge productiviteit → grote reeksen
 - o Nauwkeurige schroefdraad
 - o Hoge oppervlaktekwaliteit
 - o Grotere sterkte (walsvezel ononderbroken <=> verspanen)

Toepassingen (zie slides)

- Scheepsconstructies
- Stalen brugdek
- Autocarrosserie
- Huishoudmachines

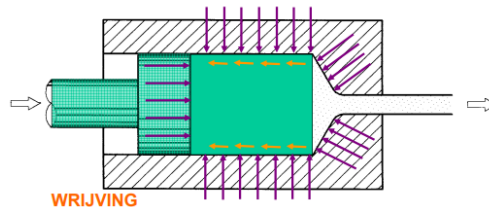
Extruderen en trekken

Extruderen

Directe extrusie

Metaal wordt met een hoge druk door een matrijs met een opening geduwd

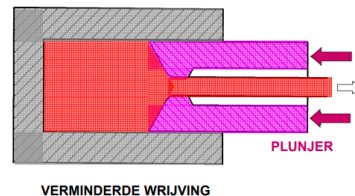
- Lange staaf → doorsnede komt overeen met opening matrijs
- M.b.v. plunjer/zuiger (en een hydraulische pers voor het aandrijven van de plunjer)
- Grote wrijvingskrachten → smeermiddel (olie, zeep, zacht metaal)



Indirecte extrusie

Matrijs wordt zelf verplaatst in het vat

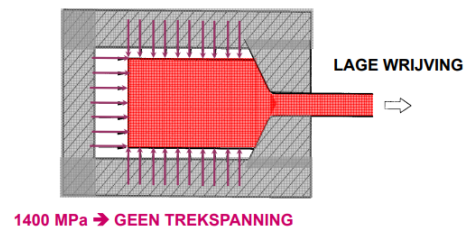
- Naadloze buizen: plunjer in ingot persen, vervolgens korte buis door walsen/trekken verlengen



Hydrostatische extrusie

Metaal wordt onder een alzijdige druk gebracht door een vloeistof.

- Bruikbaar voor weinig vervormbare materialen



Warm extruderen

- Staal: 900 tot 1300 °C
- Koper : 650 tot 950 °C
- Aluminium: 350 tot 450 °C
- Oxidatie en slijtage!

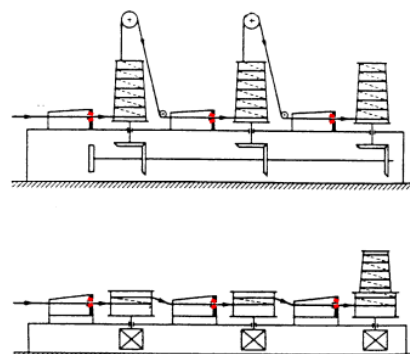
Koud extruderen

- Voor kleinere diameters
- Aluminium:
 - o Ronde en rechthoekige buizen
 - o Profielen met zeer complexe geometrie

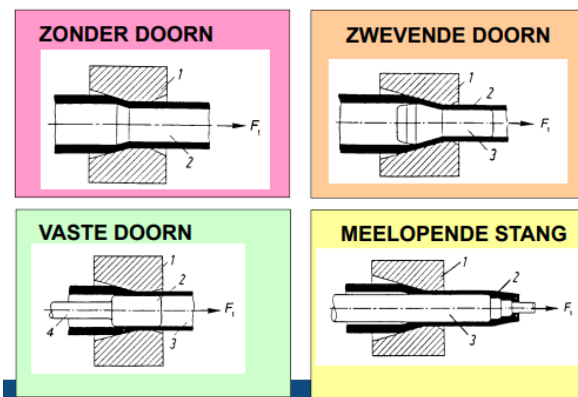
Trekken

Reeds bestaande staaf wordt door een opening in een matrijs gedwongen door er aan te trekken.

- Verlenging staaf: combinatie trekkracht en drukkracht (bijgevolg geen breuken)
- Draadtrekmachine (bv. metaaldraad)
 - trekstenen en haspels
 - ⇒ Smering en koudvervorming



- Trekken van naadloze buizen:



Smeden

Algemeen

Een stuk blijvend vervormen door er een of meerdere malen op te drukken.
Kracht hierbij wordt geleverd door een hamer of een pers.

Gebeurt meestal warm:

- Staal: 850 tot 1150 °C
- Aluminium: 400 tot 550 °C

Nadelen warm smeden:

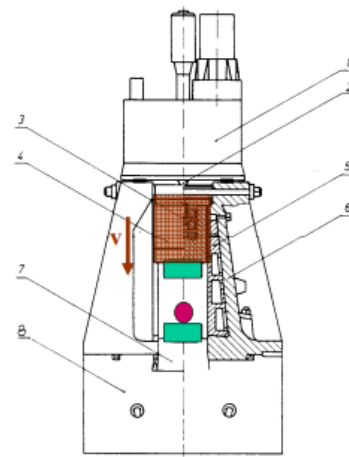
- Kosten van het opwarmen
- Moeilijke manipulatie van het stuk
- Oxidatie van het oppervlak
- Minder goede nauwkeurigheid

Hamers en persen

Smeedhamer

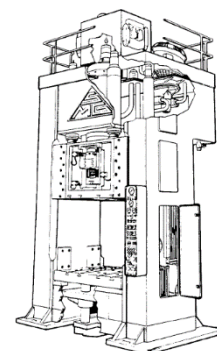
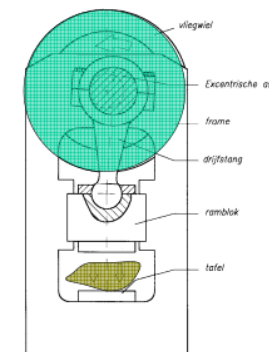
- Massa: 7000 kg
- Snelheid: 5 m/s → snel!
=> Energie van 90 kJ
- Voor grotere energie: val hamer versneld door luchtdruk → tot 1000 kJ
- Frequentie: tot 100 slagen/minuut

$$M \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2$$



Mechanische pers: kruk-drijfstaangmechanisme

- Vliegwiel: energiebuffer = $0,5 \cdot I \cdot \omega^2$
- Goedkoop
- Hoge snelheden



Hydraulische pers

- Traag (0,8 m/s)
- Grote krachten (600 MN)

Vrij smeden

Werkstuk tussen twee vlakke matrijzen.

- Na iedere slag wat draaien en/of verschuiven
 - o Vergt ervaring
 - o Geen grote nauwkeurigheid

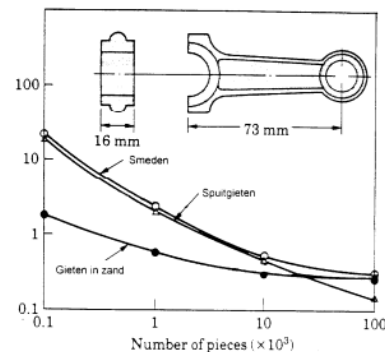
- Niet-homogene vervorming: sterkere vervorming in het midden dan aan de zijkanten
- Wrijvingskrachten → tonvormig
- Afkoeling boven- en ondervlak → stijfheid in contactoppervlakken met matrijs

Matrijssmeden

- Voordelen:
 - o Ingewikkeldere vormen
 - o Grotere nauwkeurigheid
- Matrijs → vorm van het stuk
- Achtereenvolgende stadia
- Ongelijkmatige vervorming → computersimulatie: waardevol!
 - o Ontwerp matrijs
 - o Voorspellen en vermijden van smeefouten
 - o Voorspellen en reduceren van matrijsslijtage
- **Bramen** → opnemen van overtollige materiaal, wordt nadien afgesneden

Materialen en toepassingen

- Legering: Al, Mg, Fe, Ti, Ni
- Sterkte: > gieten
- Taaiheid: > gieten
- Complexiteit: walsen < smeden < gieten
- Kostprijs: afhankelijk van aantal stukken (zie figuur)



Plaatbewerking

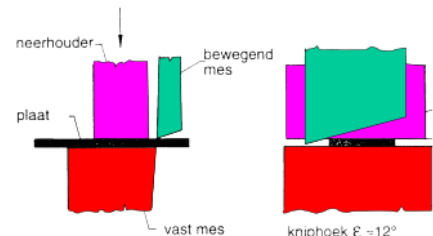
Dunne metaalplaat (enkele tienden mm dik tot 3 mm dik):
koolstofstaal, roestvast staal, aluminium, koper.

➔ Gemakkelijk koud vervormd: betere mechanische eigenschappen.

Knippen en ponsen

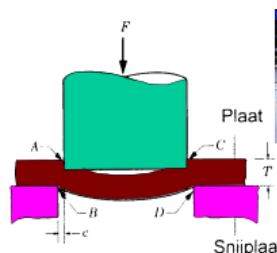
Knippen

- Neerhouder: belet dat de plaat kantelt
- Onder **kniphoeek** → verminderen van benodigde kracht
- Kleine snijspleet → grote kracht nodig, mooie snede
- Grote snijspheet → minder grote kracht nodig, minder mooie snede



Ponsen

- Snede volgt geen rechte lijn
→ ronde gaten mogelijk of andere vormen
- **Ponsstempel**



Kan ook op 'profielen'

Lasersnijden

- Vlakke plaat
- Soms profiel of buis
- Staal (tot dikte 20 mm), roestvast staal (tot dikte 15 mm), aluminium (tot dikte 10 mm)
- Complexe geometrieën
- Kleine tot middelgrote series

Branden

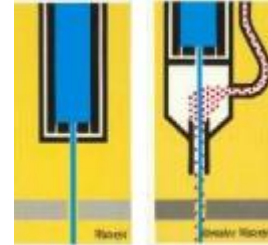
- Acetyleen zuurstof
- Dikke platen (tot 300 mm)

Plasmasnijden

- Platen tot 15mm
- Grote snelheid

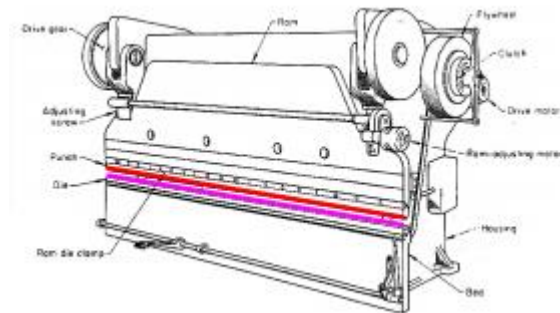
Waterstraal snijden

- Enkel water of water met abrasief (= slijp- of schuurmiddel)
- Geschikt voor alle materialen (metaal, steen, glas, ...)
- Nette snede zonder warmte-beïnvloedende zone
- Relatief traag en duur t.o.v. laser of plasma



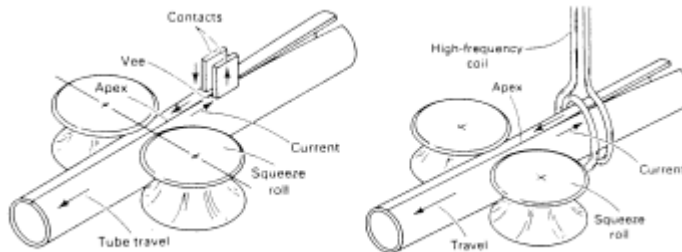
Plooien

- Plastische vervorming in een **plooipers**
- Volgorde bewerkingen is belangrijk
- Materiaal veert weinig elastisch terug
- Plooipers (zie figuur)



Rollen

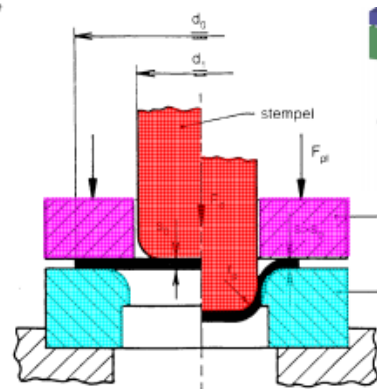
- Heel lange profielen
- Grote buigstijfheid (koud vervormd)
- Vormrollen (rollen + plooien)
- **Langsgelaste buizen** → weerstands-, inductie-, of vlambooglassen



Dieptrekken

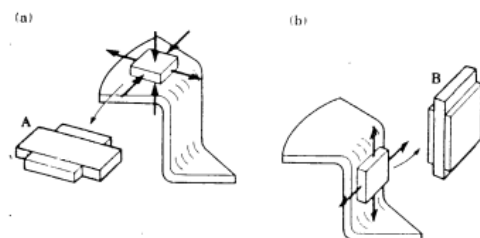
Stuk plaat vooraf in gepaste vorm geknipt wordt tussen twee matrijzen koud vervormd tot een dubbel gekromd oppervlak.

- **Kraag** geklemd tussen plooihouden en matrijs → beletten van plooien
- Omtrek plaat > omtrek stuk
- Dikte plaat < dikte stuk → dikte niet overal gelijk
- Grote investering, kleine cyclustijd



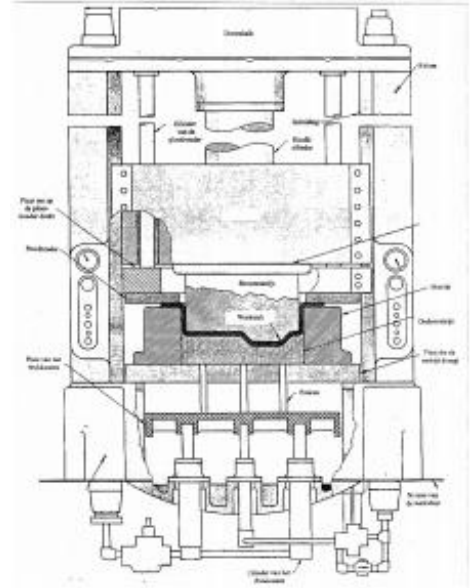
Spanningen bij dieptrekken: zie figuur

- (a) Trekspanning in radiale richting, drukspanning in richting van de omtrek
- (b) Trekspanning in verticale richting (cilindrisch deel trekt de kraag mee)



Hydraulische pers:

- 1) Vlakke plaat gevat op omtrek, tussen matrijs en plooihouder
→ vereiste kracht hiervoor geleverd door twee kleine hydraulische cilinders.
- 2) Ondermatrijs wordt door drukkussenplaat gesteund op een aantal pennen, met constante kracht opwaarts geduwd door hydraulische/pneumatische cilinders.
- 3) Hoofdcilinder drukt bovenmatrijs in de ondermatrijs.
- 4) Ondermatrijs beweegt neerwaarts, gedragen door de pennen van de drukkussenplaat, tot de ondermatrijs gestuit wordt door een vaste draagplaat → werkstuk verkrijgt zijn vorm.
- 5) Na de bewerking opent de pers en wordt de ondermatrijs opwaarts geduwd. Het werkstuk laat zich adus gemakkelijk uit de matrijs verwijderen.



Dieptrekken op **rubbermatrijs**: goedkoper + kleinere krachten nodig.

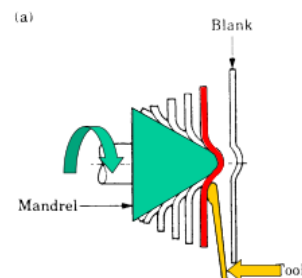
Dieptrekfouten

- Rimpelen van de rand → plooihouder duwt met onvoldoende kracht tegen de plaat
- Scheuren → lokaal te hoge vervormingen (of spanningen)
⇒ Typisch aan de rand van de bodem: zijwanden ondervinden te veel wrijving in de matrijs en kunnen de bodem onvoldoende volgen tijdens de dieptrekbeweging.
- Anisotropie → eigenschappen van de plaat zijn niet gelijk in alle richtingen (<=> isotropie)

Spinnen (of forceren)

Vervaardiging van **omwentelingslichamen**.

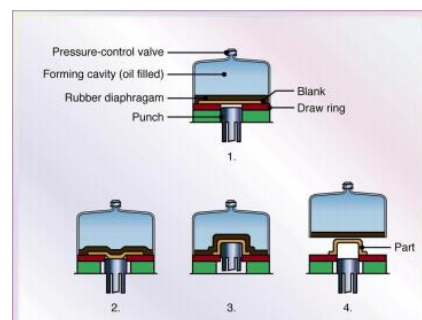
- Dunne schalen met axiale symmetrie
 - o Huis- en keukengebruik
 - o Behuizing straalmotor
- Draaiende mal en werktuig (met stomp uiteinde of wieltje)
- Manueel of automatisch



Hydrovormen

Gebruik van vloeistof (veelal olie) om plaat te vervormen.

- Relatief *goedkopere* vloeistof t.o.v. trekmatrizen
- Buisvormige constructies



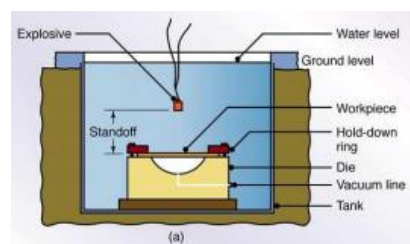
Explosieervormen

Metaalplaat wordt omgevormd d.m.v. een gecontroleerde explosie.

Toepassingen plaatwerk

Op betrekkelijk *goedkope* wijze worden *lichte* en *stijve* onderdelen gemaakt.

- Carrosserie van een automobiel.
- Apparaten voor industrieel of huishoudelijk gebruik.
- Huid van een vliegtuig (gebogen dunne plaat aluminium) → 'stressed skin'
- Drankblikjes → speciale vorm van dieptrekken: gelijkmatige dikte en glad oppervlak.



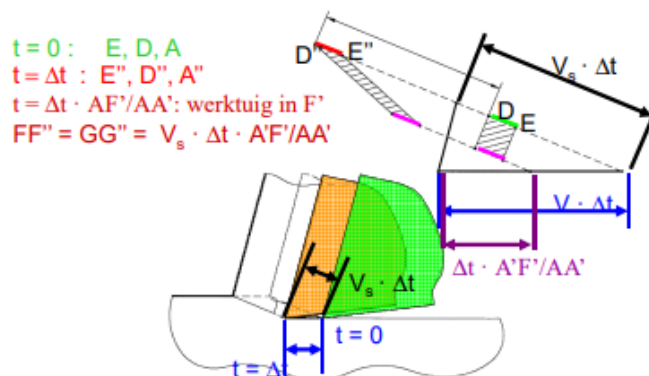
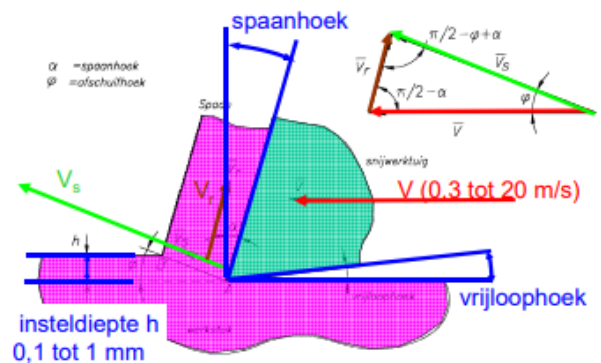
Spaanafnemende bewerkingen

Spaanvorming

Vormgeving door wegnemen van materiaal → dure bewerking

Geometrie van de spaanvorming

- Insteldiepte h (0,1 tot 1 mm)
- Snijnsnelheid $\bar{V}$ (0,3 tot 20 m/s)
- Spaanhoek α = hoek werktuig met de normale (loodrechte) op de richting van de beweging
 ⇒ Meestal positief (behalve bij slijpen: korrels)
- Vrijloophoek γ
- Afschuihoek φ → optimale waarde: minimaal
 verbruik aan vermogen bij gegeven snijnsnelheid V
 - φ groter → V_r groter → wrijving groter → groter vermogen verbruik
 - φ kleiner → lengte AB neemt toe → grotere zone van plastische vervorming → groter vermogen verbruik
- Vermogen = $F \cdot V$
 ⇒ Opgenomen door:
 - Vervorming spaan (60-70%)
 - Wrijving spaan over gereedschap (25-35%)
 - Afscheuren van spaan (5%)
- $\bar{V}_s = \bar{V} + \bar{V}_r$
 - $\bar{V}_s$ = absolute snelheid spaan
 - $\bar{V}_r$ = relatieve snelheid spaan t.o.v. snijwerktuig
 - $\bar{V}$ = sleepsnelheid (snelheid waarmee het snijwerktuig beweegt)
- Vervorming tijdens verspanen:



Krachten en vermogen

- Afschuifzone
- Kleefzone
 - **Opbouwsnijkant/valse snijkant** = stuk verhard spaan dat aan werktuig blijft plakken.
 Gevolg: onregelmatigheid in de werking en minder schoon bewerkt oppervlak.
 Oplossing: lage snijnsnelheid, zacht te bewerken materiaal
- Glijzone
- Buiging van de spaan
 - **Krul** → heet, gevaarlijk, niet gewenst
 Oplossing: toevoeging gepaste legeringselementen

Vermogen → groter dan bij trekproef

- Wrijving tegen het werktuig
- Breukenergie om nieuw oppervlak te vormen
- Vervormingssnelheid (>> trekproef) → hogere spanning

Arbeid → in warmte omgezet op plaats van de snijding

→ Groot deel door spaan afgevoerd

Koeling en smering → snijvloeistof: emulsie van olie (smering) en water (koeling)

→ In voldoende debiet toevoeren op plaats waar het snijden gebeurt

Instelhoek i → hoek snijkant werktuig met snelheid → spaan krult in een schroeflijn

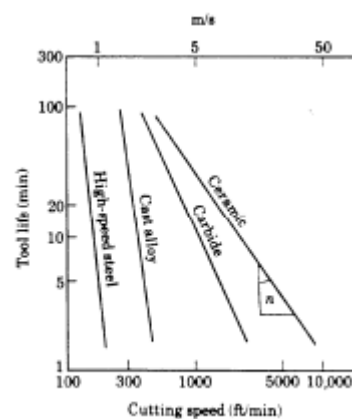
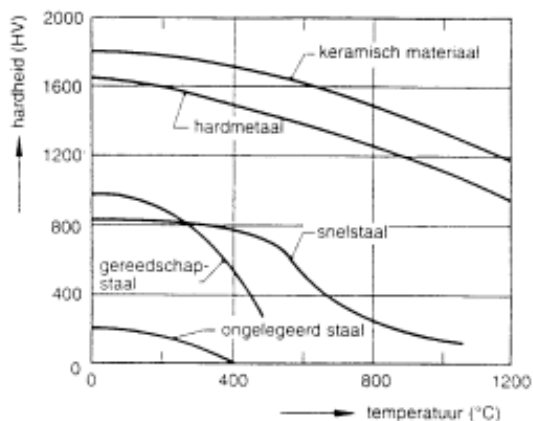
Materialen

- **Ongelegeerd gereedschapsstaal** (1% C, 300 °C) → verouderd
- **Sneldraaistaal** (600 °C) → harde carbiden (Cr, Mo, Va, W)
 - o Minder hard (-)
 - o Beter bestand tegen stoten
 - o Gemakkelijker bewerkbaar → snijwerktuigen met ingewikkelde vorm
- **Hardmetaal** (1000 °C) → carbiden gesinterd met kobalt als bindmiddel
 - o Behoudt hardheid bij hoge temperaturen
 - o Hoge elasticiteitsmodulus
 - o Lage thermische uitzetting
 - o Niet geschikt voor lage snelheden
 - o Harde deklaag (coating) → hogere slijtvastheid
 - o Niet volledige werktuig uit carbide, maar plaatje carbide op de top geplaatst
- **Keramische plaatjes** (1800° C) → aluminiumoxide (+ titaniumcarbide)
 - o Hogere snelheden
 - o Verminderen neiging tot vorming opbouwsnijkant
- **Diamant** (1500 °C) → vervaardigen van snijgereedschap
 - o Hoogste hardheid
 - o Bewerking van uiterst harde/taai materialen
- **Kubisch boornitride**
 - o Bijna even hard als diamant, en tegen hogere temperaturen bestand

Hardheid neemt af bij toenemende temperatuur:

→ Hogere snijsnelheid → hogere T → snellere slijtage

→ Optimale snijsnelheid: Wet van Taylor ($L = K \cdot \frac{1}{v^n}$ met $L = \text{tool life}$)



Legeringen

- Zacht constructiestaal (lage C %) → opbouwsnijkant
- Hard staal → lintspanen
 - o Vorming lange spanen tegenaan: lood + zwavel
- Austenitisch roestvaststaal → moeilijk bewerkbaar (taai)
- Titanium → lage thermische geleidbaarheid, bijgevolg hogere temperaturen
- Aluminium → zeer gemakkelijk bewerkbaar

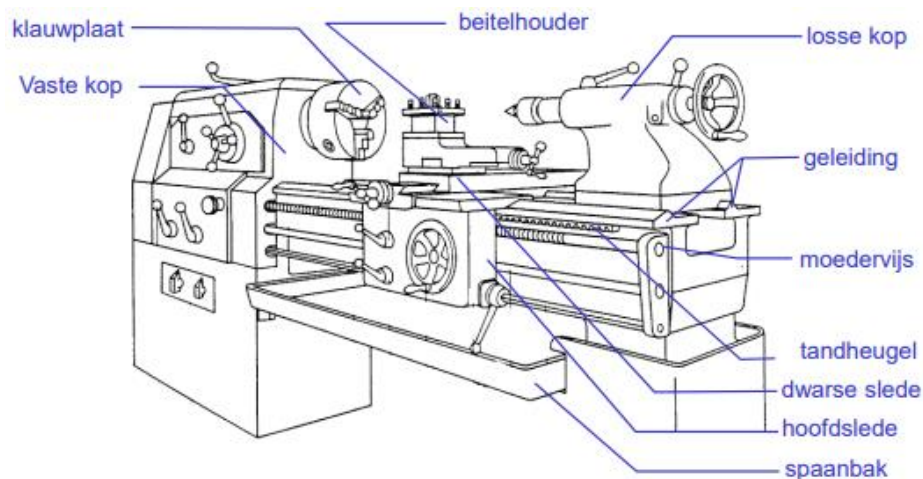
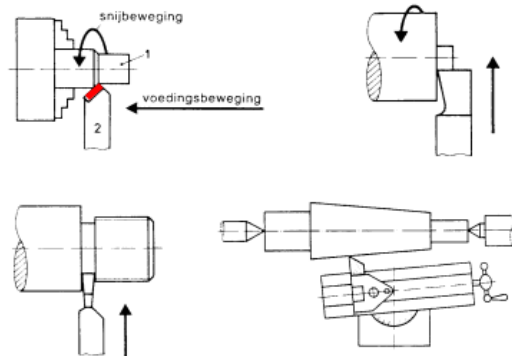
Slijpen

Materiaal wordt weggeschuurd door een onregelmatig ruw oppervlak (→ **onbepaalde snijkant**).

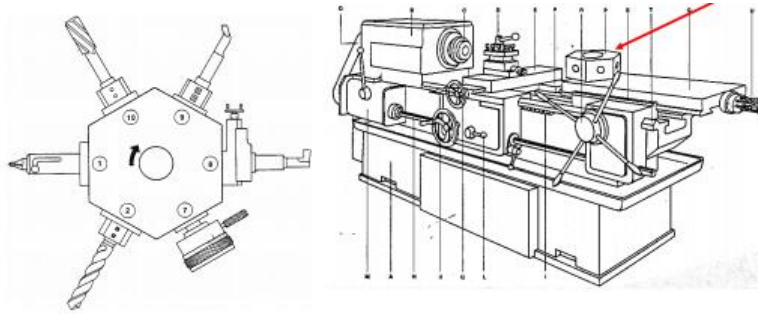
- Slijpsteen met *abrasief* oppervlak (Al_2O_3 , SiC, CBN, Diamant)
 - o Slijpsteen sinteren met bindmiddel (keramiek, polymeer)
- Hogere specifieke energie dan bij gewoon snijden:
 - o Onregelmatige vorm korrels → negatieve spaanhoek → grotere snijkraft
 - o Groter contact → meer wrijving
 - ⇒ Veel warmteontwikkeling → koelvloeistof nodig
- Kleine korrels → kleine spanen → geen krul, wel gloeiende deeltjes die wegslingeren
- Kleinere kracht, hogere snelheid
- ‘Gezet’ worden m.b.v. diamant → nieuw abrasief oppervlak aanbrenen

Draaibanken

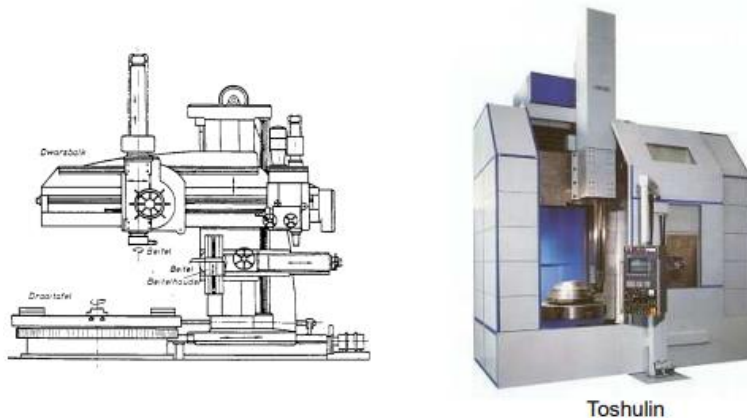
- Omwentelingslichamen
- Werkstuk draait zelf, **beitel** voert voedingsbeweging uit!
- Voedingsbeweging → continu
 - o Axiaal → cilinder
 - o Radiaal → plat vlak
 - o Schuin → kegel
- **Centerdraaibank:**
 - o Vaste kop en losse kop
 - o Hoofdspil → wentellagers
 - o Vrij roterende centerpunt
 - o Werkstuk aan de hoofdspil bevestigd, hetzij met een meeneemplaat of met een klauwplaat (onafhankelijke klauwen of zelfcentrerend)
 - o Eventueel een steunbril ter ondersteuning



- Werktuigrevolver → revolverdraaibank



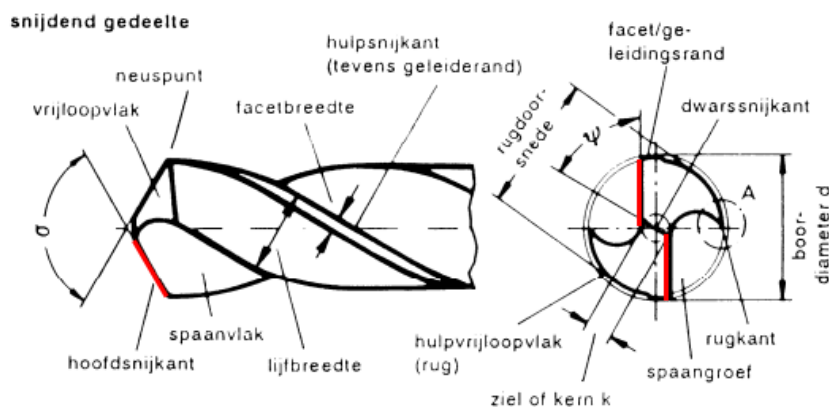
- Carrousseldraaibank (verticaal opgestelde kopdraaibank)
 - o Universele draaibank voor stukken met grote diameters



- Kotterbank (product staat stil, gereedschap draait)

Boren en boormachines

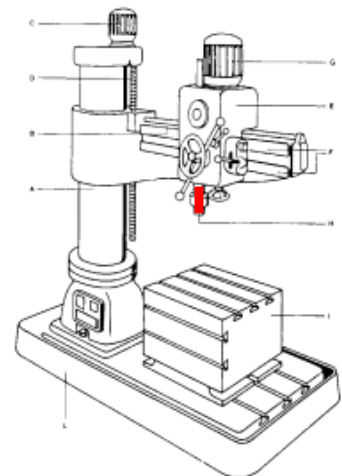
- **Dwarse snijkant:** wegdrukken van materiaal in het midden.
- **2 hoofdsnijanten:** snijden elk een spaan.
- **Hulpsnijkant:** zuiver houden van wand van het geboorde gat.



- **Kolomboormachine** → gat met enige nauwkeurigheid boren

Frezen en freesmachines

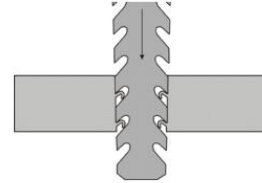
- **Frees** = draaiend werktuig met op zijn omtrek en/of zijn eindvlakken een aantal snijdende kanten.
- **Freesmachine:** het werkstuk zelf draait niet, maar verricht de voedingsbeweging.



- Types:
 - o Mantelfrees → plat vlak
 - o Meskopfrees (snijkanten op de kop) → plat vlak
 - o Schijffrees → groef
 - o Vingerfrees → groef
 - o Profielfrees (duur) → groeven met profiel van omtrek snijranden
- Driedimensionale vormen → **5-assig frezen**
 - o Positie frees in 3 dimensies, helling frees in 2 richtingen

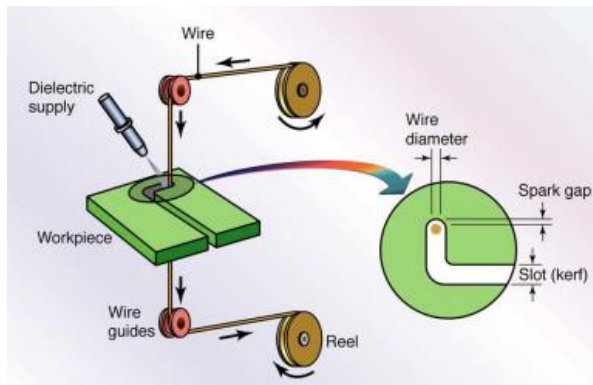
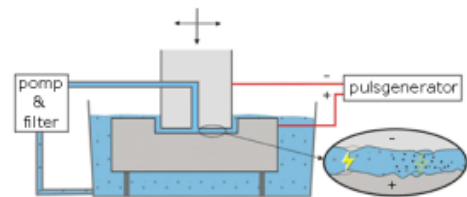
Trekfreesen

- Gereedschap met meerdere snijkanten
- Frees draait niet rond → voert *lineaire* snijbeweging uit
- Door de tanden van de trekfrees getrapt uit te voeren, vervalt de voedingsbeweging.
- Inwendige profielen die op geen enkele andere manier te maken zijn (bv. inwendige spiegelfuif)



Slijpmachines

- Vlakslijpmachine & rondblijpmachine → **slijpsteen**
- Overvloedig koelmiddel via spuitmond → platen die spatten opvangen
- **Honen/trekslijpen** → dun laagje van binnenomtrek cilinder wordt weggenomen
- **Bewerkingscentrum**: verschillende bewerkingen door 1 machine
- **Vonkerosie** → materiaal van object wordt door een vonkboog omgezet in plasma
 - o Veroorzaakt slijtage
 - o Vonkboog = elektrische lading die wordt geleid tussen 2 elektroden
 - o Draadvonkerosie → vonkerosie met een draad als geleider

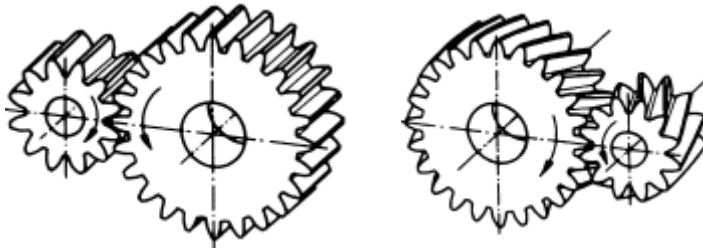


Deel 3: Overbrengen van vermogen

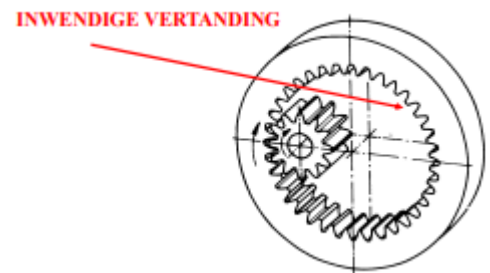
Tandwielen

Cilindrische tandwielen

- Evenwijdige assen
- Tandwielen met rechte vertanding vs schroef tandwielen



- Uitwendige vs inwendige vertanding
 - o Voordelen inwendige vertanding in combinatie met uitwendige vertanding:
 - Rotatiezinnen van beide assen zijn dezelfde
 - Meer tanden betrokken in de krachtwerking
 - Minder geluid
- Hoofdeis: verhouding van de hoeksnelheden blijft constant ongeacht de stand van het tandwiel $\Rightarrow \frac{\omega_1}{\omega_2} = cte$



- o Indien verhouding niet constant

→ Theorie van de Fourierreeksen (met θ = positie van het wiel):

$$\theta = \omega_0 t + a_1 \sin(z\omega_0 t + \phi_1) + a_2 \sin(2z\omega_0 t + \phi_2) + \dots$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -(z\omega_0)^2 a_1 \sin(z\omega_0 t + \phi_1) - (2z\omega_0)^2 a_2 \sin(2z\omega_0 t + \phi_2) + \dots$$

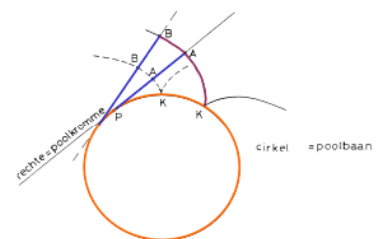
⇒ **schommelingen** $M = I_{zz} \frac{d^2\theta}{dt^2}$

⇒ Koppelschommelingen $M = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$

(I = traagheidsmoment, $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ = hoekversnelling)

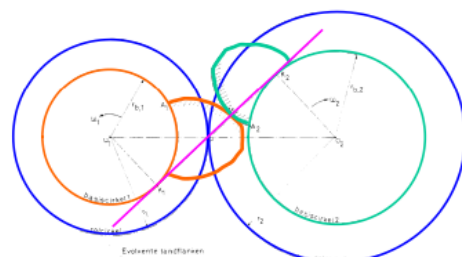
⇒ Trillingen, lawaai, vermoeiing, vroegtijdige slijtage

- $Modulus = \frac{diameter_{steekcirkel}}{z}$



Rechte evolvente tandwielen

- Profiel tandflank = **evolvente**
 - o Eigenschap evolvente: afstand PA = booglengte PK
- Basiscirkel en rol- of steekcirkel
- Verhouding hoeksnelheden: $\frac{\omega_2}{\omega_1} = -\frac{r_{b,1}}{r_{b,2}} = cte$
- **Tandheugel** = bijzonder geval van een tandwiel waarvan de straal oneindig groot is. De tandflanken zijn recht onder een hoek die genormeerd is op 20°.



Toon aan: translatiesnelheid (v) van de heugel staat in vaste verhouding tot de hoeksnelheid (ω) van het wiel.

$$KM_1 = KA_1 = KP + PN_1 \cdot \cos 20^\circ \quad (P \text{ is vast punt})$$

$$\frac{d(KA_1)}{dt} = 0 + \frac{d(PN_1)}{dt} \cdot \cos 20^\circ \quad (\text{afleiden 1e lijn naar } t)$$



$$\omega_1 \cdot r_b = 0 + v \cdot \cos 20^\circ$$

$$v = \omega \cdot \frac{r_b}{\cos 20^\circ}$$

$$= \omega \cdot \frac{OK}{\cos 20^\circ}$$

$$= \omega \cdot OP$$

- Steek = afstand tussen twee tanden van een heugel $\rightarrow \text{modulus}_{\text{heugel}} = \frac{\text{steek}}{\pi}$
- Tandwielen met verschillende modulus kunnen niet met elkaar ingrijpen!

Conische tandwielen

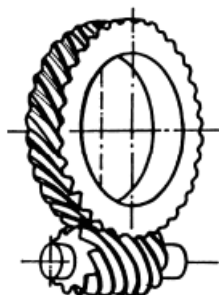
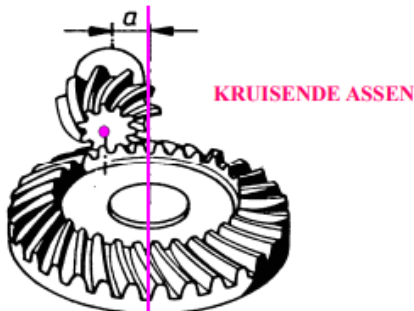
Tandwielen met *snijdende* assen.

- Kegel- of conische tandwielen
- Rechte-, schuine- of schroefvertanding



Tandwielen met kruisende assen

- **Hypoid-wielen** $\rightarrow$ aandrijving voertuigen (grote snelheidsverhoudingen)
- **Worm met wormwiel** $\rightarrow$ grote verhouding hoeksnelheid worm tot deze van wormwiel
 - o Groter vermogensverlies door wrijving dan bij andere tandwielsystemen
 - o Als de overbrengingsverhouding groot is kan het systeem niet omgekeerd aangedreven worden $\rightarrow$ systeem is dan zelfremmend



Verhouding van hoeksnelheden

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{z_2}{z_1} \quad (z = \text{aantal tanden op tandwiel})$$

- Minteken want hoeksnelheden hebben een tegengestelde zin.
- Plusteken bij inwendige vertanding.

Samengestelde tandwielsystemen $\rightarrow$ grote overbrengingsverhoudingen (10:1 of meer)



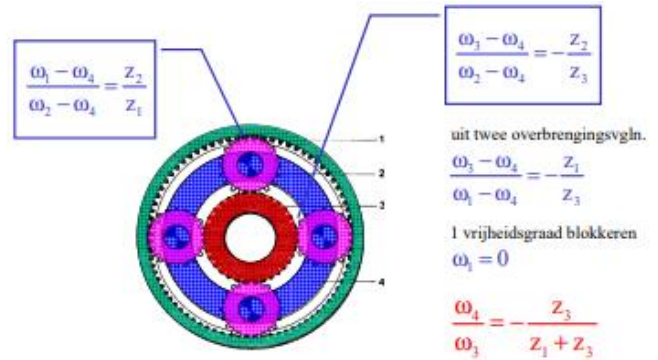
Planeetsystemen

Systemen waarin minstens één van de assen zelf in beweging is.

- (1) **Ringwiel**: tandwiel met inwendige vertanding
- (2) Uitgaande as → 4 **planeten**
- (3) Ingaande as → **zonnewiel**
- (4) **Planeetdrager**

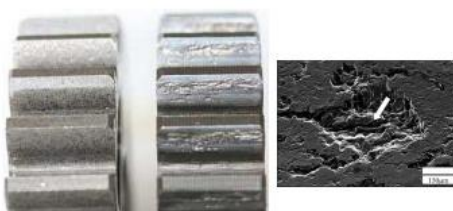
Voordeel: vermogen van de ingaande as stroomt naar de uitgaande as via 4 parallelle wegen.

- ➔ Voor een gegeven bouwgrootte kan men een groter vermogen leveren.
- ➔ Of voor een gegeven vermogen kan men een compacter en lichter systeem bouwen.
 - Ingewikkelde constructie en dus hoge prijs



Slijtage, smering, breuk

- Tandens rollen én glijden over elkaar → smering nodig
- **Hydrodynamische smering**: smeringsvorm met olie waarbij de druk in de smeerfilm in staat is metallisch contact tussen de tanden te vermijden.
 - Elastohydrodynamische smering: rekening houden met de elastische vervorming van de tanden, die iets ingedrukt worden.
 - Bij lage snelheden: **vet** als smeermiddel
 - Bij hoge snelheden: **olie** → onderaan in de tandwielkast en wordt door de beweging van de tandwielen meegenomen en rondgeslingerd.
 - Voor grote vermogens of zeer grote snelheden: olie tussen de tanden gespoten d.m.v. een oliepomp.
 - Kleine tandwielen in kunststof (bv. voor huishoudtoestellen) kunnen zonder smering werken.
- Verlies van vermogen door wrijving → in warmte omgezet → koeling nodig
 - Wrijving tussen tanden
 - Wrijving in de lagers
 - Arbeid opgenomen door de viscositeit van de olie
- Degradatie tandwielen:
 - **Slijtage van de tanden**: indien onvoldoende smering of vuil smeermiddel
 - **Vermoeiing**: rondom contactpunt zeer hoge *contactspanningen* → kleine scheurtjes onder oppervlak → loskomen van kleine schilfers → in de olie terecht en tussen andere tanden geplet → snelle uitbreiding van de schade
 - **Vermoeiingscheuren**: ontstaan aan voet van tand → *buigspanningen* → afbreken tand
- Hoe tegengaan?
 - Flanken van tandwielen harden
 - Spanning aan tandvoet lager houden dan de vermoeiingsgrens, spanningsconcentraties vermijden (o.a. door een afgeronde afwerking van de tandvoet)
- **Pitting** van tandwielen = putvorming



Riemoverbrengingen

Inleiding

- Op trek belaste riem tussen parallelle of onder een willekeurige hoek gelegen aandrijfassen.
- Riemschijven aan drijvende en aangedreven as bevestigd
- Aandrukkracht (normaalkracht) → veroorzaakt door trekkracht in de riem
 - o Grootte afhankelijk van over te brengen koppel (moment)
- Transportmiddel voor bulk- en stortgoed
- Voor- en nadelen: zie slide 44

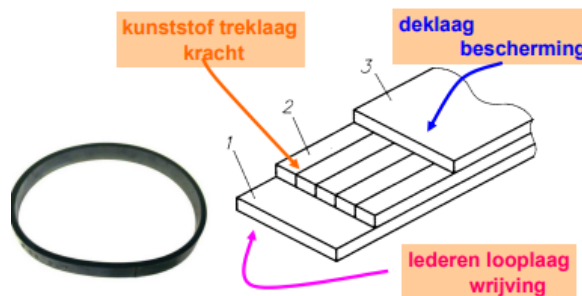
Soorten riemen en riemaandrijvingen

Aandacht aan:

- Hoge breuksterkte (treksterkte)
- Hoge wrijvingscoëfficiënt tussen riem en schijf
- Zekere ongevoeligheid voor omgevingsinvloeden

Vlakke riemen

- Lederen → goede wrijving, kleinere vermogens dan gelaagde riemen
- Textiel: uit organische stoffen of synthetische materialen → scheurgevaar
- Kunststof → hoge breuksterkte, ongunstige wrijvingseigenschappen
- **Gelaagde riem** (compound-riem):
 - 1) **Looplaag**: leder/textiel → goede wrijving
 - 2) **Treklaag**: kunststof → hoge treksterkte, geringe rek
 - 3) **Deklaag**: leder/textiel → bescherming tegen omgevingsinvloeden



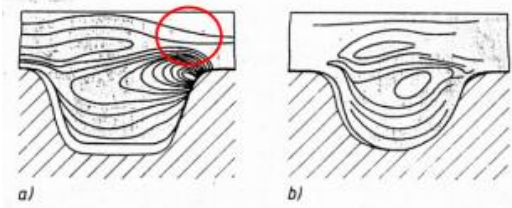
- Ongevoelig voor smeermiddelen en atmosferische invloeden
- Lage slip → goed rendement, langere levensduur, exacter handhaven van de overbrengingsverhouding
- Dunne en smalle riem: geringe plaats-inname, hogere vermoeiingsweerstand
→ geschikt voor hoge snelheden
- Transportdoeleinden

V-riemen

- **Treklaag**: eindeloos gewikkelde draden van bv. polyestervezels
- **Kern**: rubbermengsel
- **Omhuysel**: katoen of synthetisch weefsel met rubber
- Voordeel: goede krachtoverdracht → lagere asbelasting, kleinere lagerkrachten
- Nadeel: warmteontwikkeling en constructieve moeilijkheden
- **Poly-V-riem**: combineert voordelen van vlakke riem met die van V-riem
⇒ Goede krachtoverbrenging en hoge vermoeiingsweerstand

Getande riem

- Trapeziumvormig vs half rond (→ betere spanningsverdeling)



- Riem op spanning houden m.b.v. spanrol (schakelbare overbrenging) of beweegbare spanslede

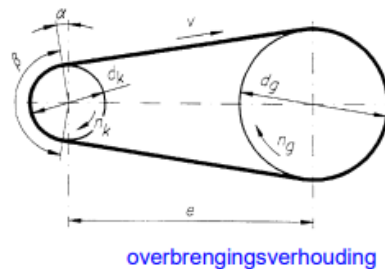
CVT/duwriem

- Continu Variabele Transmissie
- Rubberen/metalen duwband die over de schijven beweegt zorgt voor de overbrenging
- Geen vaste overbrengingsverhouding!
 - ⇒ Verandering van diameters mogelijk
 - ⇒ Schijven zijn traploos, zij kunnen dus in één vloeiende beweging groter en kleiner worden → bijgevolg zijn er geen schakelschokken
 - ⇒ Duwriem maakt variatie in diameter mogelijk
- Bv. in auto's → verschillende versnellingen

Krachten en spanningen in de vlakke riemoverbrenging

Geometrie

- Omzwenkhoek $\beta = 180^\circ - 2\alpha$
 - $\sin \alpha = \frac{d_g - d_k}{2e}$
- Riemlengte $L \rightarrow$ vaste eigenschap riem



$$\frac{\omega_g}{\omega_k} = \frac{d_k}{d_g}$$

Riemkrachten

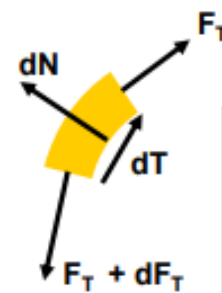
Trekkracht in de riem (zie HB p149)

- $F_T = K e^{\mu \varphi}$
- Trekkrachtverloop: $F_T(\varphi) = F_{T2} e^{\mu \varphi} \rightarrow F_{T1} = F_{T2} e^{\mu \beta}$
 - ⇒ Slippen van zodra: $F_{T1} > F_{T2} e^{\mu \beta}$
 - ⇒ Voorspankracht noodzakelijk ($F_{T2} \neq 0$), d.m.v. spanslede of spanrol.

$$F_V = \frac{F_{T1} + F_{T2}}{2}$$

- ⇒ Hoe groter de voorspankracht, hoe kleiner de benutte omzwenkhoek.

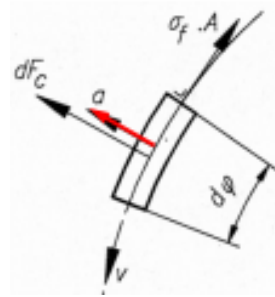
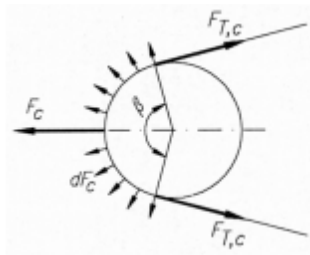
- Microslip: riem slipt tegenover riemschijf → slijtage



Bijkomende trekkracht door centrifugaal werking

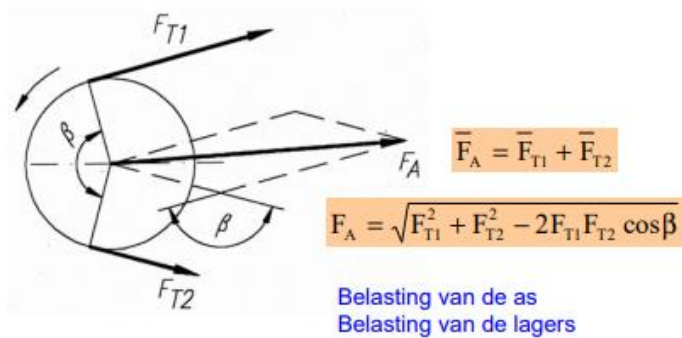
Wanneer de riem over de riemschijf loopt, voert ze een eenparige circulaire beweging uit en is ze dus onderworpen aan een radiale versnelling (a) en een centrifugaalkracht (F_C).

Bijkomende trekkracht in de riem: $F_{T,c} = \frac{F_c}{2\sin\frac{\beta}{2}} = \rho A v^2$



Askracht

Radiale kracht op de riemschijf.



Koppeloeverdracht van de riemaandrijving

$$M_k = (F_{T1} - F_{T2}) \times \frac{d_k}{2} = \frac{d_k}{2} F_{T2} (e^{\mu\beta} - 1)$$

μ zo groot mogelijk

β zo groot mogelijk

F_{T2} niet nul

Spanningen in de riem

Trekspanning

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A} = \frac{F_T}{b \cdot t}$$

Buigspanning

$$\sigma_b = E_b \frac{s}{d_k + s}$$

→ $E_b \ll E_T$ (elasticiteitsmodulus)

Centrifugaalspanning

$$\sigma_f = \frac{F_{T,c}}{A} = \rho v^2$$

Buigfrequentie

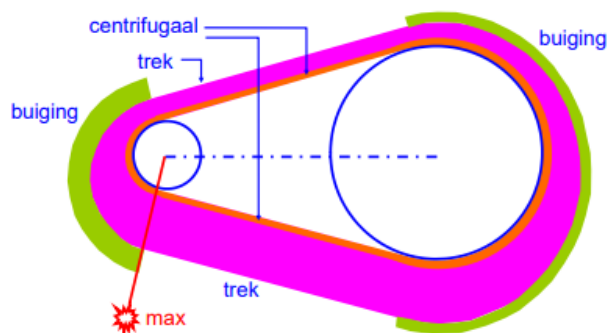
$$f_B = \frac{v \cdot z}{L}$$

→ v = lineaire snelheid riem

→ z = aantal riemschijven

→ L = riemlengte

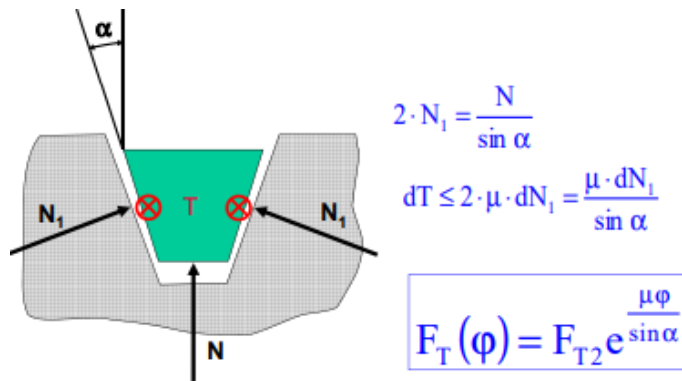
→ Bij hogere buigfrequenties → meer dissipatie van vermogen (slip, wrijving) → hogere riemtemperaturen → sterkere slijtage



Principe van de V-riemoverbrenging

Grote voorspankracht → grote radiale askracht → ongunstig

V-riem → virtuele verhoging van wrijvingscoëfficiënt → lagere voorspanning nodig → lagere askracht



Opbouw V-riem:

A: beschermingslaag
B: trekdraden uit Nylon
C: bindlaag
D: rubberlaag



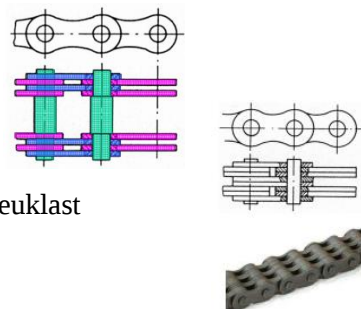
Kettingaandrijvingen

Inleiding

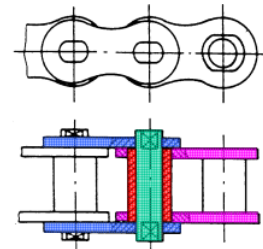
- Evenwijdige assen (bij voorkeur horizontaal)
- Vermogensoverdracht (betrouwbaar, sterk), transport- en hijskettingen
- Voordelen:
 - o Slipvrije vermogensoverdracht (constante overbrengingsverhouding)
 - o Kleinere askracht (door kleinere voorspankracht)
 - o Lagere gevoeligheid voor hoge T, vocht en vuil
- Nadelen:
 - o Kostprijs
 - o Trillingen
 - o Noodzaak smering
 - o Weinig flexibiliteit in opstel mogelijkheden (⇔ riemen: meerdere assen mogelijk)

Soorten kettingen

- **Penkettingen**
 - o Eenvoudig en goedkoop
 - o Schalmen om een geklonken pen (Galle-ketting)
 - o Schakel: verschillende schalmen voor verhoogde breuklast
→ Fleyer-ketting (last- of hijsketting)
 - ⇒ Slijtage tussen pen en schalmen
- **Buskettingen**
 - o Binnenschalmen geperst op een bus die roteert tegenover de pen
 - Betere glijlagerwerking tegenover de pen
 - Minder slijtage

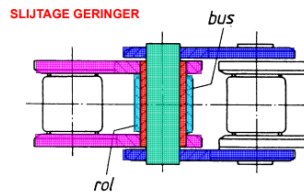


- Buitenschaklen vast verbonden aan pennen
 - Nadeel: bus uitwendig belast door de tanden van het kettingwiel



- Rolkettingen

- Op de bus een rol
- ⇒ Geen slijtage en geen lawaai
- ⇒ Duur



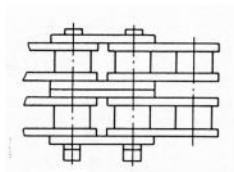
- Tandkettingen

- Lopen in speciale tandwielen
- Gunstig ingrijpgedrag (grote krachten, grote snelheden)
 - stillere werking



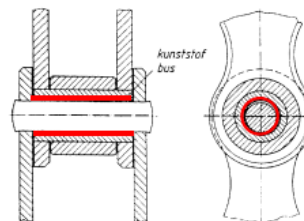
- Duplex-ketting

Grotere krachten en vermogens



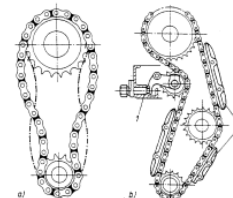
- Kettingen met kunststofbus

- ⇒ Trillingsdempend
- ⇒ Lange levensduur (smering)



Geleiders en rollen

- Spanrollen en kettinggeleiders
- Vooral om trillingen te dempen
- Of om in ongunstige omstandigheden voorspanning te geven



Deel 4: Tribotechniek

Tribotechniek = studie van verschijnselen die samenhangen met wrijving, slijtage en smering.

Wentellagers

Lager = constructie die ervoor zorgt dat verschillende delen van die constructie beter t.o.v. elkaar kunnen bewegen door het verlagen van de wrijving.

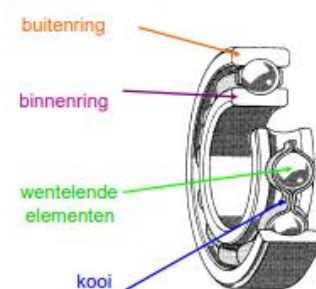
- Soepele beweging
- Laag energieverlies

Soorten wentellagers

Wentellagers → relatieve beweging tussen verbonden onderdelen wordt verzekerd door *wentelende* (rollende) elementen.

Bestaat uit:

- 2 loopringen → gehard en geslepen staal
- Wentelende elementen → sferisch (kogellager), cilindrisch (cilinderlager), conisch (kegellager)
- Kooi → messing, aluminium, kunststof
 - De kooi houdt de wentelende elementen op afstand en tussen de loopringen

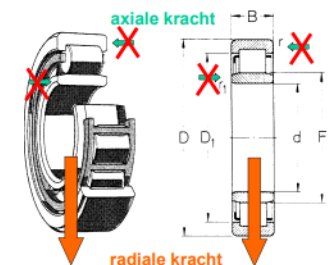


Soorten:

- (Groef)kogellager → geschikt voor hoge toerentallen
- Cilinderlager → groter radiaal draagvermogen (door het lijncontact tussen de cilinders en de loopvlakken ⇔ kogellager: puntcontact)
- Kegellager → combinatie radiale en axiale kracht en/of grote rondloopnauwkeurigheid vereist

Zuiver radiale belasting

- **Cilinderlagers:**
 - Demonteerbaar: verwijderen van binnenring (soms buitenring) mogelijk
 - Verdragen slechts heel geringe hoekverdraaiing van de as
 - **Naaldlagers** (slanke cilinders) → met of zonder binnenring, gebruikt in toepassingen waar de inbouwruimte beperkt is

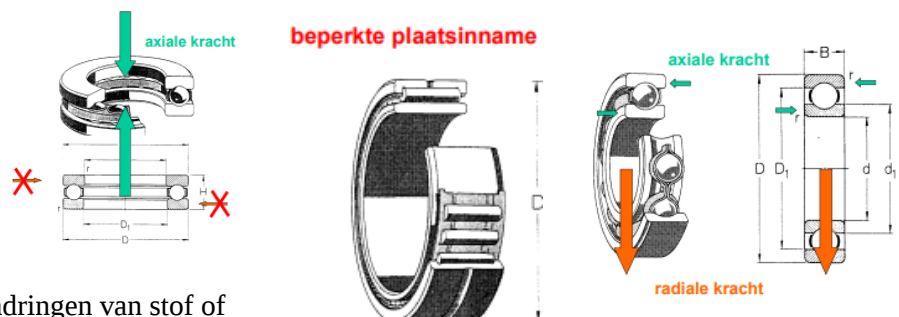


Zuiver axiale belasting

- Zuiver axiale lagers
- Volkomen demonteerbaar

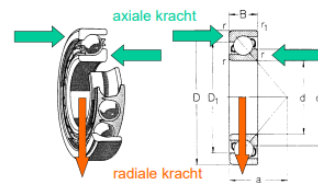
Combinatie van axiale en radiale belasting

- **Groefkogellagers**
 - ⇒ Afdekschijven: tegen binnendringen van stof of weglekken smeermiddel
 - ⇒ Dubbelrijig/tweerijig groefkogellager
- **Hoekcontactlager** → hoge en lage schouderkant: hogere axiale krachten opvangen

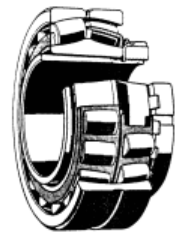


- Rug aan rug inbouwen: axiale belastingen in 2 zinnen opvangen
- **Kegellagers** → loopvlakken: kegelmantels
- **Tonlager** → grote belastingen
 - Hoge radiale belasting
 - Lage axiale belasting

equivalent hoekcontactlager



Grote belastingen !!



wentellagers

Toepassingen van

Voordelen:

- Lage wrijving
- Gering smeermiddelverbruik
- Laag aanloopmoment
- Weinig onderhoud nodig
- Verregaand genormeerd → goed uitwisselbaar

Nadelen:

- Gevoeligheid voor stoten en trillingen
- Beperkte levensduur
- Beperkte toerentallen
- Gevoeligheid aan stof → regelmatig onderhoud van afdichtingen

Wentellagers zijn nuttig voor:

- Onderhoudsarme en bedrijfszekere lagerconstructies met normale eisen
- Constructies die vanuit stilstand en bij lage toerentallen en hoge belastingen zo wrijvingsarm mogelijk moeten werken

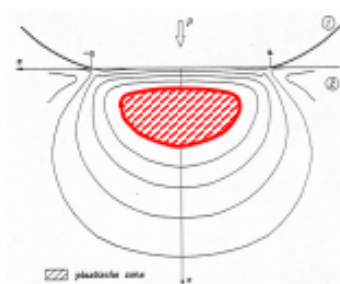
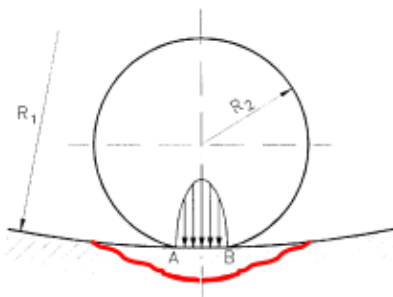
Cirkelzaag: groefkogellagers → losse en vaste lager

- Montage met 2 vaste lagers is absoluut te vermijden
- Lagers worden met vet gesmeerd
- Goede afdichting is vereist (stof dat door zagen ontstaat)
 - ⇒ Contactloze labyrintafdichting

Contactmechanica van wentellagers

Bij belasting van de wentellager zullen de contactoppervlakken van de loopringen en wentellichamen elastisch vervormen en neemt de contactzone eindige afmetingen aan (ellips in de plaats van een punt en rechthoek in de plaats van een lijn).

Theorie van Hertz: contactspanningen ten gevolge van het elastisch drukken van de loopring tegen een wentellichaam → degradatiemechanisme in wentellagers



Hertziaans
contact

Pitting/putvorming

De grootste spanning bij het contact tussen de loopringen en wentellichamen treedt op onder het oppervlak (zie figuur). Deze spanning treedt cyclisch op. Hierdoor ontstaan vermoeiingsverschijnselen onder het oppervlak van de loopringen en wentelelementen.

- ➔ Er ontstaan scheurtjes die langzaam uitbreiden tot aan het oppervlak
- ➔ Kleine putjes worden gevormd in het oppervlak => **pitting/putvorming**
- ➔ Door stootkrachten brokkelen grotere delen van de loopbaan uit → trillingen en lawaai
- ➔ Na zekere tijd ook breuk van de loopring

Putvorming is bepalend voor de levensduur van de wentellagers.

Andere faalmechanismen (zie slides)

- Slechte smering
- Overbelasting
- Corrosie
- **Brinelling** = falen van materiaaloppervlak ('putjes') veroorzaakt door Hertziaans contact.
- **False brinelling** = schade gelijkaardig aan gewone brinelli, echter veroorzaakt door fretting.
- Stroomdoorvoer
- **Fretting zitting** = corrosie/erosie van het contactoppervlak.
- Falen dichtingen
- Breuk kooi
- Uitlijningsfout

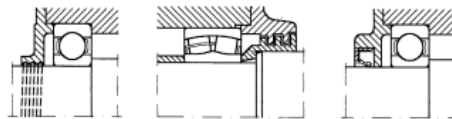


Smering en afdichting

Microslip → wrijving en slijtage → smering (vet) nodig → via smeernippel

Globale wrijvingscoëfficiënt wentellager: 0,0005 tot 0,002 (< glijlagers met hydrodynamische smering)

- Labyrint-afdichting
- Lipring-afdichting



Hydrodynamische smering

= smeringstoestand waarbij de bewegende oppervlakken door een continue dunne smeerfilm volledig van elkaar worden gescheiden. De olie 'plakt' aan de bewegende oppervlakken en vormt d.m.v. een druk een wig tussen beide.

Volle filmsmering

Smeringstoestanden

Smeermiddelen

- Vloeistoffen (olie, water)
- Vaste stoffen (grafiet) → in droge glijlagers
- Vetten → wentellagers
- Gassen → luchtlagers

Smeringstoestanden

- Hydrodynamische smering = **volle filmsmering** ('ideale' smeringvorm)
- Gemende smering → oppervlakken niet volledig gescheiden
- Grenssmering: extreem dunne smeermiddelfilm
 - ⇒ Eigenschappen smeermiddel belangrijk, niet de viscositeit

Desondanks: $\mu_{rolwrijving (wentellagers)} \ll \mu_{volle filmsmering, grenssmering}$

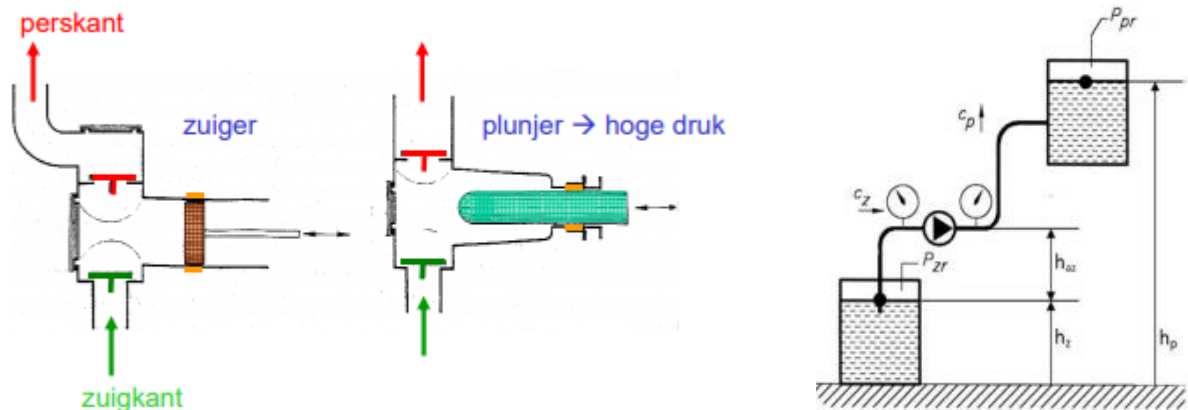
Deel 5: Energietechniek

Zie HB p225-p282

Zuigermachines

Pompen

Pomp = werktuig dat een fluïdum (vloeistof/gas) verplaatst door er energie aan af te geven in de vorm van een drukverhoging en/of snelheidsverhoging.



Opvoerdruk

- Manometrische opvoerdruk P_{man} : te bereiken drukverschil over de pomp
- **Wet van Bernoulli** = totale druk (energie) langs een stroomlijn is constant

$$P_{z,tot} = P_{p,tot}$$

- Pomp → toevoer van druk, dus toevoer van energie ($\Leftrightarrow$ Wet van Bernoulli)
 - o Toename van totale druk wordt precies door de pomp geleverd

$$P_{man} = P_{p,tot} - P_{z,tot}$$

$$P_{z,tot} = P_z + \frac{1}{2} \rho c_z^2 + \rho g h_z$$

$$P_{p,tot} = P_{pr} + \frac{1}{2} \rho c_p^2 + \rho g h_p$$

- Stromingsverliezen in leidingen: Δp_{wr}

$$P_{man} = (P_{pr} - P_z) + \frac{1}{2} \rho (c_p^2 - c_z^2) + \rho g (h_p - h_z) + \Delta p_{wr}$$

- P_{man} aangewend om druk te verhogen, snelheid te laten toenemen en hoogte en leidingweerstand te overwinnen.

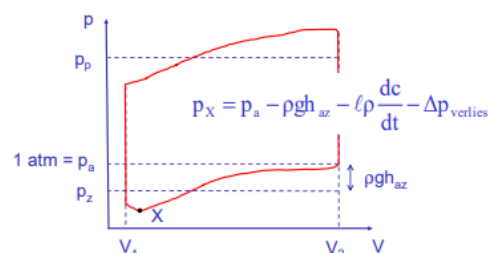
Indicator diagram (p-V diagram)

p - V diagramma: theoretisch



p - V diagramma: werkelijk

traagheidskrachten en verliezen **wel** in rekening gebracht



Pompproces

- 1) Aanzuigslag (aanzuigklep opent)
 - a. Drukverschil tussen reservoir (p_a) en pomp (p_z): druk in de pomp verlagen tot p_x om vloeistof te versnellen.
 - b. Op het einde van de slag dient de vloeistof tot stilstand gebracht te worden: druk in de pomp loopt wat op.
- 2) Persslag (aanzuigklep sluit, persklep opent)
 - a. Plotse drukverandering $\rightarrow$ enige trilling
 - b. Extra druk in de pomp om vloeistof te versnellen

$\Rightarrow$ Grotere druk nodig naarmate de massa van de bewegende vloeistof groter is (lange leiding) en naarmate de versnelling groter is (snellopende pomp).

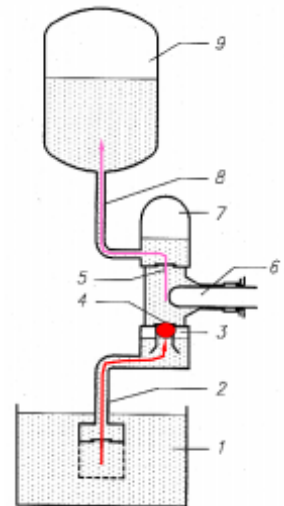
 - c. Op het einde: vermindering van de druk om de vloeistof tot stilstand te brengen.
- 3) Aanzuigslag (persklep sluit, aanzuigklep opent)
 - a. Plotse drukverandering $\rightarrow$ enige trilling
 - b. ...
- 4) Persslag $\rightarrow$ enz.

Cavitatie

- Druk in pomp $<$ dampspanning $\rightarrow$ gasbellen
 - o Indien druk weer groter wordt, klappen deze gasbellen dicht.
 - o Gevolg: massa water botst tegen andere massa of tegen een wand
 - o Mogelijke beschadiging van de pomp
- Lange persleiding $\rightarrow$ gevaar voor te lage druk ($<$ dampspanning)

$\rightarrow$ Oplossing: **accumulator/windketel**

 - Eenvoudige pompen: gas in accumulator = lucht
 - Lost gedeeltelijk op in het water
 - Verlies bijvullen $\rightarrow$ luchtsnuiver
 - Goede pompen: gas opgesloten in rubberen blaas
 - Bv. in hydraulische installaties

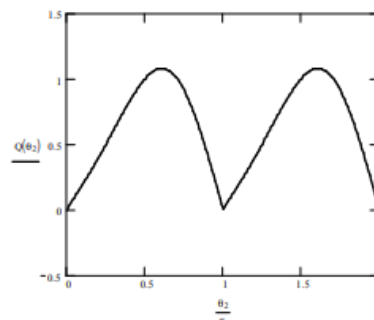
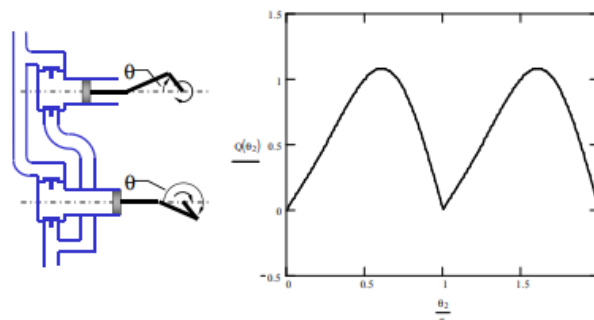
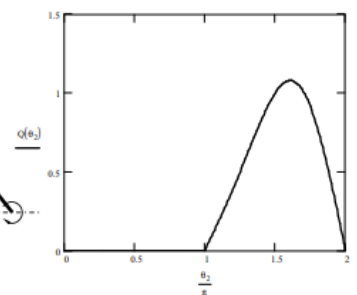
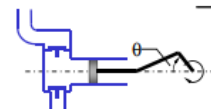


Debiet

- Zuigerpomp met één zuiger en cilinder

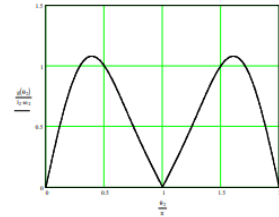
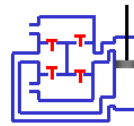
$\rightarrow$ geen gelijkmatig debiet

 - o Accumulator
 - o Meerdere cilinders $\rightarrow$ gedefaseerde krukhoek
 - Ene cilinder levert debiet terwijl de andere aanzuigt
 - 2 cilinders: over π radialen gedefaseerd



- 3 cilinders: over $2\pi/3$ radialen gedefaseerd

- Dubbelwerkende pomp: beide kanten van de zuiger werken.
 - Terwijl de ene aanzuigt, perst de andere



Rendementen

Totaal rendement:

$$\eta_{tot} = \eta_{mech} \times \eta_{vol} \times \eta_{hydr}$$

$$\eta_{tot} = \frac{P_{hydr}}{P_{as}} = \frac{Q \times p_{man}}{P_{as}}$$

$$\eta_{hydr} = \frac{p_{man}}{p_{theo}} \rightarrow \text{wrijvingsverliezen en botsingsverliezen in de pomp}$$

$$\eta_{mech} = \frac{P_{theo}}{P_{as}} \rightarrow \text{wrijvingsverliezen in de lagers en dichtingen}$$

$$\eta_{vol} = \frac{Q}{Q_{theo}} \rightarrow \text{interne lek + uitwendige lek}$$

Andere pompen

Zie slides 24-30!

Compressoren

Werking van de zuigercompressor

- **DOEL:** gassen op hogere druk brengen.
- **Verschil** met pompen: samendrukbaarheid van fluïdum.
- Zuigercompressoren gebruikt voor: hoge drukken leveren met beperkt debiet.
- Volumes:

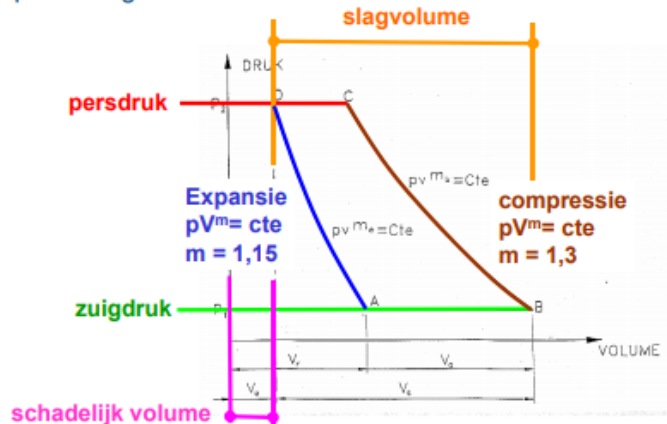
- Schadelijk volume V_e
- Slagvolume V_s
- Aanzuigvolume V_a

- Compressie van gas: **polytrope** toestandsverandering

- $p \cdot V^m = cte$ met $1 < m < \gamma$
- $m = 1 \rightarrow$ **isotherm** (gelijke temperatuur)
- $m = \gamma \rightarrow$ **adiabatisch** (geen energie-uitwisseling met de omgeving)
- Echter: warmte-uitwisseling met de wanden

- In begin: wand warmer dan aangezogen gas
- Op het einde: gas warmer dan de wand
- Bij de samendrukking BC: polytrope exponent $m = m_c \approx 1,3$ ($\Leftrightarrow \gamma_{lucht} = 1,4$)
- Bij de expansie DA: $m = m_e \approx 1,15$
- Temperatuurdaling gedurende de expansie kleiner dan de temperatuurstijging tijdens de compressie (gas neemt warmte van de cilinderwarmte op)

p – V diagramma



- Aangezogen volume gas V_a kleiner naarmate:

- o Schadelijk volume V_e groter
 - o Drukverhouding p_2/p_1 groter

$$\frac{V_a}{V_s} = 1 - \frac{V_e}{V_s} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{m_c}} - 1 \right] \quad T_2 = T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m_c-1}{m_c}} \right]$$

- Arbeid op gas: oppervlakte ABCD

- Gaswet: $V \cdot p = M \cdot R \cdot T$

⇒ Proces bij: ten gunste van verbruikte arbeid

Zo laag mogelijke temperatuur (T)

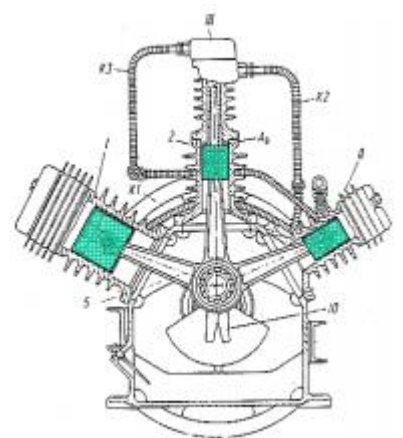
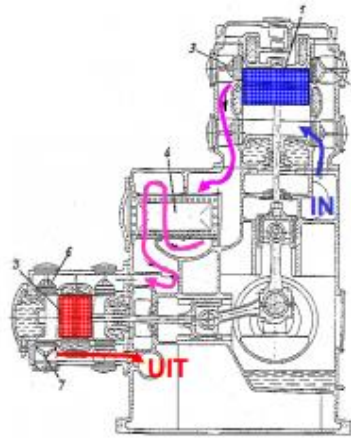
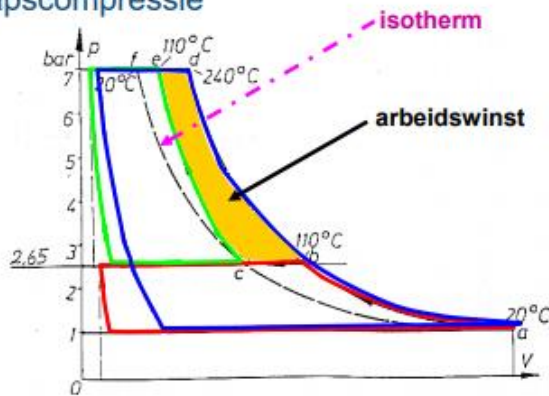
Zo laag mogelijke m (isotherm) → koelen van de wanden

$$m_c \cong m_e \cong m \quad W = \frac{m}{m-1} \cdot V_s \cdot p_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Constructie van compressoren

- **Tweetrapscompressor**/drietrapscompressor → tussenkoelers en koelvinnen

2-trapscompressie



- Door **smering** → risico van ontploffing (hoge concentratie O_2 + stijging T + olienevel)
 - o T voldoende laag houden: T mag nooit de temperatuur bereiken waarbij de olie vanzelf kan ontbranden!
 - o Compressoren voor (zuivere) zuurstof mogen niet gesmeerd worden.
 - o Ook in chemische nijverheid smering verboden → oplossing: zuigerpakking in kunststof/labyrintpakking of membraancompressor

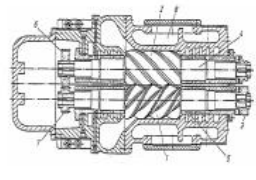
Schroefcompressoren

- Verplaatsing + samenpersing
- Lage drukken (8 tot 10 bar) en groot debiet (> 20 liter/seconde)
- Voordelen:

- o Geen traagheidsmomenten
 - o Lage kostprijs
 - o Hoge levensduur
 - o Minder trillingen

- Nadelen:

- o Blijven vermogen verbruiken op nuldebiet
- ⇒ Zuigercompressor: kleppen heffen → geen vermogen verloren
- o Niet geschikt voor veranderlijke drukverhouding
- o Hoog energieverbruik
- o Veel lawaai



Zuigermotoren

Algemeenheden

Benzine- of Ottomotor: vonkontsteking → aanzuigen van mengsel van lucht en benzine

Dieselmotor: spontane ontsteking/verbranding → aanzuigen van enkel lucht

Voordelen (t.o.v. stoominstallaties en gasturbines):

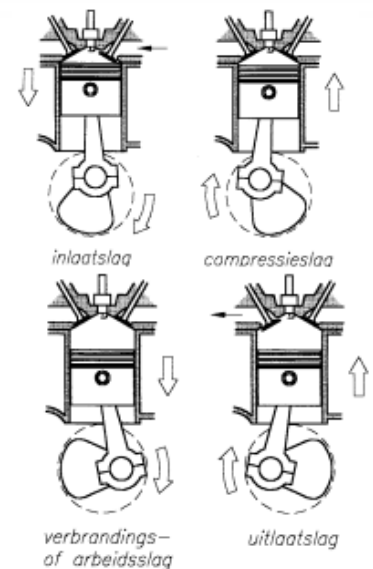
- Ruim toepassingsgebied
- Geschikt voor kleine tot grote vermogens
- Gunstige prijs-kwaliteitsverhouding
- Kleiner en eenvoudiger (t.o.v. stoomturbine)
- Weinig toezicht nodig, veilig en betrouwbaar (werkt altijd)
- T.o.v. gasturbine:
 - o Hoger rendement
 - o Zwaardere (goedkopere) brandstoffen

Nadelen:

- Trillingen (heen en weer gaande beweging van de zuigers)
- Lawaai

Proces: 4-takt

- 1) Inlaatslag: toevoeren lucht
- 2) Compressieslag: samendrukken van lucht
- 3) Verbrandings- of arbeidsslag
 - ➔ **Brandstofinjectie:** brandstof ontsteekt (a.d.h.v. een vonk of spontaan) en verbrandt → warmte komt vrij → temperatuurs- en drukverhoging van de verbrandingsgassen → gevolg: arbeid wordt geleverd
- 4) Uitlaatslag: uitdrijven verbrandingsgassen

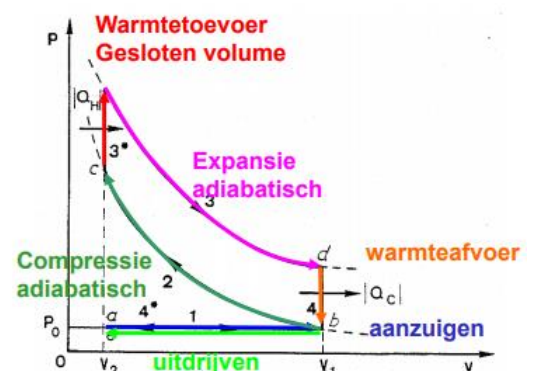


Ottomotoren

Algemeen principe:

- 1) Inlaatslag (aanzuiging):
 - o **Punt a:** openen inlaatklep: even vóór BDP
 - o Inlaatklep helemaal open wanneer de zuiger zijn neerwaartse beweging begint
 - o Aanzuiging: druk in cilinder is lager dan buitendruk omwille van drukverlies in inlaatklep
 - o Sluiten inlaatklep: na ODP, in **punt b** is zij volledig gesloten
- 2) Compressieslag
 - o Niet adiabatisch: warmte-uitwisseling met wanden
 - o Polytroop met exponent 1,33
- 3) Verbrandings- of arbeidsslag
 - o Vervroegde ontsteking in **punt c**: vóór BDP → afgeronde top in diagram
 - Verbranding gebeurt namelijk niet onmiddellijk
 - Indien men pas zou ontsteken in BDP: te late drukstijging (tijdens expansie) en verlies aan arbeid

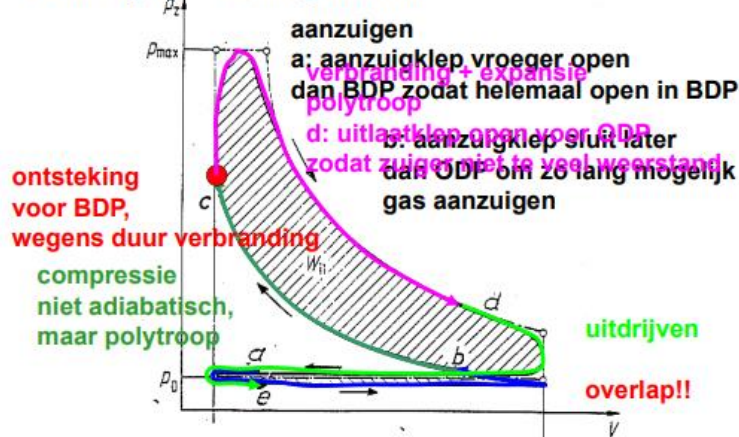
Theoretisch p – V diagramma



4) Uitlaatslag

- Openen uitlaatklep in **punt d**: vóór ODP
 - Uitlaatklep kan niet oneindig snel openen
 - Vermijden dat zuiger op zijn weg teveel tegendruk zou ondervinden (energieverlies)
- Stromingsweerstand in uitlaatklep bij uitdrijven van gassen → hogere druk dan buitendruk
- Sluiten uitlaatklep in **punt e**: na BDP
- ⇒ OVERLAP: beide kleppen staan korte tijd tegelijk open (vers gas kan terug ontsnappen)

Werkelijk p – V diagramma



Ontsteking en verbranding

- Voor volledige verbranding: massa lucht = 15x massa brandstof
 - Beste rendement als er 1 tot 1,2 maal deze hoeveelheid lucht wordt toegevoerd.
- Op het juiste moment
 - Te late ontsteking: te laag vermogen en rendement
 - Zuiger reeds bezig aan arbeidsslag als maximale verbrandingsdruk bereikt wordt.
 - Temperatuur tijdens arbeidsslag hoger en gevaar bestaat voor verbranden van de uitlaatkleppen door te hete verbrandingsgassen.
 - Te vroege ontsteking: lager vermogen en rendement
 - Zuiger voert compressieslag uit bij hoge tegendruk
 - DUS rekening houden met de verbrandingsduur en het ontstekingsuitstel (brandstof moet opgewarmd worden tot zelfontstekingstemperatuur)
- Te snelle verbranding (te hoger T en p tijdens de samendrukking) → kloppen
 - Geluid als van metaal dat op metaal klopt
 - Ontstaan door vonk of door gloeiende deeltjes (verbrandingsresten) die aan de wand klevan
 - Hoe tegengaan?
 - Compressieverhouding beperkt houden
 - Octaangetal brandstof → hoe hoger, hoe beter bestand tegen zelfontbranding

Motorkoppel

Verband gasdruk en koppel:

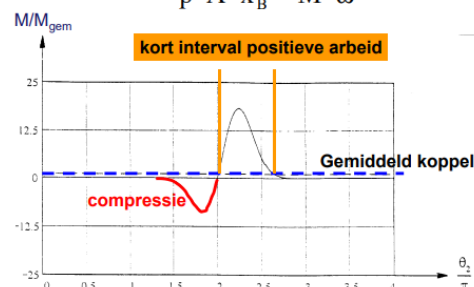
$$p \cdot A \cdot \frac{dx_B}{dt} = M \cdot \omega$$

Vermogen: $P(\omega) = M(\omega) \cdot \omega$

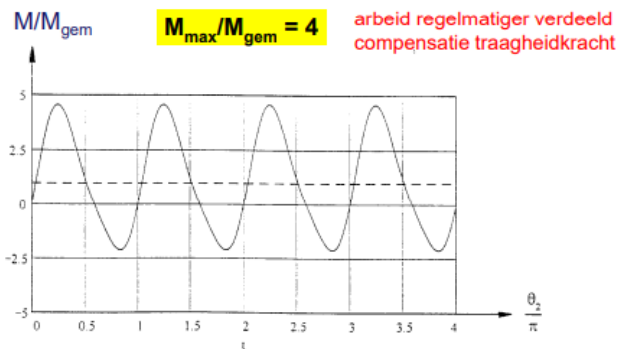
Slecht kort interval positieve arbeid geleverd
→ meerdere cilinders inbouwen

Motorkoppel

$$p \cdot A \cdot \dot{x}_B = M \cdot \omega$$



Motorkoppel 4 - cilindermotor



Gemiddeld koppel: $M_{gem} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} M(\theta_2) d\theta_2$

Hoge hoeksnelheden → meer drukverliezen → vermindering koppel

→ Hoe tegengaan?

Cilinders beter vullen (minder drukverliezen) door:

- Aantal kleppen verhogen: 2 uitlaat- en inlaatkleppen per cilinder
- Oplaadcompressor

Dieselmotoren

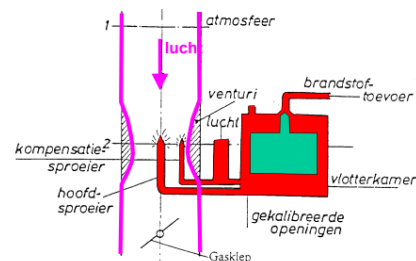
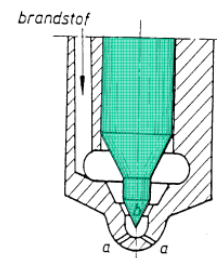
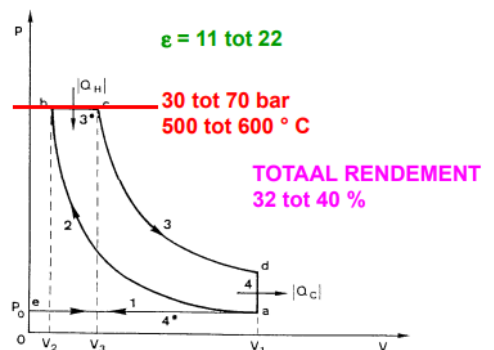
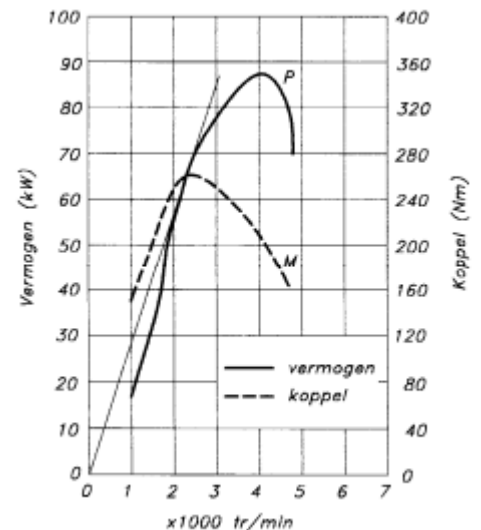
Thermisch rendement Ottomotor beperkt door de onmogelijkheid de compressieverhouding veel groter dan 9 te nemen → Rudolf Diesel zocht een oplossing: brandstof slechts toevoegen na de compressie → voordeel: brandstof ontbrande spontaan, geen elektrische ontsteking nodig → grotere druk leidde in eerste instantie wel echter tot zware technische problemen

Werking van de viertakt dieselmotor

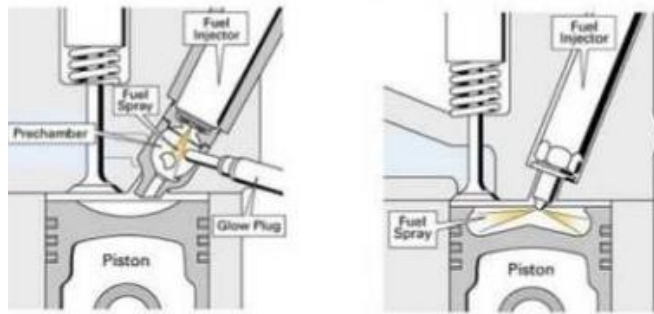
- Gelijkaardig aan Ottomotor MAAR:
 - Verbranding verloopt (theoretisch) bij constante druk
 - Hogere drukken want hogere compressieverhouding (11: grote motoren tot 22: kleinere motoren) mogelijk
 - DUS hoger rendement: tussen 32-40% (↔ Ottomotor: 20-30%)

- Inspuiting brandstof:

- **Traditionele injector** (hefnaald)
 - Op de top meerdere openingen om de brandstof in meerdere richtingen fijn te verdelen.
 - Normaal zijn deze openingen afgesloten door een naald, door de hoge druk van de puls wordt deze naald geheven en spuit de brandstof door de openingen.
- **Common rail-technologie** (centrale buis, elektrisch)
 - Brandstof wordt onder hoge druk verzameld in een centrale buis die in verbinding staat met elektronisch bediende injectoren.
 - Inspuiting gebeurt veel flexibeler en nauwkeuriger
- **Carburator**
 - Benzine wordt door spuitkopje in de lucht verneveld → beter menging van lucht met de brandstof



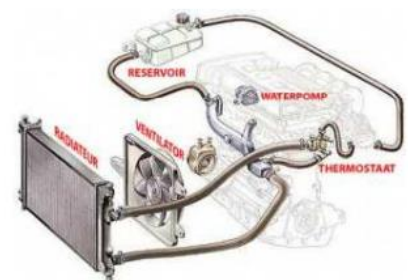
- Goede verdeling en verbranding van de brandstof is zeer moeilijk
 - o Indirecte inspuiting
 - Voorkamer: kleine ruimte boven cilinder → gedeeltelijke verbranding van mengsel
 - Wervels: zorgen voor betere menging van brandstof en lucht
 - Gloeikaars: koudstarten mogelijk maken
 - ⇒ Veroorzaakt vertraging en drukverlies → lager rendement
 - o Directe inspuiting
 - Bij grote motoren: lopen trager
 - Speciale vormen aan verbrandingsruimte om werveling van de lucht te verwekken



- Vervuילend?
 - o Minder Co en NO_x dan Ottomotoren
 - o Iets minder CO₂ wegens groter rendement
 - o Probleem uitlaatgassen: zwavel en onverbrande deeltjes (roet) → roetfilter

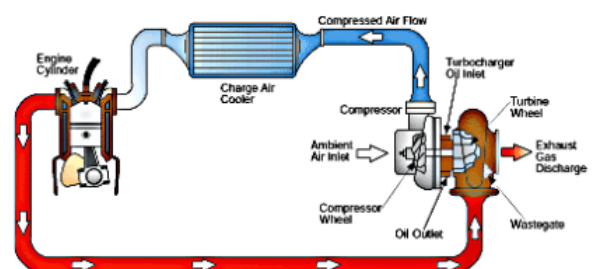
Constructieve aspecten

- Metalen zuigerveren
 - afdichting tussen de gassen in de verbrandingsruimte en de olie in de carter
- Op elke zuiger een zuigerpen: verbinding met drijfstang
- 2 glijlagers op elke drijfstang
- Nokkenas → aangedreven door tandriem of ketting met een hoeksnelheid van de helft van de krukas
- Smering: oliepomp (olie zorgt ook voor koeling van de cilinderwand)
- Koeling van kleine motoren: luchtcirculatie met gebruik van koelvinnen op de cilinders
- Andere motoren: gekoeld met water (waterpomp met een riem aangedreven door de krukas)
- V-opstelling
- Boxermotor
 - 2 motoren aan tegenovergestelde kanten van de krukas (bv. in motorfietsen)



Opgeladen dieselmotoren

- Bij hogere snelheden → drukverliezen → geen voldoende lucht in cilinder → beperkt toerental
- Oplossing: opladen van motor m.b.v. een compressor op de aanzuigleiding
 - o Aangedreven door krukas → onttrekt vermogen aan de motor
 - o Aangedreven door gasturbine → neemt energie op uit uitlaatgassen
- Bij opladen van Ottomotoren: gevaar voor kloppen!



Stromingsmachines

Draaiende rotor met schoepen.

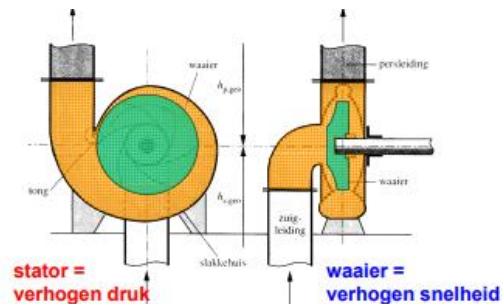
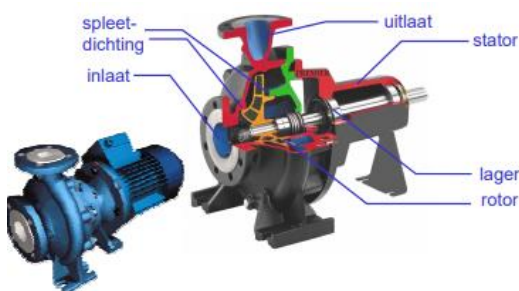
Stilstaande stator al dan niet uitgerust met schoepen om stroming te geleiden.

Geen kleppen of andere heen en weer gaande onderdelen → geen traagheidskrachten of wrijving

Turbopompen

Centrifugaalpomp

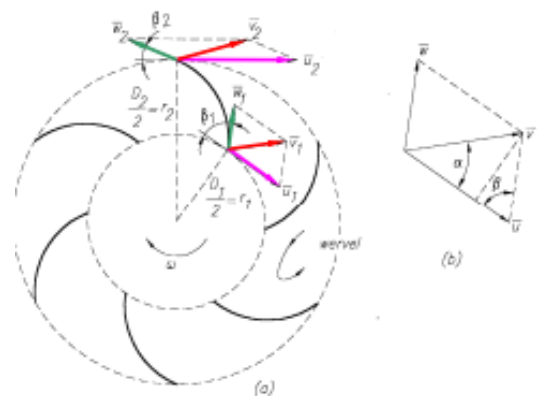
- Centrifugaalkracht = radiale kracht die op de vloeistof inwerkt bij het uitvoeren van een eenparig cirkelvormige beweging.
 - ⇒ Beweging vloeistof in radiaal buitenwaartse richting
- Corioliskracht = kracht die op de vloeistof ontstaat omdat ze een radiale beweging uitvoert in een draaiend systeem.
 - ⇒ Opbouw drukverschil over schoepen
- Schoepkracht: drukverschil over schoepen
 - ⇒ Arbeidsoverdracht tussen rotor en fluïdum
- Liftkracht: gebogen vorm van schoepen
 - ➔ Rotor: vloeistof wordt versneld en onder druk gebracht
 - Toename absolute snelheid eerder ongewenst, voornamelijk bedoeling druk te verhogen
 - ➔ Slakkenhuis (stator): kinetische energie van vloeistof verder omzetten in een drukverhoging



Snelheidsdriehoeken en vergelijking van Euler

Snelheidsdriehoek

- $\vec{v} = \vec{w} + \vec{u}$
 - ⇒ $\vec{v}$ = absolute snelheid vloeistof
 - ⇒ $\vec{w}$ = relatieve snelheid vloeistof tov rotor
 - ⇒ $\vec{u}$ = snelheid van de rotor
- Voor optimale werking: hoek β_1 (gevormd door raaklijn aan de schoep en de omtrekrichting) = hoek gevormd door $\vec{w}_1$ met $\vec{u}_1$
 Indien hieraan niet voldaan: vloeistofstroom botst tegen de schoep => stoot bij inlaat
 → energieverlies en dus verlies aan rendement



Formule van Euler

- Wet van Bernoulli: totale druk langs een stroomlijn blijft constant zolang geen arbeid met de omgeving wordt uitgewisseld.
 - ⇒ Wet gaat niet op → rotor voegt arbeid toe → totale druk opgevoerd langs stroomlijn
 - ⇒ **Eulerse opvoerdruk**: zie afleiding formule HB p262-263 + slides

$$\Delta p_E = \rho(u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u})$$

- In werkelijkheid: verliesmechanismen
 $\Rightarrow$ Opvoerdruk $< \Delta p_E$

Pompkarakteristiek

= verband tussen de manometrische opvoerdruk Δp_{man} en het debiet Q van een turbopomp bij een vast toerental.

Verband tussen Eulerse opvoerdruk en debiet

$$\Delta p_{E,th} = K_1 - K_2 Q_{th} \rightarrow \text{lineair dalend verband (hoe hoger het debiet, hoe lager de opvoerdruk)}$$

Verliesmechanismen: zie figuur 3 (HB p266)

- Slip: $\Delta p_E = k \Delta p_{E,th}$ met $k < 1$
 $\Rightarrow$ Bij uitrede uit de rotor: stromingshoek (β_2) kleiner dan hoek van de schoepen
- Wrijvingsverliezen: $\Delta p_{wrijv} = k_{wrijv} \cdot Q_{th}^2$
- Stootverliezen
 $\Rightarrow$ In theorie:
 Schoephoek β_1 = hoek van de snelheid $\bar{w}_1 \rightarrow$ dan geen stootverliezen
 $\Rightarrow$ In praktijk: debiet variabel $\rightarrow$ snelheid verandert $\rightarrow$ hoek verandert $\rightarrow$ stootverliezen
- Lekverliezen
 $\Rightarrow$ Debiet lager dan theoretisch

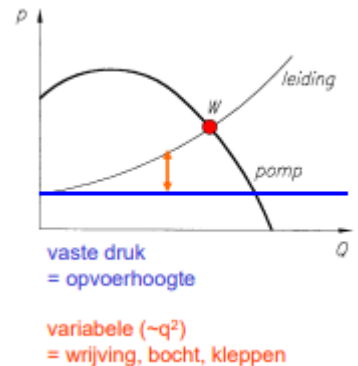
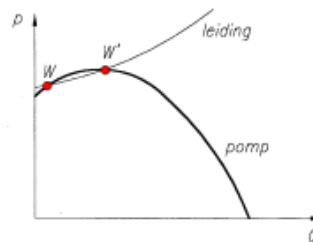
Totale rendement

$$\eta_{tot} = \frac{\Delta p_{man} \cdot Q}{P_{as}}$$

Met P_{as} = asvermogen door de motor aan de pomp geleverd

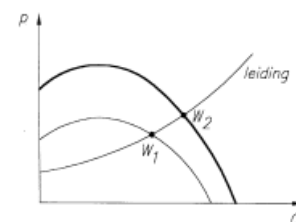
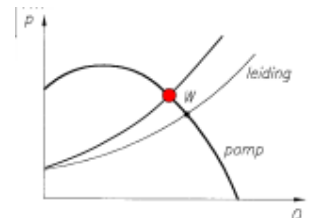
Bedrijfspunt (werkingspunt)

- Leidingsysteem $\rightarrow$ statische druktoename en drukverlies in functie van het debiet door de leiding
- Werkingspunt W = snijpunt tussen de pomp- en leidingkarakteristiek
- Labiel bedrijfspunt



Hoe bedrijfspunt beïnvloeden?

- Insnoering (m.b.v. bv een kraan) $\rightarrow$ verhoogt drukverliezen $\rightarrow$ debiet vermindert
- Verandering toerental $\rightarrow$ bij verlagen van het toerental komt de pompkarakteristiek lager te liggen
- Bypassleiding: deel van debiet rechtstreeks terug naar zuigleiding



Grote axiale pompen bedoeld voor variërend bedrijf (met sterk variërend debiet) → uitgerust met verstelbare schoepen

- Voordeel: voor verschillende debieten kan de schoephoek aangepast worden zodat de aanstroming van de schoepen in alle gevallen optimaal is → minimale botsingsverliezen bij variërend debiet
- Nadeel: kostprijs

Constructieve aspecten

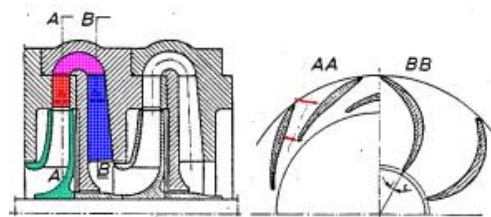
In vergelijking met zuigerpompen

- Voordelen:
 - o Geen heen en weer gaande onderdelen → geen traagheidskrachten → sneller draaien → hogere debieten mogelijk
 - o Afwezigheid kleppen → geen slijtage of ondichtheid
 - o Gelijmatiger debiet
 - o Geen overdrukbeveiliging nodig (beperkte druk bij nuldebiet)
- Nadelen:
 - o Niet vanzelf aanzuigend
 - o Minder hoge drukken
 - o Minder geschikt voor zeer viskeuze vloeistoffen

Diffusor

= ruimte waar de vloeistof aan snelheid verliest en bijgevolg aan druk wint (wet van Bernoulli).

- ➔ Slakkenhuis (zonder schoepen) dat de waaier omgeeft.
- ➔ Diffusor met leischoppen: afstand neemt geleidelijk aan toe zodat de snelheid wordt afgeremd.

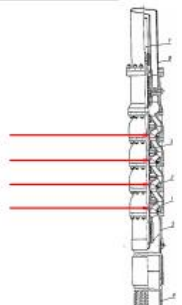


Meerdere trappen in serie

- Hogere totale opvoerhoogte
- Petroleumwinning: boorbuis pomp
 - ⇒ Aandrijving gebeurt met een motor bovenaan en een lange as, of met een 'natte' motor onderin de buis.

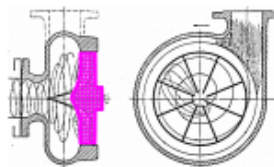
Diepboor pomp

- diameter klein
- ➔ 1 rotor = beperkte drukverhoging
- ➔ meerdere trappen



Verpompen van sterk vervuild water of slib

- Grote afstand tussen statorwand en rotorwand
- Werveling
- Beperkt rendement (wegens minder goede geleiding van de stroming)



Turbocompressoren

Verskil met turbopompen

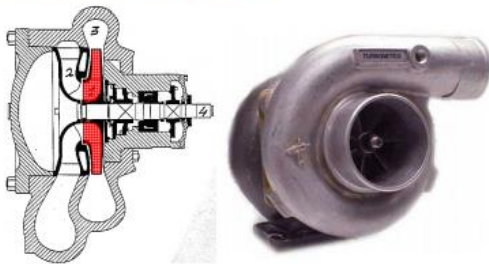
- Soortelijke massa gas $\ll$ soortelijke massa vloeistof
 - ⇒ Zeer hoge snelheden
 - ⇒ Diffusor nodig (want hoge snelheden = hoge E_{kin})
- Samendrukbaarheid gas → arbeid verrichten voor de samendrukking
- Temperatuur wanden constant door continue werking
 - ⇒ Minder warmte-uitwisseling
 - ⇒ Samendrukking dicht bij adiabatische lijn
 - ongunstig voor vermogen

In vergelijking met zuigercompressoren

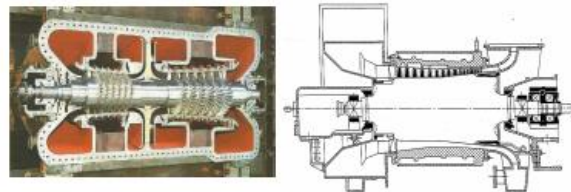
- Voordelen: dezelfde als voor turbopompen

- Nadelen:
 - o Groot aantal trappen nodig
 - o Storende onbalanskracht bij minste vervuiling of slijtage van de rotor

Radiale turbocompressor



Axiale turbocompressor



Gasturbines

Energie aanwezig in een gas (temperatuur, druk, snelheid) omzetten in mechanische arbeid.

Werking:

- In de stator wordt de energie-inhoud van het fluïdum omgezet in snelheid.
- Snelheid wordt tevens omgebogen van axiaal naar rakend aan het rotorblad.
- De E_{kin} wordt aangewend om de rotor in beweging te brengen.
- De beweging wordt opgewekt door de liftkracht die instaat voor het drukverschil over het blad.
- De snelheid wordt door de rotor omgebogen tot de axiale richting opnieuw bereikt wordt.

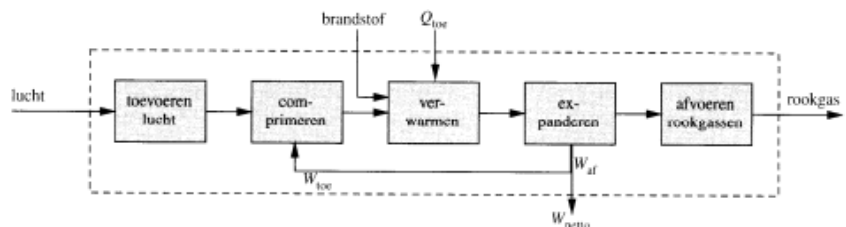
Verschillende soorten turbines:

- Turbines voor vloeistoffen (bv. hydraulische turbines)
- Turbines voor waterdamp (bv. stoomturbines in elektriciteitscentrales)
- Gasturbines

Principe van gasturbines

Open gasturbine

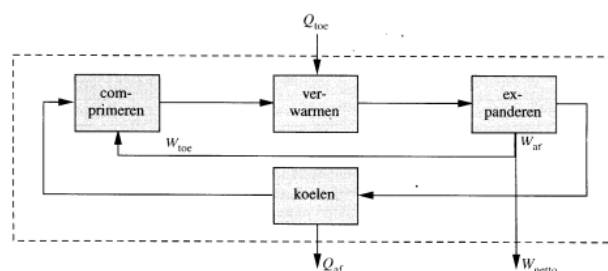
- 1) Toevoeren lucht
- 2) Compressie → verbruikt deel van opgewekte arbeid
- 3) Verwarming/verbranding
- 4) Expansie/arbeidslevering → deel aan compressor, deel aan de gebruiker
- 5) Afvoer rookgassen

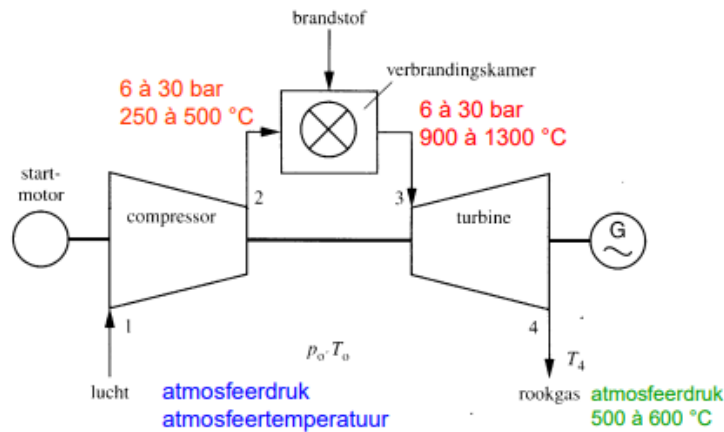


Gesloten gasturbine

Cyclisch:

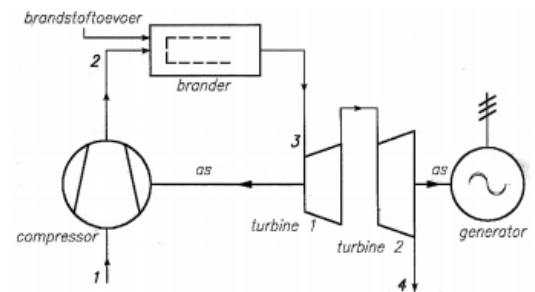
- 1) Compressie → verbruikt deel van opgewekte arbeid
- 2) Verwarming/verbranding
- 3) Expansie/arbeidslevering → deel aan compressor, deel aan de gebruiker
- 4) Koeling
- 5) Compressie
- 6) Enz.





Uitvoering en constructie van een gasturbine

- Compressor en turbine op eenzelfde as → dezelfde hoeksnelheid
 - ⇒ Past niet altijd voor de gebruiker
 - ⇒ Gasturbines met 2 assen
 - ⇒ **Gasgenerator** (compressor plus eerste turbine)
 - levert hete gassen onder druk voor de tweede turbine
- Aeroderivatieve gasturbines (> vliegtuigmotoren)
 - ⇒ Beperkte vermogens (tot 100 MW)
 - ⇒ Compressieverhouding = 30
 - ⇒ Tot 1400 °C
- Industriële gasturbines (> stoomturbines)
 - ⇒ Grote vermogens (tot 500 MW)
 - ⇒ Lage toerentallen
 - ⇒ Compressieverhouding = 15
 - ⇒ Tot 1200 °C

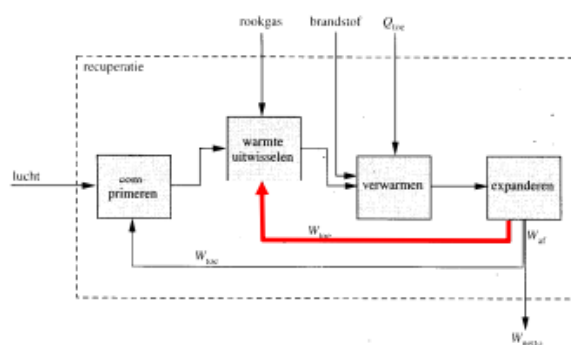


Energie uit uitlaatgassen

- Warmtewisselaar → lucht opwarmen vóór de verbrandingskamer

Warmte rookgas →
opwarmen lucht na
compressie

Probleem:
 t° rookgas weinig
lager dan lucht na
compressie



- STEG-centrale → Stoom En Gas: stoomturbines + gasturbines
 - ⇒ **Co-generatie:**
 - Gasturbine → uitlaatgassen → warmtewisselaar → stoom → stoomturbines
 - ⇒ Klassieke thermische centrale: enkel stoomturbines

Gebruik van een gasturbine

- Aandrijving van grote vliegtuigen
- Aandrijving van schepen

- Energie op booreilanden
- In zware voertuigen
- Personenwagens: hybride uitvoering
 - ⇒ Gasturbine voedt batterijen op constante belasting
 - ⇒ Aandrijving op elektromotoren

Voordelen gasturbines:

- Compacte bouw
- Afwezigheid traagheidskrachten

Nadelen:

- Lawaai
- Lagere rendement