



Patrick De Baets

# MACHINES AAN HET WERK

Een inleiding tot de  
**werktuigkunde**

acco

# Machines aan het werk

*Patrick De Baets*

Acco Leuven / Den Haag

*Eerste druk:* 2014

*Gepubliceerd door*

Uitgeverij Acco, Blijde Inkomststraat 22, 3000 Leuven, België

E-mail: [uitgeverij@acco.be](mailto:uitgeverij@acco.be) – Website: [www.uitgeverijacco.be](http://www.uitgeverijacco.be)

*Voor Nederland:*

Acco Nederland, Westvlietweg 67 F, 2495 AA Den Haag, Nederland

E-mail: [info@uitgeverijacco.nl](mailto:info@uitgeverijacco.nl) – Website: [www.uitgeverijacco.nl](http://www.uitgeverijacco.nl)

*Omslagontwerp:* [www.frisco-ontwerpbureau.be](http://www.frisco-ontwerpbureau.be)

© 2014 by Acco (Academische Coöperatieve Vennootschap cvba), Leuven (België)

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form, by mimeograph, film or any other means without permission in writing from the publisher.

D/2014/0543/92

NUR 978

ISBN 978-90-334-8518-3



# INHOUD

## DEEL 1 INLEIDING

Hoofdstuk 1. Werktuigkunde en industrie	15
Hoofdstuk 2. Werktuigkundig tekenen	21

## DEEL 2 PRODUCTIETECHNIEK

Hoofdstuk 1. Gieten	31
1. Het gietproces	31
2. Gietmethodes	34
2.1 Gieten met eenmalige vorm	34
2.2 Gieten met matrijzen	37
3. Voordelen van het gieten	40
Hoofdstuk 2. Poedermetallurgie	41
Hoofdstuk 3. Bewerken door vervormen	45
1. Vervorming van metalen	45
1.1 De trekkromme	45
1.2 Driedimensionale spanning	48
1.3 Plasticiteitscriteria	53
1.4 Arbeid	55
1.5 Temperatuur	56
2. Walsen	57
2.1 Walsen van plaat	57
2.2 Staven, profielen, buizen	61
3. Extruderen en trekken	65
3.1 Extruderen	65
3.2 Trekken	67



## 6 ► Inhoud

4.	Smeden	70
4.1	Algemeen	70
4.2	Hamers en persen	70
4.3	Vrij smeden	74
4.4	Matrijssmeden	76
4.5	Materialen en toepassingen	79
5.	Plaatwerk	80
5.1	Knippen en ponsen	80
5.2	Plooien	82
5.3	Rollen	85
5.4	Dieptrekken	86
5.5	Spinnen	90
5.6	Hydrovormen	91
5.7	Toepassingen	92
	Hoofdstuk 4. Spaanafnemende bewerkingen	93
1.	spaanvorming	93
1.1	Geometrie van de spaanvorming	93
1.2	Krachten en vermogen	96
1.3	Materialen	102
1.4	Slijpen	105
2.	Draaibanken	107
3.	Boren en boormachines	114
4.	Frezen en freesmachines	116
5.	Trekfrezen	120
6.	Slijpmachines	122
7.	Automatisering	123

## DEEL 3 OVERBRENGEN VAN VERMOGEN

	Hoofdstuk 1. Tandwielen	129
1.	Cilindrische tandwielen	129
2.	Rechte evolvente tandwielen	131
3.	Schroeftandwielen	135
4.	Conische tandwielen	136
5.	Tandwielen met kruisende assen	137
6.	Verhouding van hoeksnelheden	138
7.	Planeetsystemen	140
8.	Slijtage, smering, breuk	141
	Hoofdstuk 2. Riemoverbrengingen	143
1.	Inleiding	143
2.	Soorten riemen en riemaandrijvingen	144
2.1	Vlakke riemen	144
2.2	V-riemen	145
2.3	Getande riem	146

3.	Krachten en spanningen in de vlakke riemoverbrenging	148
3.1	Geometrie	148
3.2	Riemkrachten	149
3.3	Spanningen in de riem	153
4.	Principe van de v-riemoverbrenging	155
Hoofdstuk 3. Kettingaandrijvingen		157
1.	Inleiding	157
2.	Soorten kettingen	157
3.	Geometrie van de kettingoverbrenging	160
4.	Trekkkracht in de kettingaandrijving	161
Hoofdstuk 4. Hydrauliek		163
1.	Pompen en motoren	163
2.	Ventielen	169
3.	Hydraulische systemen	172
4.	Voordelen en nadelen van hydraulische transmissie	175
5.	Pneumatische systemen	176

## DEEL 4 TRIBOTECHNIEK

Hoofdstuk 1. Wentellagers		181
1.	Soorten wentellagers	181
1.1	Zuiver radiale belasting	182
1.2	Zuiver axiale belasting	183
1.3	Combinatie van axiale en radiale belasting	184
2.	Toepassingen van wentellagers	185
3.	Contactmechanica van wentellagers	186
4.	Belastbaarheid van wentellagers	191
5.	Smering en afdichting	193
Hoofdstuk 2. Hydrodynamische smering		195
1.	Volle filmsmering	195
1.1	Smeringstoestanden	195
1.2	Toepassingen	197
1.3	De Reynolds-vergelijking	199
2.	Het hydrodynamisch stuwlager	203
2.1	Drukopbouw onder één glijschoentje	204
2.2	Normale kracht op het glijschoentje (belastbaarheid)	207
2.3	Tangentieële kracht op het glijschoentje (wrijving)	208
3.	Het hydrodynamische radiale lager	209
3.1	Geometrie van het radiaal lager	209
3.2	Radiale lager met oneindige breedte	210
3.3	Enkele praktische aspecten	212
3.4	Materialen voor glijlagers	213
3.5	Uitvoering	214

**DEEL 5 ENERGIETECHNIEK**

Hoofdstuk 1. Zuigermachines	219
1. Kinematica en dynamica van het kruk-drijfstangmechanisme	219
2. Pompen	225
2.1 Opvoerdruk	225
2.2 Indicator diagram	228
2.3 Debiet	231
2.4 Rendementen	233
3. Compressoren	235
3.1 Werking van de zuigercompressor	235
3.2 Constructie van compressoren	239
3.3 Schroefcompressoren	242
4. Zuigermotoren	243
4.1 Algemeenheden	243
4.2 Ottomotoren	245
4.2.1 Algemeen principe	245
4.2.2 Ontsteking en verbranding	247
4.2.3 Motorkoppel	248
4.3 Dieselmotoren	251
4.3.1 Algemeen	251
4.3.2 Werking van de viertakt dieselmotor	252
4.3.3 Constructieve aspecten	255
4.3.4 Opgeladen dieselmotoren	257
Hoofdstuk 2. Stromingsmachines	259
1. Turbopompen	260
1.1 Snelheidsdriehoeken en vergelijking van Euler	261
1.2 Pompkarakteristiek	263
1.3 Bedrijfspunt	267
1.4 Constructieve aspecten	269
2. Turbocompressoren	272
3. Gasturbines	274
3.1 Principe van gasturbines	274
3.2 Uitvoering en constructie van een gasturbine	277
3.3 Gebruik van gasturbines	282

**DEEL 6 MOBIELTRANSPORT**

Hoofdstuk 1. Vrachtwagens	285
1. Soorten vrachtvoertuigen	285
2. Evenwichtsvergelijking van een voertuig	286
3. Drijflijn	290
4. Banden	294
5. Remmen	296

6.	Veren	298
7.	Sturen	301
8.	Het chassis	301
Hoofdstuk 2. Spoorvoertuigen		303
1.	Korte geschiedenis	303
2.	Spoorweg	303
2.1	Opbouw van een spoorweg	303
2.2	Verkanting	305
2.3	Wissels	307
3.	Soorten locomotieven	308
3.1	Diesellocomotief	308
3.2	Elektrische locomotief	310
4.	Elektrische treinen	310
4.1	Elektrificatie	310
4.2	Onderstation	312
4.3	Derde rail	312
4.4	Elektrische tractie	313
4.5	Stroomafnemer	315
5.	Spoorvoertuigen	315
6.	Treinwielen	318
6.1	Railprofiel	318
6.2	Vlakke plaats	319
6.3	Rolgeluid	320
6.4	Remsystemen	320
7.	Treinbeïnvloedingsystemen	322
7.1	Crocodile	322
7.2	TBL (Transmissie Baken-Locomotief)	323
7.3	Dodemansknoop	324
8.	Hogesnelheidstrein	324
8.1	Hogesnelheidstrein	324
8.2	Vereisten voor het rijden met hoge snelheid	325
8.3	Magneet zweeftreinen	326
9.	Goederenvervoer	327
Hoofdstuk 3. Hijswerktuigen		329
1.	Algemeen	329
2.	Trekorganen	331
2.1	Staalkabels	331
2.2	Kettingen	333
2.3	Schijven en trommels	335
3.	Organen voor het opnemen van de last	338
3.1	Haken	338
3.2	Lasthefmagneten	340
3.3	Tangen en klemmen	340
3.4	Grijpers	340

## 10 ► Inhoud

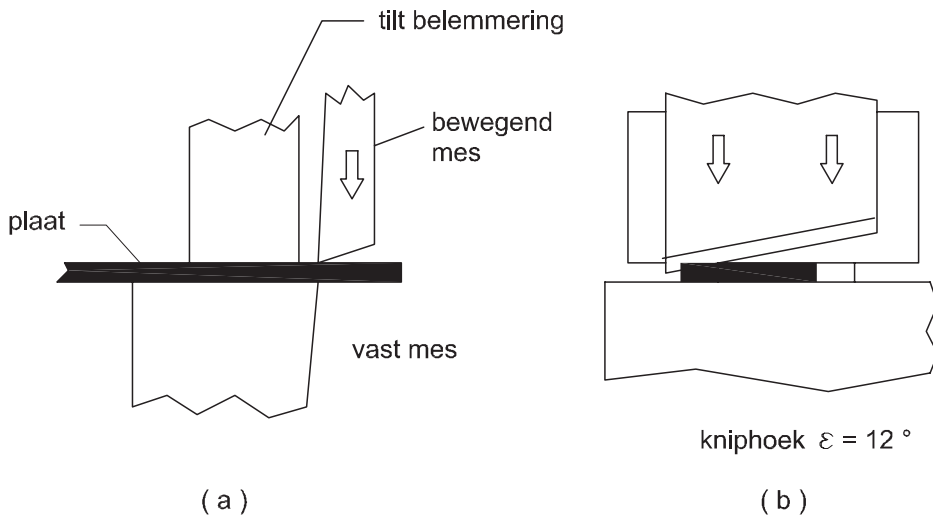
4.	Loopkranen	344
4.1	Aanwending en classificatie	344
4.2	De loopkat	347
4.3	De remmen	350
4.4	De brugconstructie	353
5.	Portaaltoestellen	354
5.1	Indeling	354
5.2	Portaalkranen	354
5.3	Laadbruggen met klassieke loopkat	355
5.4	Laadbruggen met zwenkloopkat	357
5.5	Laadbruggen met kraan	357
5.6	Laadbruggen met uitschuifbare ligger	358
6.	Kranen	361
6.1	Algemene beschrijving	361
6.2	Zwenkmechanisme	364
6.3	Horizontale lastweg bij vluchtversnelling	367
6.4	Drijvende kranen	372
	Hoofdstuk 4. Rollend kadematerieel	373
1.	Stapelaars	373
2.	Laders	379
3.	Containervervoermaterieel	380

Toepassingen van het smeden zijn onder andere grote assen voor turbines en alternatoren, turbineschijven, krukassen, drijfstangen, bouten, tandwiel- en allerlei machineonderdelen, munten etc.

## 5. Plaatwerk

Zeer veel producten worden vervaardigd uit dunne metaalplaat: koolstofstaal, roestvast staal, aluminium of koper. Met dunne plaat wordt een plaat van enkele tienden millimeter dik tot ongeveer 3 mm dik bedoeld. Dergelijke platen kunnen gemakkelijk koud vervormd worden om allerlei producten te vervaardigen.

### 5.1 Knippen en ponsen

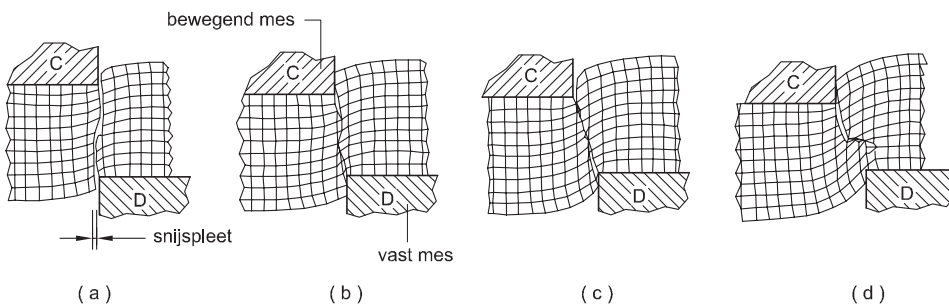


**Figuur 35.** Knippen van platen (a) zijaanzicht, (b) vooraanzicht.

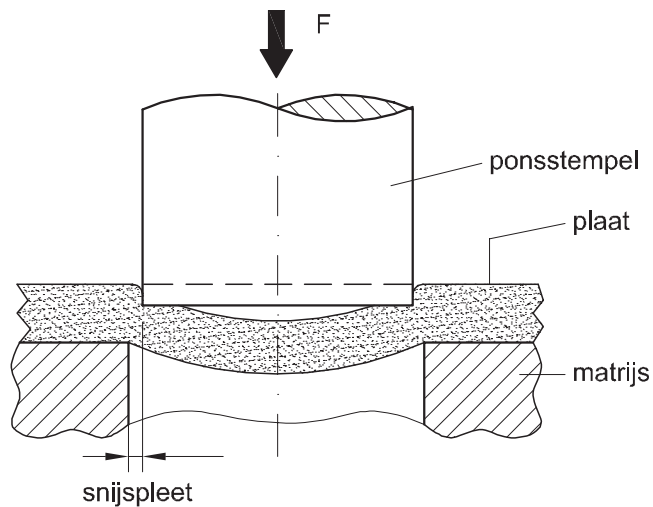
De plaat komt meestal aan in rollen en eerst worden er stukken op de gepaste maat en vorm uit geknipt of geponst. Men kan een metalen plaat knippen zoals men met een schaar papier knipt. Het principe staat in Figuur 35. De neerhouder belet dat de plaat kantelt, maar er kan ook zonder neerhouder geknipt worden. Wanneer de twee kanten van de schaar naar elkaar toe komen wordt het materiaal zo sterk in afschuiving vervormd dat

het breekt. De vervorming is geschetst in Figuur 36, waar ook het effect van de snijspleet te zien is. Een te kleine snijspleet vergt een te grote kracht, maar een te grote snijspleet geeft geen mooie snede.

Men kan de kracht verminderen door de volledige snede niet op hetzelfde ogenblik te maken, doch geleidelijk, zoals een gewone schaar doet, door de messen wat schuin te stellen onder een zekere kniphoeck (Figuur 35).



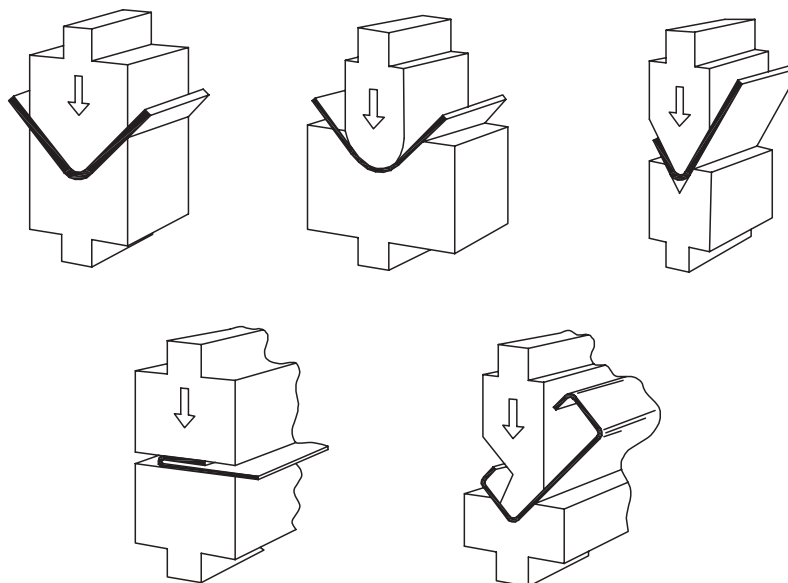
**Figuur 36.** Vervorming bij het knippen van plaat.



**Figuur 37.** Ponsen van een cirkelvormige opening.

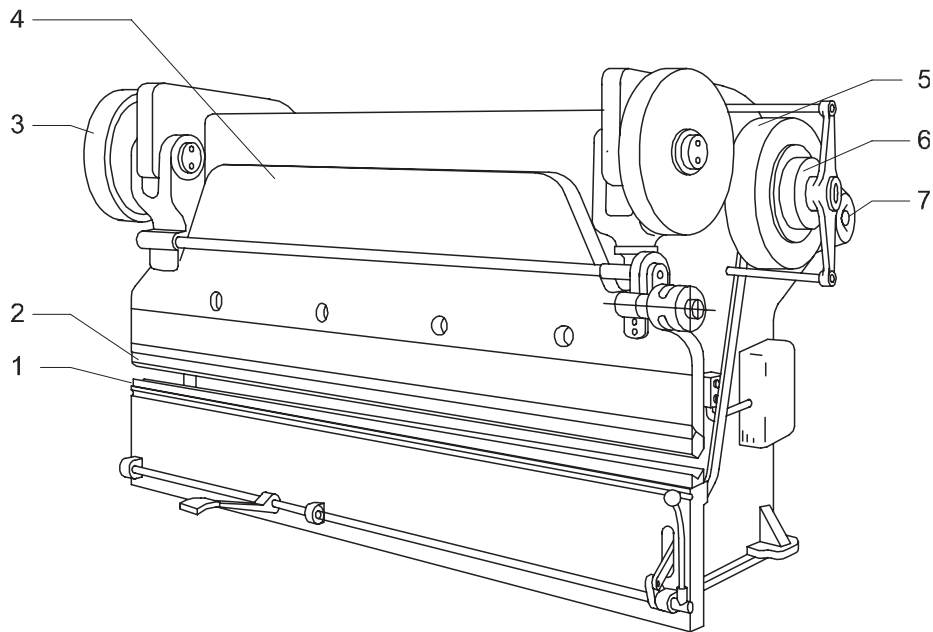
Ponsen is in principe dezelfde bewerking, maar de snede volgt geen rechte lijn (Figuur 37): men kan ronde gaten maken, maar men kan ook stukken met om het even welke vorm uit de plaat nemen. Uiteraard moeten de ponsstempel en de ondermatrijs deze vorm dan wel bevatten.

## 5.2 Plooien

**Figuur 38.** Plooien van plaat.

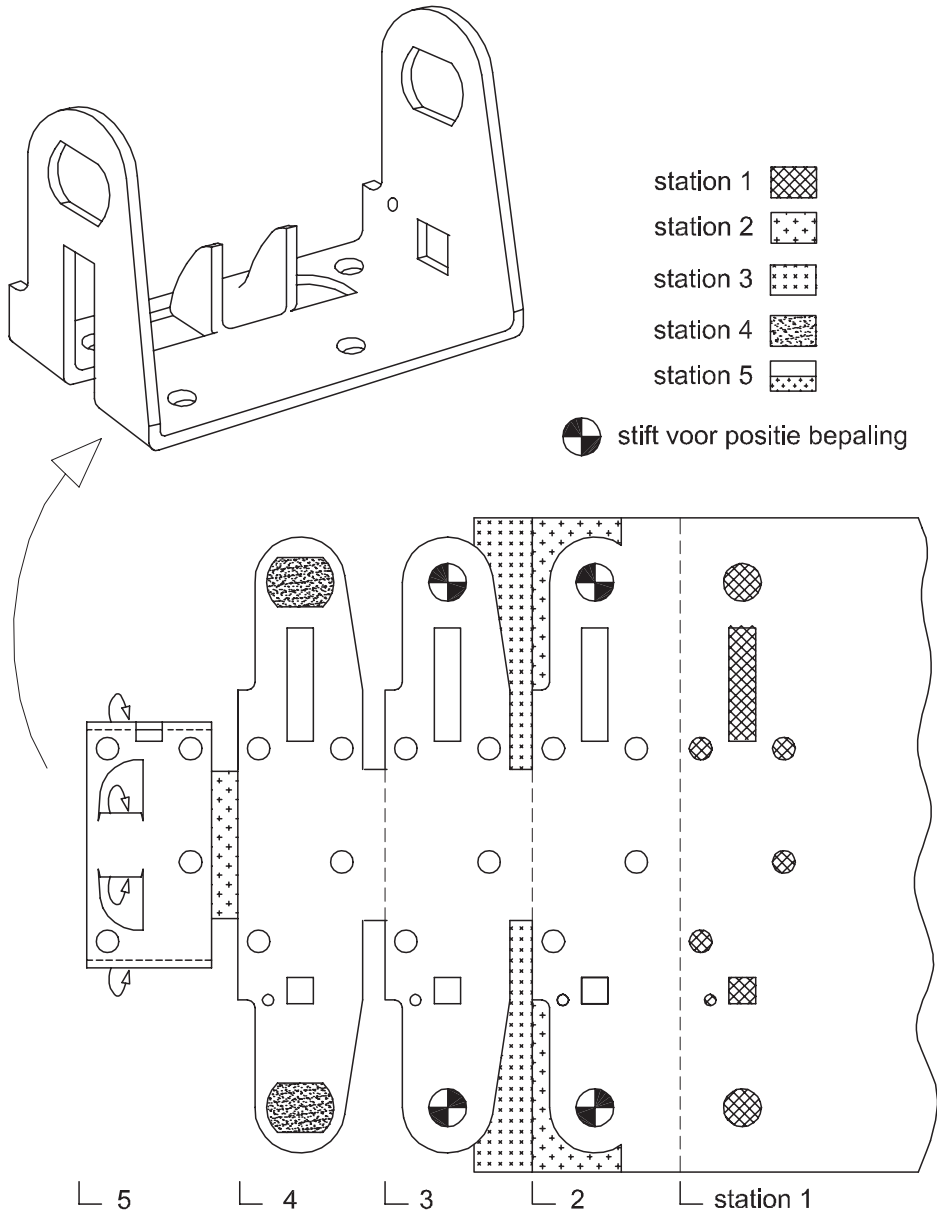
Nadat het knipwerk verricht is, kunnen de stukken door diverse operaties plastisch vervormd worden. De eenvoudigste operatie is het plooien. Figuur 38 toont verschillende plooioperaties. Het plooien kan gebeuren over een lengte van een paar meter of meer in een plooiers (Figuur 39), waar de onderste matrijs vaststaat en de bovenste neerwaarts beweegt. Men moet er onder andere bij het ontwerp van de plooiematrijs wel mee rekening houden dat het materiaal een weinig elastisch terugveert.





**Figuur 39.** Mechanische plooiers (1) onderstempel, (2) bovenstempel, (3) aandrijf wiel, (4) stoter, (5) vliegwiel, (6) koppeling, (7) aandrijfmotor.

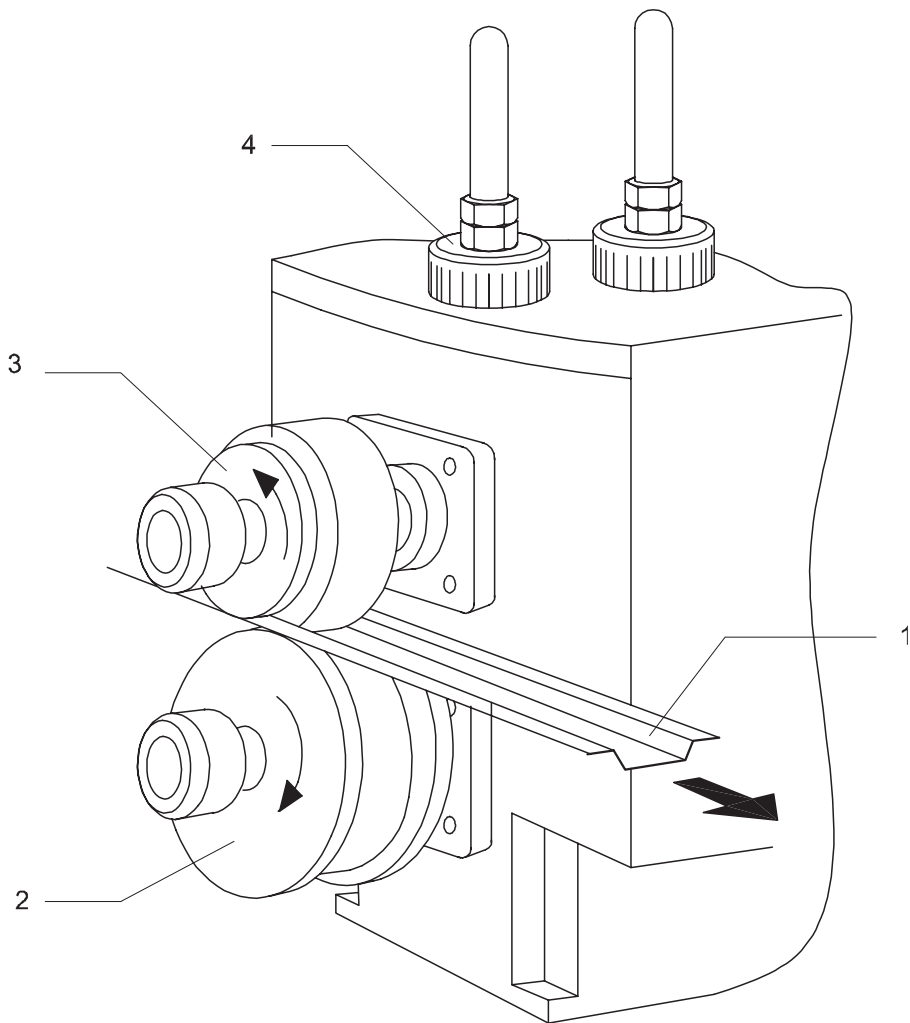
Met knippen, ponsen en plooiën alleen kan men al heel wat kleine onderdelen vervaardigen. Op Figuur 40 zijn de bewerkingen aangeduid die achtereenvolgens uitgevoerd worden om het afgebeelde onderdeel te bekomen. Een band met de gepaste breedte passeert door een pers waarvan de bewegende plaat de snijders en de matrijs draagt die nodig zijn om de vijf vereiste bewerkingen uit te voeren. Post 1 pons negen gaten. Dan schuift de band één post vooruit, en het materiaal dat onder post 1 zat komt nu onder post 2, waar een volgende bewerking wordt uitgevoerd, terwijl een nieuw deel van de band nu onder post 1 komt. De posten 3 en 4 omvatten eveneens ponsbewerkingen, terwijl onder post 5 de zijkanten geplooid worden en nog het knippen om het stuk vrij te maken.



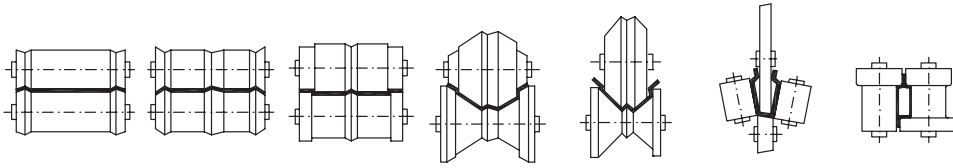
**Figuur 40.** Complex werkstuk gevormd door plaatbewerking.

## 5.3 Rollen

Heel lange profielen kunnen vervaardigd worden door rollen, zoals op Figuur 41 afgebeeld is. Een band die enkele centimeter breed en tot drie of vier millimeter dik kan zijn, wordt door rollen met horizontale as koud vervormd tot een profiel met een grote buigstijfheid. Om nog ingewikkeldere profielen te vervaardigen, kunnen er ook schuine rollen en rollen met horizontale as aan te pas komen, die een reeks achtereenvolgende plooiwerkings uitvoeren (Figuur 42).

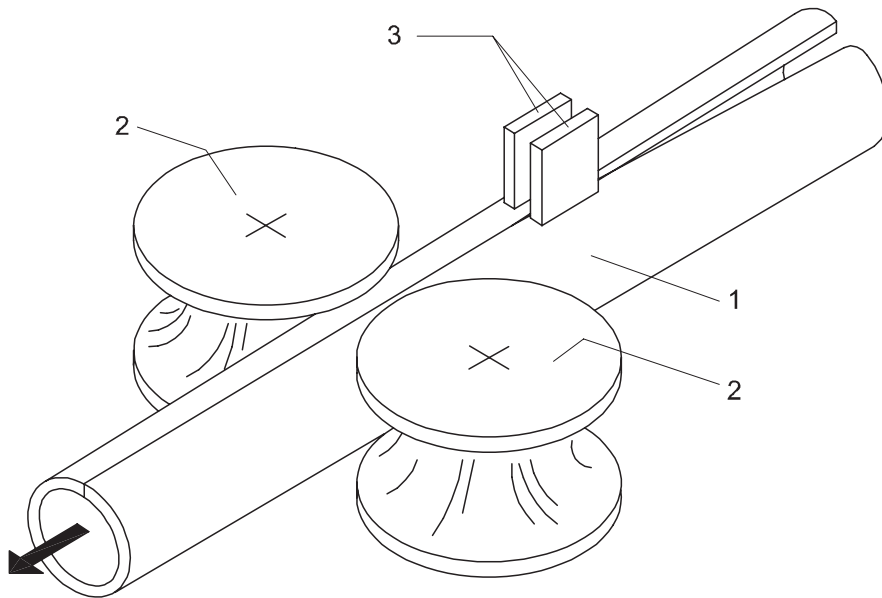


**Figuur 41.** Rollen van profielen (1) werkstuk (staalplaat), (2) tegenrol, (3) profielrol, (4) instelschroef.



**Figuur 42.** Vormrollen van profielen.

Op Figuur 43 staat een proces afgebeeld om langsgelaste buizen te vervaardigen. Een band wordt door twee rollen tot een cilinder geplooid en vervolgens worden de twee randen aan elkaar gelast. Als methode voor het lassen staat weerstandlassen afgebeeld, maar inductielassen of gewoon vlambooglassen kan ook gebruikt worden. In de praktijk zal de plaat niet in één stap tot een cilinder worden geplooid, maar heeft men meerdere paren plooirollen nodig.

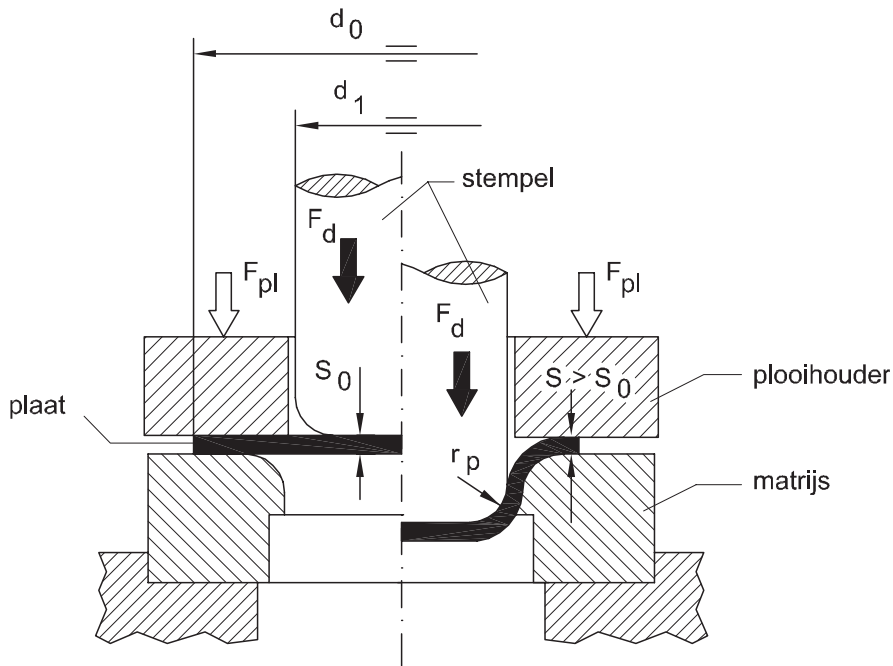


**Figuur 43.** Rollen en lassen van langsgelaste buizen (1) staalplaat, (2) vormrollen, (3) laselektrodes.

#### 5.4 Dieptrekken

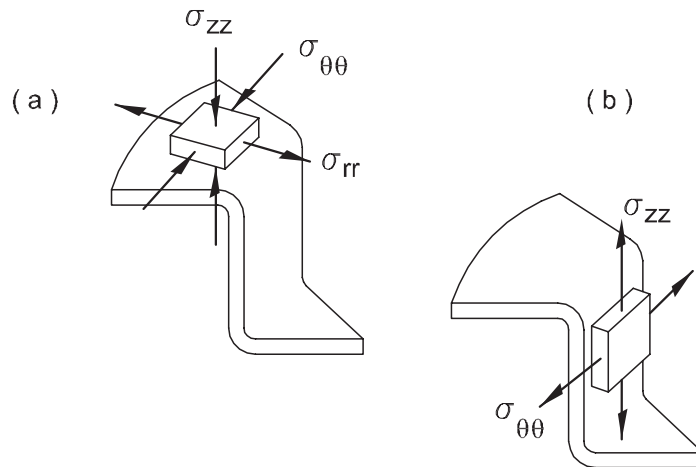
Een belangrijke bewerking is het dieptrekken. Een stuk plaat dat vooraf in de gepaste vorm geknipt is, wordt tussen twee matrijzen koud vervormd tot een dubbel gekromd oppervlak (Figuur 44). Zoals te zien is op de rechterhelft van de figuur, wordt de plaat naar binnen toe getrokken. De kraag

wordt tussen een plooihouder en de matrijs geklemd om te beletten dat er plooien worden gevormd. De klemming tussen de matrijs en de plooihouder belet echter de binnenwaartse beweging niet, want anders zou de plaat kunnen scheuren in plaats van te vervormen.



**Figuur 44.** Dieptrekken van platen (links: bij begin van bewerking, rechts: na de bewerking).

Figuur 45 gaat nader in op de vervorming en de spanning bij het dieptrekken van een cilindrische pot. De omtrek van de plaat is groter dan de omtrek van het stuk dat moet vervaardigd worden en tijdens de operatie schuift de kraag geleidelijk naar binnen. In de radiale richting wordt het materiaal dus naar binnen getrokken, wat een trekspanning vergt in de radiale richting. Terwijl het materiaal naar binnen schuift, wordt de omtrek korter. Men verwacht dus dat er een drukspanning bestaat in de richting van de omtrek. Het is deze drukspanning die zou kunnen aanleiding geven tot de vorming van plooien in de kraag. Daarom wordt er in de richting van de dikte door de plooihouder op de kraag gedrukt. In het cilindrisch deel dat reeds over de rand getrokken werd, is er in de verticale richting een trekspanning: de stempel duwt de bodem van de pot neerwaarts en het cilindrisch deel trekt de kraag mee. Omdat de pot gevormd wordt door het materiaal van de kraag naar binnen te bewegen, is de dikte van de pot groter dan de oorspronkelijke dikte van de plaat en is zij ook niet overal gelijk.



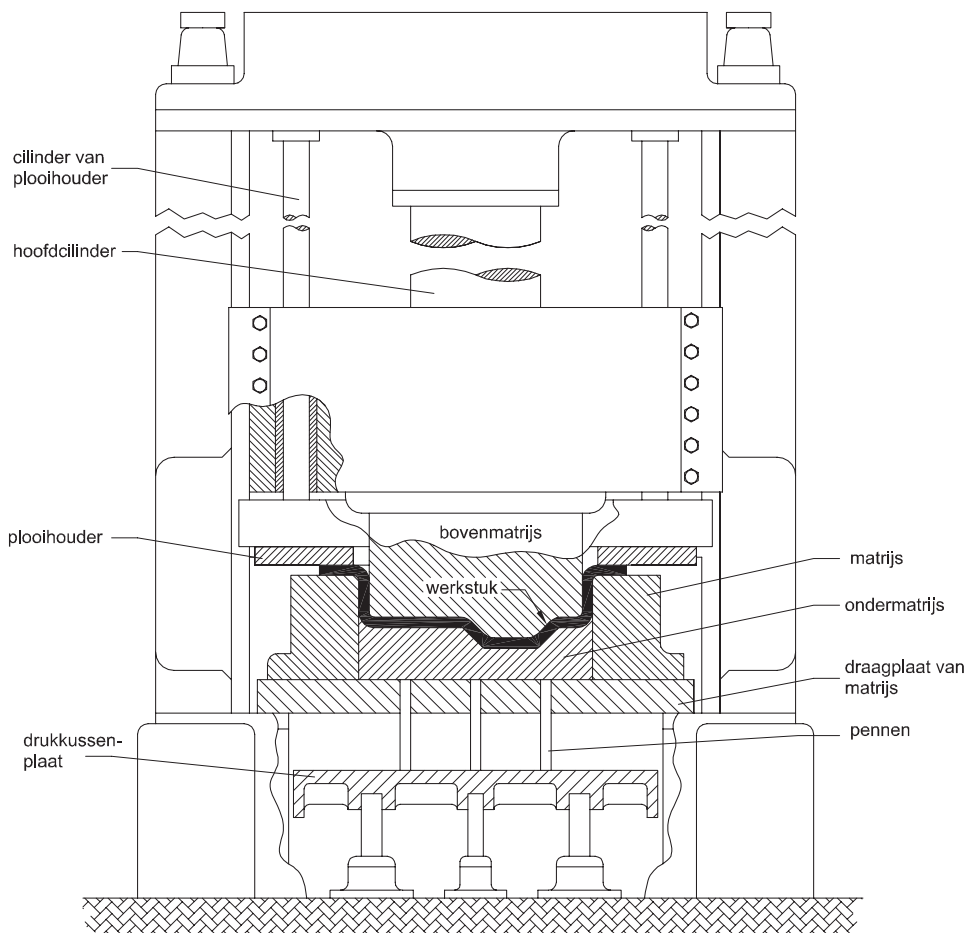
**Figuur 45.** Spanningen en vervormingen bij het dieptrekken.

Het dieptrekken kan gebeuren in een hydraulische of in een mechanische pers. In de hydraulische pers die op de Figuur 46 afgebeeld is, bestaat de matrijs uit vier delen: eerst wordt de vlakke plaat gevat op de omtrek, tussen de matrijs en de plooihouder. De hiervoor vereiste kracht wordt geleverd door twee kleine hydraulische cilinders. Eenmaal de plaat aldus gevat is, bewegen de genoemde delen niet meer. De ondermatrijs wordt door de drukkussenplaat gesteund op een aantal pennen, door hydraulische of pneumatische cilinders met een constante kracht opwaarts geduwd, tegen de plaat. Dan komt de hoofdcilinder, die de bovenmatrijs in de ondermatrijs drukt, in werking. Hierbij beweegt de ondermatrijs neerwaarts, gedragen door de pennen van de drukkussenplaat, tot de ondermatrijs gestuit wordt door een vaste draagplaat. Tijdens deze beweging verkrijgt het werkstuk zijn vorm die precies past tussen de bovenmatrijs en de ondermatrijs. Na de bewerking moet het gevormde werkstuk uit de pers gehaald worden. Daartoe opent de pers en wordt de ondermatrijs door middel van de drukkussenplaat en de pennen opwaarts geduwd. Het werkstuk, dat door de elastische terugvering enigszins in de matrijs klemt, laat zich aldus gemakkelijk uit de matrijs verwijderen.

In de meeste gevallen zijn er meerdere achtereenvolgende bewerkingen nodig om de plaat haar definitieve vorm te geven. Die gebeuren in even veel persen, elk met hun matrijsen. De investering is dus zeer hoog. In de automobiellindustrie is de cyclustijd (= tijd voor de bewerking in één pers) enkele seconden.

Bij het persen ondergaat het materiaal een hele cyclus van vervorming en kan het gebeuren dat hierbij scheuren of andere vormen van schade optreden.

Het ontwerp van een stuk plaatwerk vergt daarom een voorafgaande studie: enerzijds moet men weten welke cyclus van vervorming de plaat zal ondergaan in de achtereenvolgende bewerkingen en verder moet men nagaan of het materiaal deze cyclus zonder schade kan doorstaan. Een matrijs is een dure investering en men kan zich moeilijk de kosten en de tijd veroorloven om enkele reeksen matrijzen te vervaardigen om uit te proberen welke de beste reeks is. Daarom wordt vandaag gebruikgemaakt van computersimulaties om vooraf de cyclus van vervorming van het gekozen materiaal te voorspellen.



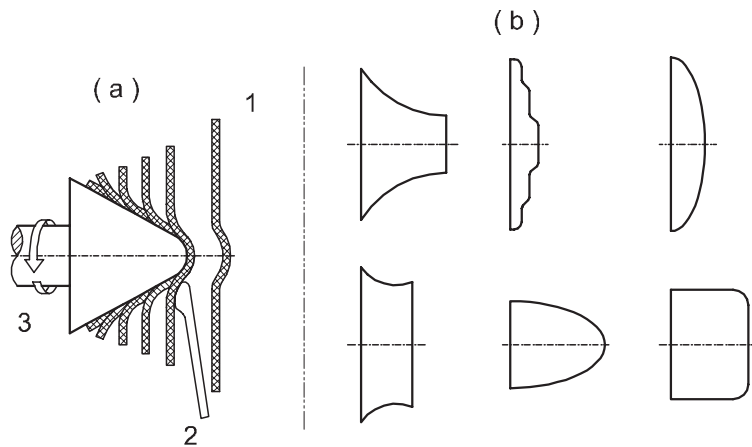
**Figuur 46.** Hydraulische dieptrekpers.

Bij het dieptrekken onderscheidt men een aantal mogelijke dieptrekfouten. Een eerste fout is het rimpelen van de rand, wat meestal ontstaat wanneer de plooihouder met onvoldoende kracht tegen de plaat aandrukt. Scheuren kunnen optreden wanneer lokaal te hoge vervormingen (of spanningen)

worden aangelegd. Typisch zullen diepgetrokken voorwerpen aan de rand van de bodem scheuren vertonen wanneer de zijwanden te veel wrijving ondervinden in de matrijs en de bodem onvoldoende volgen tijdens de dieptrekbeweging.

Verder kan men ook last hebben van de anisotropie van de gebruikte plaat. Anisotropie betekent dat de eigenschappen (voor wat betreft plastische vervorming) van de plaat niet gelijk zijn in alle richtingen. Men kan zich, als eenvoudig gedachte-experiment, inbeelden dat er in de plaat in één bepaalde richting evenwijdige vezels ingebed zijn, die de verlenging in deze richting belemmeren. Bij een dieptrek-operatie zal deze richting vlugger naar binnen getrokken worden dan de richting die er loodrecht op staat en die gemakkelijker aan deze beweging kan ontkomen door te verlgeng. De walsbedrijven moeten hun walsoperatie dusdanig sturen dat de anisotropie van de gewalste plaat in de hand wordt gehouden.

## 5.5 Spinnen



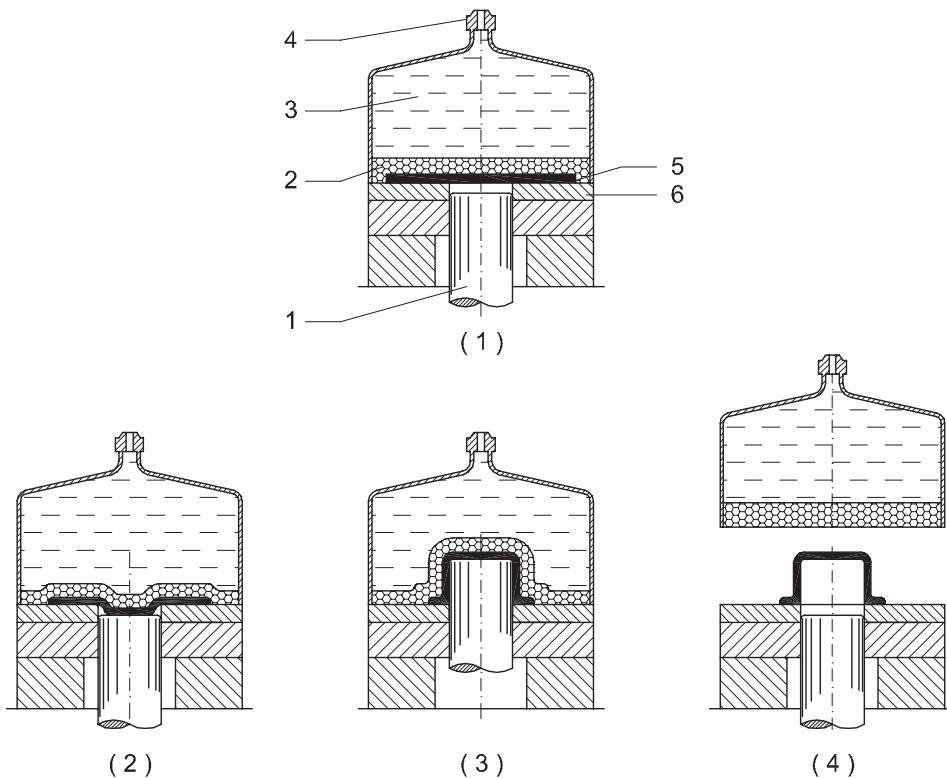
**Figuur 47.** Spinnen van platen (1) werkstuk (plaat), (2) werktuig, (3) mal.

Een methode die aanleunt bij het dieptrekken, maar specifiek gebruikt wordt voor de vervaardiging van omwentelingslichamen, is het spinnen of forceren (Figuur 47). Hiermee kunnen dunne schalen met axiale symmetrie gemaakt worden (voor huis- en keukengebruik, maar bijvoorbeeld ook voor de behuizing van een straalmotor). Een plaat (1) wordt geleidelijk tegen een draaiende mal (3) gedrukt door een werktuig (2) met een stomp uiteinde of met een wielkje. De bewerking kan met de hand verricht worden



of automatisch verlopen. Rechts op de figuur staan een aantal verschillende vormen getekend die met deze methode kunnen verwezenlijkt worden.

## 5.6 Hydrovormen

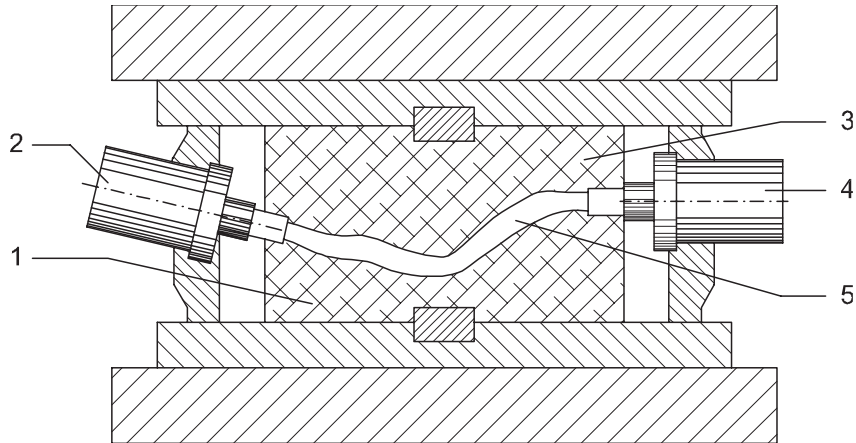


**Figuur 48.** Hydrovormen van platen (1) stempel, (2) rubber membraan, (3) reservoir (olie-gevuld), (4) drukregelventiel, (5) te vervormen staalplaat, (6) steuning.

Bij het hydrovormen maakt men gebruik van vloeistof, veelal een oliesoort, om de plaat te vervormen. Figuur 48 toont het algemene principe. In een afgesloten reservoir wordt de te vervormen plaat (5) aangebracht. De onderste stempel (1) duwt de plaat in het onder druk staande reservoir (3). Hierdoor vervormt de plaat zich rond de stempel. Aldus is de dure dieptrekmatrjjs vervangen door de relatief goedkopere vloeistof onder druk.

Het hydrovormen wordt vooral gebruikt voor buisvormige constructies (bv. uitlaatonderdelen voor auto's, structurele componenten, fietskaders,

hydraulische en pneumatische leidingen...). Door het aanbrengen van een inwendige druk wordt een aan beide zijden afgesloten buis in een matrijs opgeblazen (Figuur 49).



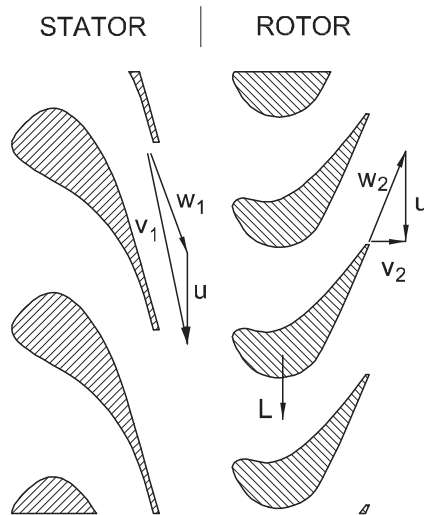
**Figuur 49.** Hydrovormen van buizen (1) ondermatrijs, (2) (4) hydraulische vloeistof, (3) bovenmatrijs, (5) werkstuk.

## 5.7 Toepassingen

Plaatwerk is zeer belangrijk in de hedendaagse industrie omdat er op betrekkelijk goedkope wijze lichte en stijve onderdelen mee kunnen worden gemaakt. Om dit in te zien, moet men maar de stijfheid van een vlakke plaat van 0,8 mm vergelijken met de stijfheid van een motorkap. Automobielen worden reeds lang zonder chassis gemaakt. De carrosserie van een auto, volledig uit dunne plaat geperst, vormt de dragende constructie waarop de aandrijving, de suspensie en de zetels bevestigd worden. Veel apparaten voor industrieel of huishoudelijk gebruik (koelkasten, metalen meubels, kasten voor fotokopieertoestellen, afwasbakken enz.) worden op deze manier vervaardigd. Ook de huid van een vliegtuig is een gebogen dunne plaat aluminium, die bijdraagt tot de sterkte en de stijfheid van de romp en de vleugels ('stressed skin'). Drankblikjes (in aluminium of staal) worden in zeer grote aantallen en met grote nauwkeurigheid geproduceerd door een speciale vorm van dieptrekken waarbij een gelijkmatige dikte en een glad oppervlak verkregen worden.

### 3. Gasturbines

Een turbine is bedoeld om de energie aanwezig in een gas (temperatuur, druk, snelheid) om te zetten in mechanische arbeid. Figuur 12 toont een doorsnede van het rotor- en het statorgedeelte van een turbine. In de stator wordt de energie-inhoud van het fluidum omgezet in snelheid. Tevens wordt de snelheid omgebogen van axiaal naar rakend aan het rotorblad, althans in het nominale werkingpunt. De kinetische energie 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 in het absolute stelsel wordt door de rotor omgebogen tot de axiale richting opnieuw wordt bereikt. Er bestaan turbines voor vloeistoffen zoals de hydraulische turbines die in waterkrachtcentrales worden gebruikt, turbines voor waterdamp (bv. de stoomturbines in elektriciteitscentrales) en gasturbines.

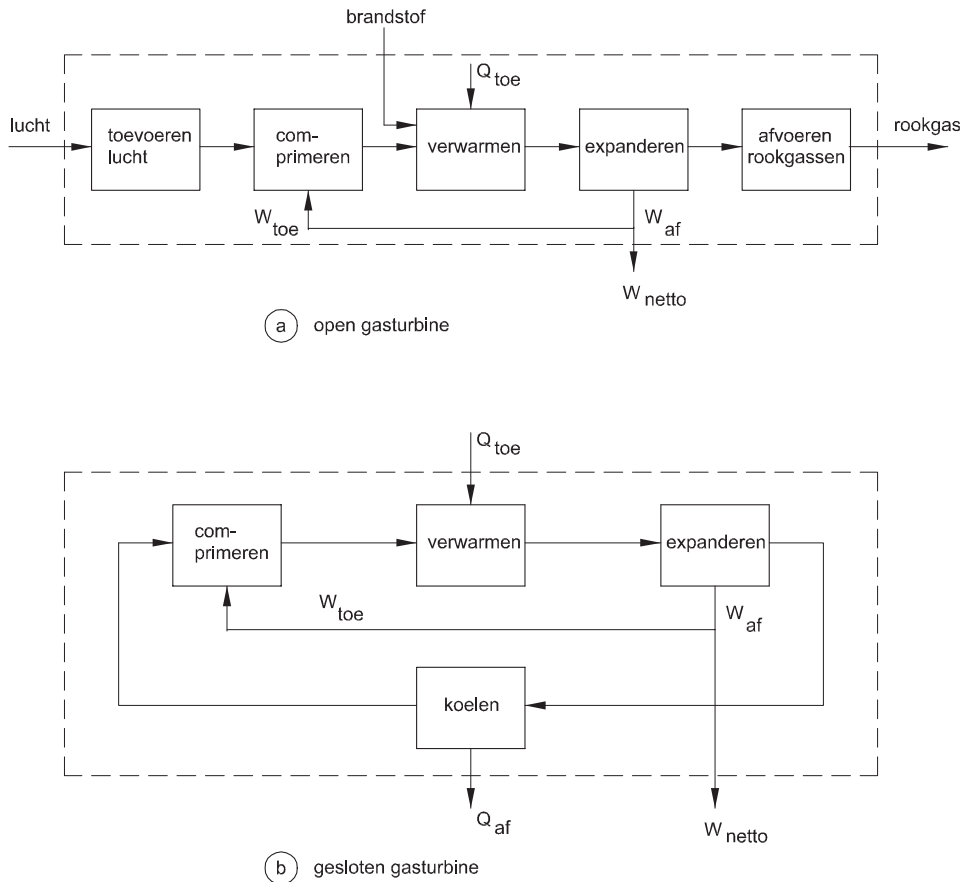


**Figuur 12.** Snelheidsdriehoeken in een turbinetrap.

#### 3.1 Principe van gasturbines

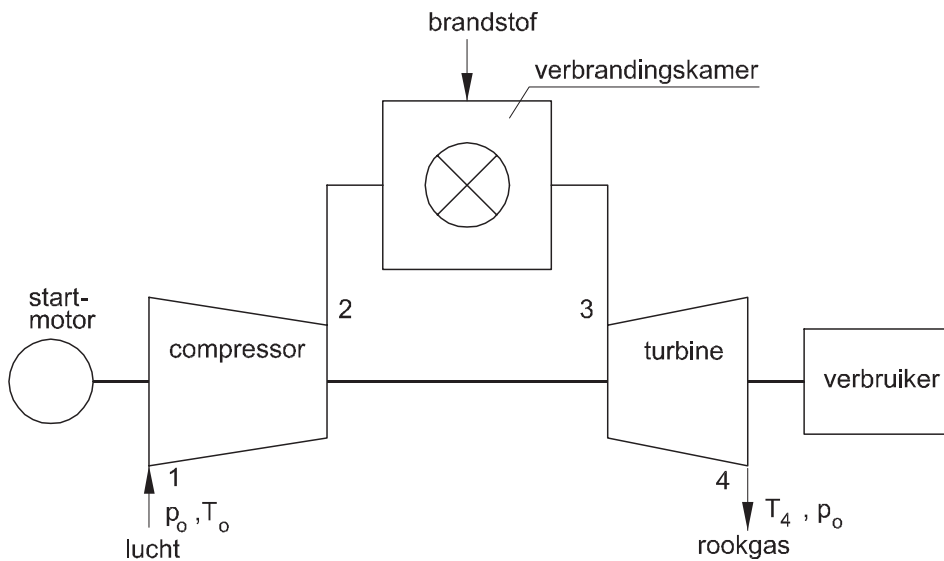
In principe bestaat een gasturbine uit twee delen. In een eerste deel wordt aan het medium een hoge energie-inhoud gegeven, meer bepaald een hoge druk en een hoge temperatuur. In het tweede deel, de eigenlijke turbine, wordt deze energie omgezet in arbeid ( $W_{\text{af}}$ ). De hoge energie-inhoud wordt gegeven door het medium (meestal lucht) in druk te verhogen met een

compressor (die aangedreven wordt door de turbine) en de temperatuur ervan op te drijven door de verbranding van een brandstof. De compressor verbruikt dus een deel  $W_{\text{toe}}$  van de door de turbine opgewekte arbeid, waardoor er voor de gebruiker nog slechts  $W_{\text{netto}}$  energie ter beschikking staat. De drager van de hoge energie is dus een gas (rookgas), vandaar de naam ‘gasturbine’. Het rookgas bestaat voor het grootste deel uit lucht en verder uit de producten die ontstaan bij de verbranding (hoofdzakelijk  $\text{CO}_2$ ). De rookgassen worden doorgaans afgevoerd na de arbeidslevering, en men spreekt van een ‘open gasturbine’. In sommige, eerder zeldzame gevallen wordt het arbeidsmedium na de arbeidslevering in de turbine teruggevoerd om het proces opnieuw te doorlopen (gesloten gasturbine). Figuur 13 toont het blokschema van een open en gesloten gasturbine.



**Figuur 13.** Blokschema van een gasturbinecyclus (a) open gasturbine, (b) gesloten gasturbine.

Het prinsipeschema van een open gasturbine wordt nogmaals weergegeven in Figuur 14. In tegenstelling met hetgeen in zuigermotoren gebeurt, lopen alle fasen tegelertijd elke fase echter op een andere locatie in het systeem. Aan de inlaat wordt koude lucht uit de omgeving aangezogen (punt 1). Deze lucht wordt met een turbocompressor samengeperst. Dan (punt 2) bedraagt de druk 6 tot 30 bar en de temperatuur 250 tot 500 °C. Vervolgens stroomt deze lucht door een ruimte (verbrandingskamer) waar branders er een hoeveelheid warmte aan toevoegen op constante druk (van 2 naar 3). Daar komt nog de massa van de brandstof bij, maar deze is gering. De gassen verlaten de verbrandingskamer op een druk van 6 tot 30 bar en een temperatuur van 900 tot 1300 °C (punt 3). Ze gaan naar een turbine, waar zij expanderen (van 3 naar 4). De eindcondities zijn de atmosferische druk en een temperatuur van 500 tot 600 °C. De uitlaat van de turbine (punt 4) staat in verbinding met de buitenlucht, op dezelfde druk als de aanzuiging, maar op een andere temperatuur. De beschreven cyclus is dus geen gesloten cyclus.

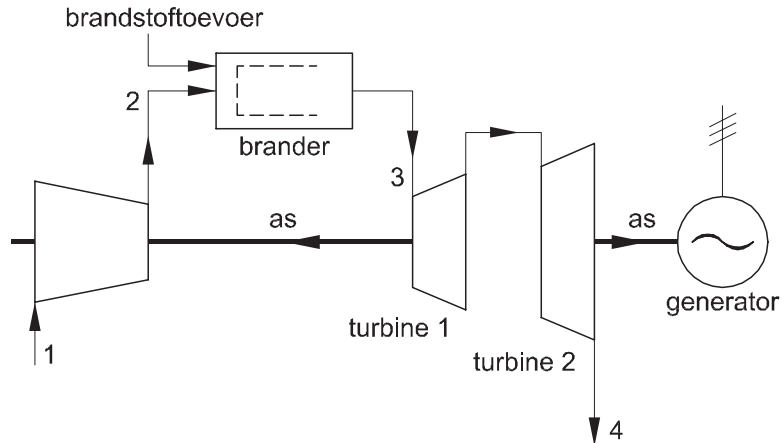


Figuur 14. Schematische voorstelling van een gasturbine.

Een gasturbine is dus nooit een alleenstaande turbine maar komt altijd voor in combinatie met een compressor en een reeks branders. Het vermogen om de compressor aan te drijven wordt geleverd door de turbine. Het netto beschikbaar vermogen is dus zoals eerder vermeld het vermogen dat de turbine produceert min het vermogen dat de compressor verbruikt.

### 3.2 Uitvoering en constructie van een gasturbine

In de gedaante die hierboven beschreven werd, staan de compressor en de turbine op eenzelfde as, zodat hun hoeksnelheid dezelfde is. Zoals aangegeven bij de behandeling van turbocompressoren moet deze zeer hoog liggen. Dit is dan ook de hoeksnelheid van de uitgaande as, en die past niet altijd voor de verbruiker (machine die moet aangedreven worden). Daarom worden sommige gasturbines met twee assen gebouwd. De compressor en een of twee trappen van de turbine zitten op één as. De overige trappen van de turbine en de aandrijving zitten op een tweede as, die helemaal onafhankelijk van de eerste draait. Het eerste deel, compressor plus eerste turbine, vormt dan een zogenaamde gasgenerator die hete gassen onder druk levert voor de turbine die erop volgt (Figuur 15).



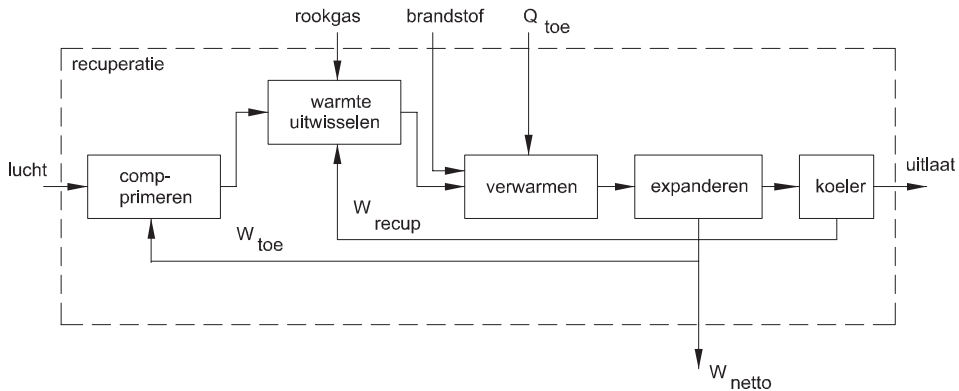
**Figuur 15.** Gasgenerator.

Er kunnen twee gasturbines voor elektriciteitsopwekking worden onderscheiden. Er bestaan machines van beperkt vermogen ( $< 100$  MW) die afgeleid zijn van vliegtuigmotoren, de aeroderivatieve machines. Machines van groot vermogen (tot 500 MW) werden ontwikkeld uit de ervaring die bestond met stoomturbines. Dit zijn de industriële gasturbines.

De industriële gasturbine is opgebouwd uit dezelfde basiscomponenten als hierboven beschreven. De uitvoering van de behuizing en de motor is zwaarder, omdat hier geen rekening moet worden gehouden met gewichtsbeparing. De machine is geoptimaliseerd voor werking bij lagere toerentalen en hoge vermogens. De verbrandingskamer is vaak extern geplaatst om zo een betere controle van de verbranding te bekomen. De compressieverhouding van industriële gasturbines is typisch 15, terwijl aeroderivatieve

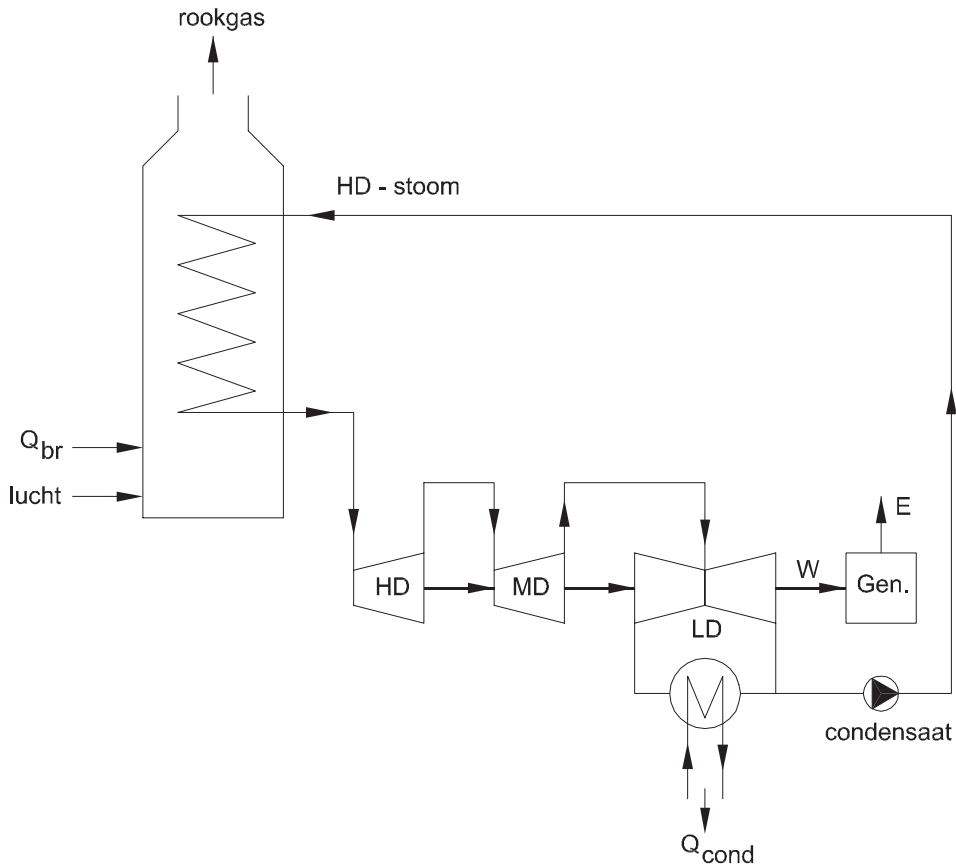
machines typisch een compressieverhouding 30 hebben. Industriële machines hebben verbrandingstemperaturen van maximaal 1200 °C, aeroderivatieve machines gaan tot 1400 °C.

De uitlaatgassen bevatten nog heel wat energie. Hun temperatuur bedraagt 500 tot 600 °C. Men kan een deel van deze warmte gebruiken door de uitlaat naar een warmtewisselaar te sturen waar de lucht die uit de compressor komt opgewarmd wordt vóór zij naar de verbrandingsruimte gaat (zie Figuur 16). Bij een drukverhouding van 10 of 12 in een niet-gekoelde compressor is de lucht echter reeds opgewarmd tot een temperatuur die niet ver beneden de uitlaattemperatuur van de turbine ligt, zodat de besparing die men hiermee doet niet zeer groot is.



**Figuur 16.** Warmterecuperatie bij gasturbines.

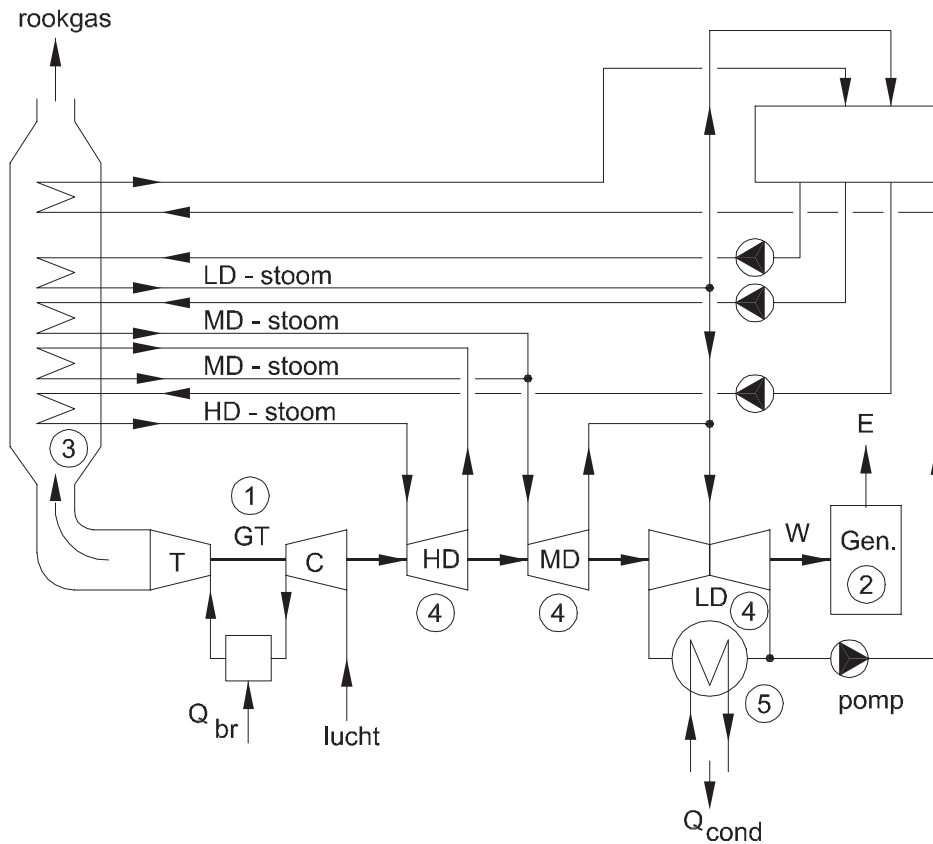
Een beter gebruik van de energie-inhoud van de uitlaatgassen bestaat erin deze te gebruiken om stoom te produceren en hiermee mechanische energie te leveren met een stoomturbine. Dit principe wordt gebruikt in de STEG-centrales (Stoom En Gas). Om dit type centrale uit te leggen, wordt eerst een klassieke thermische centrale beschreven (zie Figuur 17). In een verbrandingsketel (1) wordt een klassieke brandstof (gas, mazout, steenkool) verbrand wordt de warmte ervan gebruikt om stoom te produceren. De stoom brengt een aantal stoomturbines (2) aan het draaien die op hun beurt de elektrische generator (3) aandrijven. De stoom die de stoomturbine verlaat, wordt in de condensor (4) weer tot water omgezet. Hiervoor moet aan de stoom warmte worden onttrokken door een koelwatercircuit (5). Het opgewarmde koelwater wordt in een koeltoren afgekoeld. Het totale rendement van een dergelijke centrale bedraagt ongeveer 35%.



**Figuur 17.** Klassieke thermische centrale (1) verbrandingsketel, (2) stoomturbines, (3) elektrische generator, (4) condensor, (5) koelcircuit.

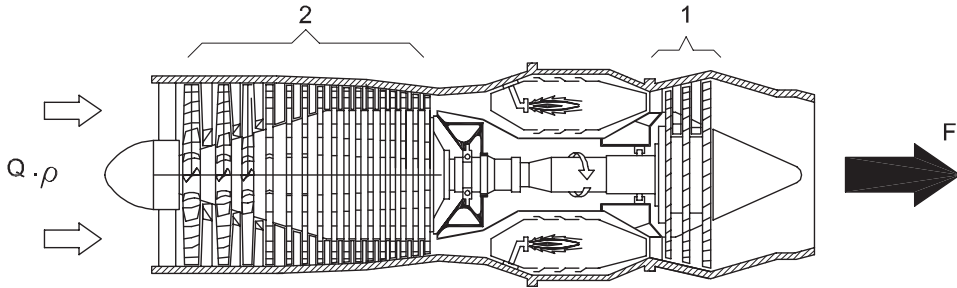
De werking van een STEG-centrale wordt weergegeven in Figuur 18. Een gasturbine (1) wordt gebruikt om de generator (2) aan te drijven. De rookgassen van de gasturbine bevatten nog warmte die in de warmtewisselaar (3) worden gebruikt om stoom te maken. Deze stoom voedt de stoomturbines (4), die eveneens de generator aandrijven. De afgewerkte stoom uit de turbine wordt in de condensor (5) weer in water omgezet. Als de gasturbine een rendement van 38% haalt, en de stoomturbines gebruiken nog 32% van de resterende 62%, dan haalt men een totaal rendement van 58%. Dit is hoger dan men met elk ander systeem kan bereiken. Als nadeel geldt voor de STEG-centrale dat alleen aardgas en lichte stookolie als brandstof kunnen worden gebruikt.





**Figuur 18.** STEG-centrale (1) gasturbinecombinatie, (2) elektrische generator, (3) warmtewisselaar, (4) stoomturbines, (5) condensor.

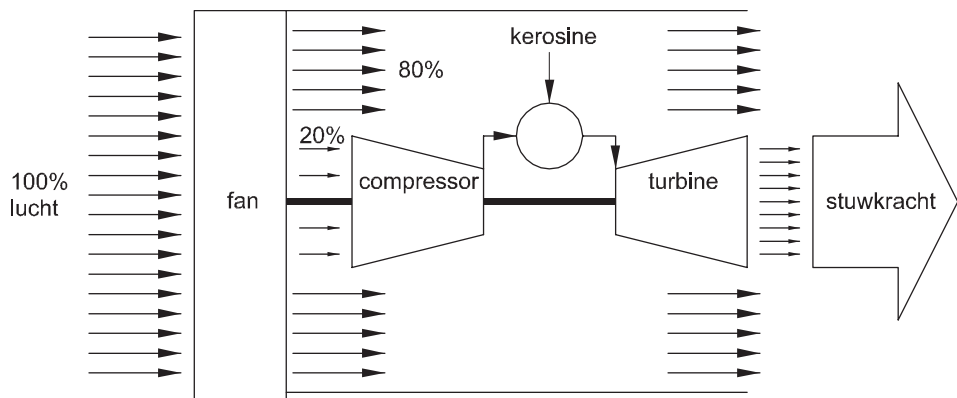
Figuur 19 toont een reactiemotor. De werking van een straalmotor onderscheidt zich van de industriële turbine omdat bij een straalmotor stuwkracht geleverd moet worden en er geen uitgaande as is. De turbine (1) drijft de compressor (2) aan. De rest van de energie die in de rookgassen zit, wordt niet gebruikt om asvermogen te leveren, maar om stuwkracht te genereren. Door de rookgassen met hoge snelheid uit de motor te blazen, ontstaat een reactiekracht die de motor naar voren duwt, vandaar de naam reactiemotor. Een massa  $m$  lucht, die eerst een snelheid nul had, en die de motor na een tijd  $\Delta t$  verlaat met een snelheid  $v$ , betekent een impuls  $mv = F \times \Delta t$ . Een massadebiet  $Q_p$  met een snelheid  $v$  betekent dus een achterwaartse kracht  $F = Q_p v$ , die door de motor op het gas uitgeoefend wordt, en een even grote voorwaarts kracht die door het gas op de motor uitgeoefend wordt. Dit type motor wordt bij straalvliegtuigen gebruikt.



**Figuur 19.** Reactiemotor (1) compressor, (2) turbine.

Figuur 20 toont schematisch een straalmotor die bij ‘traag vliegende’ vliegtuigen gebruikt wordt, weliswaar met een hoger rendement en een geringer brandstofverbruik dan de motor van Figuur 19. Bij deze ‘turbofan’ of ‘turboprop’ drijft de turbine een fan (propeller of ventilator) en de axiale compressor aan. De fan zuigt een hoeveelheid lucht aan waarvan slechts 20% door de compressor gaat. De overige 80% dient enkel voor de stuwkracht. De compressor is een axiale compressor omdat deze een groot debiet kan verwerken (voor kleine turbines worden ook radiale compressoren gebruikt). Aangezien de drukverhouding van een axiale compressor laag is, worden meerdere waaiers achter elkaar geplaatst.

In de turbine worden de hoge druk en temperatuur van de rookgassen omgezet in arbeid. Deze arbeid dient om de fan en de compressor aan te drijven. Verder stromen de rookgassen door een straalbuis die bijkomende stuwkracht levert.



**Figuur 20.** Turbofan.

### 3.3 Gebruik van gasturbines

Gasturbines worden gebouwd voor vermogens van 100 kW tot 500 MW. Gasturbines worden gebruikt waar een vrij groot vermogen vereist wordt, met een beperkte massa van de machine. De aandrijving van grote vliegtuigen gebeurt vandaag overwegend met turbopropaanrijving. Gasturbines worden ook gebruikt voor de aandrijving van schepen, hetzij als hoofdaandrijving, hetzij om bijkomend vermogen te leveren voor snelle vaart. De energie op booreilanden wordt vaak door gasturbines geleverd.

In elektrische centrales wordt vandaag het STEG-systeem toegepast, wegens het hoge rendement. Gasturbines worden ook gebruikt om piekvermogen te leveren. Talrijke bedrijven gebruiken co-generatie: een gasturbine drijft een elektrische generator aan en de warmte die in de uitlaatgassen zit, wordt als proceswarmte gebruikt om stoom te maken om te verwarmen, om te drogen enz.

De werking van kleine turbomachines is altijd ongunstig. Vandaar dat gasturbines niet gebruikt worden voor kleine vermogens. In voertuigen hebben gasturbines tot nu toe geen succes gekend. De vereiste vermogens kunnen met hoger rendement en minder lawaai geleverd worden door Ottomotoren of dieselmotoren. Gasturbines worden wel in zware voertuigen gebruikt: gevechtstanks en off-road vrachtwagens. Bij personenwagens is de zogenaamde hybride uitvoering een nieuwe evolutie. De gasturbine voedt batterijen op constante en dus optimale belasting. De aandrijving gebeurt door elektromotoren die op de wielen zijn geplaatst.

De voordelen van gasturbines, vergeleken met dieselmotoren, zijn hun compacte bouw en de afwezigheid van traagheidskrachten. De nadelen zijn het belangrijke lawaainiveau en het lagere rendement (vooral bij deellast).