

PIE RAPPORTENREEKS

32

KRACHTWERKTUIGEN

Wouter Heijveld

PIE-begeleider:

dr.E. Nijhof

SHT-begeleider:

dr. W.H.P.M. van Hooff

Nederlands Stoommachinemuseum:

J. Maret

Uitgave:

Stichting Projectbureau Industrieel Erfgoed

Zeist, 1997

INHOUDSOPGAVE

Inleiding	i
Hoofdstuk 1: Stoomkracht	
inleiding	1
1.1 Stoomketels	2
1.1.1 het vat	3
1.1.2 de stookinrichting en de vuurgangen	14
1.1.3 niet stoomproducerende warmtewisselaars	16
1.2 Stoommachines	18
1.2.1 het drijfwerk	19
1.2.1.1 directwerkende stoommachines	21
1.2.1.2 indirectwerkende stoommachines	21
1.2.1.2.1 kruishoofdmachines	22
1.2.1.2.2 trunkzuigermachines	24
1.2.1.2.3 meerlingen	26
1.2.2 de werking van de stoom	27
1.2.2.1 de stoomstroom	27
1.2.2.2 stoomwerking	28
1.2.2.3 stoomverdeling	30
1.2.2.3.1 kranen	31
1.2.2.3.2 schuiven	32
1.2.2.3.3 kleppen	32
1.3 Stoomturbines	34
Hoofdstuk 2: Interne verbrandingsmachines	
inleiding	42
2.1 Interne verbrandingsmotoren	42
2.1.1 het drijfwerk	45
2.1.2 de gasmotor	48
2.1.3 de petroleum-, spiritus- en benzinemotor	50
2.1.4 de dieselmotor	52
2.1.5 verbrandingscycli, inspuithethoden en spoelsyste- men	53
2.2 Gasturbines	57

Hoofdstuk 3: Elektriciteit

inleiding	59
3.1 Aandrijving en opwekkers	61
3.2 Elektriciteitsverbruikers	64
3.2.1 de gelijkstroommotor	65
3.2.2 de wisselstroommotor	67
 Conclusie	 74

Lijst van bijlagen

1 overzicht van in 1953 in gebruik zijnde stoomketels	77
2 typologische indeling voor stoomketels	78
3 ingevuld schema voor stoomketels	80
4 typologische indeling voor zuigerstoommachines	81
5 ingevuld schema voor zuigerstoommachines	82
6 typologische indeling voor stoomturbines	83
7 ingevuld schema voor stoomturbines	84
8 typologische indeling voor zuigermotoren	85
9 ingevuld schema voor zuigermotoren	86
10 typologische indeling voor gasturbines	87
11a primaire aandrijfmiddelen voor generatoren	88
11b typologische indeling voor elektromotoren	88
12 globaal overzicht hoofdindeling krachtbronnen	89

Verantwoording van gebruikte afbeeldingen	90
---	----

Lijst van gebruikte literatuur	92
--------------------------------	----

Inleiding

Inherent aan de industrialisatie is het gebruik van krachtwerktuigen. De arbeid die geleverd kon worden door mens, dier, wind, water en zon waren bij lange na niet voldoende om aan de groeiende energiebehoefte van een zich industrialiserende natie tegemoet te komen. Middelen werden bedacht, ontworpen en vervaardigd om aan de toenemende energievraag - voor het aandrijven van produktiemachines en de verlichting en verwarming van de gebouwen - te voldoen.

Dit werkstuk is een onderzoek naar de aard en werking van deze middelen om uiteindelijk tot een indeling of classificatie te komen. Er zal niet worden ingegaan op de toepassingen van de verschillende krachtbronnen binnen de industriële branches. De uiteindelijke typeordening van de verschillende krachtwerktuigen kan vervolgens gebruikt worden om de (nog) bestaande krachtbronnen te beschrijven en - samen met tal van andere overwegingen - mee te helpen een verantwoorde selectie te maken uit de nog in Nederland aanwezig zijnde krachtbronnen.

De ordening is tot stand gekomen door uit te gaan van de karakteristieken van de machine zelf. Criteria als kostprijs, herkomst, fabrikaat, bedrijfszekerheid, geschiktheid voor een bepaalde bedrijfsvoering, enzovoort, die voor een ondernemer van wezenlijk belang kunnen zijn om een werktuig aan te schaffen, worden in deze indeling niet gehanteerd. Wel zullen waar mogelijk en zinvol deze kenmerken besproken worden.

In het navolgende wordt allereerst iets gezegd over de randvoorwaarden en ideeën die ten grondslag liggen aan de verdere uitwerking van het onderzoek. De daarop volgende hoofdstukken geven ieder een uitwerking van de hoofdgroepen waarin de krachtwerktuigen verdeeld kunnen worden. Ieder hoofdstuk bevat een korte historische inleiding, gevolgd door een overzicht van de (hoofd- en sub-)kenmerken en de werkingsprincipes. Ieder hoofdstuk wordt afgerond met een deelconclusie die betrekking heeft op het krachtwerktuig dat daarin beschreven is. Een afsluitende conclusie geeft een beknopte opsomming van de hoofdcriteria van de hier behandelde krachtbronnen.

Uitgangspunten.

Aangezien krachtwerktuigen in nagenoeg alle economische branches voorkomen, lijkt het mij zinvol om te bepalen wat er in deze studie onder krachtbron of krachtwerktuig wordt verstaan. In de eerste plaats betreft het alleen de machines die aan een locatie gebonden waren: de stationaire machines. Hiermee vallen krachtbronnen geplaatst in vervoermiddelen (schepen, auto's, vliegtuigen, treinen, trams, etc.) en in transportmiddelen (kranen, liften, transporteurs, enzovoort) af en 'locomobiles' als behandelde krachtbronnen af. Zeker voor de laatste groep kan dit een gemis zijn. Het is tot op heden nog niet bekend hoe groot de toepassing van dit soort krachtbronnen als stationaire machines is geweest. Qua werkingsprincipe verschillen deze machines echter niet veel van de (zuiver) stationaire krachtbronnen, maar in hun uitvoering treden vaak grote verschillen op.

Een tweede beperking is, dat er alleen is gekeken naar krachtbronnen waar een thermodynamisch principe aan ten grondslag ligt. Of met andere woorden: dat er in de machines een wisselwerking tussen warmte en kracht plaats heeft. Hiermee vallen windmolens, waterkrachtinstallaties en arbeid verricht door spierkracht eveneens af.

Uit bovenstaande zou kunnen blijken dat het gebruik van elektriciteit ook niet binnen het te onderzoeken terrein valt. Terecht kan het gezien worden als een compleet andere vorm van energievoorziening. Echter, er is een aantal factoren waardoor ik van mening ben om deze energievorm, als aparte hoofdcategorie, toch in de studie op te nemen.

Ten eerste kwam (en komt) het veelvuldig voor dat bedrijven zelf in deze energievorm opwekten. Hiertoe waren installaties voorhanden die als eenheid geproduceerd werden (b.v. turbo-generatoren). Tevens acht ik het plausibel dat in bedrijven naast de aandrijving van de arbeidsmachines ook (elektrische) generatoren aangedreven werden voor verlichtings- en verwarmingsdoeleinden. Verder is het zo dat door de verspreiding van het hoogspanningsnet veel bedrijven hun totale energiebehoefte gingen onttrekken aan dit elektriciteitsnet. Een typologisch overzicht van de energievoorziening in het bedrijfsleven met behulp van krachtwerktuigen zou zonder elektriciteit niet volledig zijn.

Een analyse van de literatuur laat zien dat de algemeen gehanteerde indeling van krachtbronnen er een naar werkingsprincipe is. Dit kan ook gezien worden als een indeling naar de ontstaansgeschiedenis van de machines. Deze hoofdindeling is essentieel omdat de werkingsprincipes van deze groepen onderling niet kunnen worden herleid.

De drie hoofdgroepen zijn:

- stoomkracht
- interne verbrandingsmachines
- elektriciteit

Om uiteindelijk tot een vergelijkbare indeling te komen worden er vier aspecten (hoofdcriteria) gehanteerd. Het eerste aspect is het uiterlijk van de machine (liggend, staand, etc.). Het tweede aspect is het werkingsprincipe: dit zal uiteenvallen in een mechanisch deel (drijfwerk) en in een procestechnisch deel. Het derde aspect benoemt en behandelt de verschillende uitvoeringen van de machine (vaak zal dit gekoppeld zijn met een specifiek aan een ontwerper verbonden type). Ten laatste worden - waar nodig - de bijzonderheden en niet direct tot de machine behorende toebehoren (appendages) beschreven. Dit laatste is meer voor de volledigheid - het type verandert er niet door, maar wel noodzakelijk wanneer men de machine in zijn context wilt leren kennen.

Inleiding

De geschiedenis van de Industriële Revolutie heeft nauwe banden met de geschiedenis van de stoomkracht. Wanneer de stoomkracht ter sprake komt, gaat het vooral over de toepassing en het gebruik van de stoommachine is brede zin. Het is de drijvende kracht achter de machines en apparaten in de textiel, nijverheid, scheepsbouw, landontginningen en polderbemalingen. Stoomkracht is in deze context vaak het aantal paardenkrachten dat de stoommachine leverde, zonder duidelijk uiteen te zetten welke machines het betrof en dankzij welke principes de machines werkten. De stoomketel wordt hierbij zelfs zelden genoemd of slechts terzijde behandeld. Lukt het de meeste auteurs nog de stoommachine te prijzen, de stoomketel krijgt zeker niet altijd de waardering die deze als energiebron zou moeten krijgen. Richard Hills wijdt in zijn studie over de ontwikkeling van de stoomkracht een enkel hoofdstuk aan de stoomketel met de veelzeggende titel: "Good servants but bad masters"¹.

H.W. Lintsen schetst in het hoofdstuk over stoom in deel vier van *"De geschiedenis van de techniek in Nederland"* in minder dan een pagina de geschiedenis van de stoomketel van 1725 tot 1890, voor de stoommachine heeft hij ongeveer negentien pagina's nodig. Ook de Duitser Conrad Matschoß besteedt in zijn monumentale - meer dan 1500 pagina's tellende - studie uit 1908 naar de verbreiding en ontwikkeling van stoomkracht naar verhouding zeer weinig aandacht aan de stoomgenerator.² Matschoß is hierin nog een zeer positieve uitzondering. Vaak wordt min of meer alleen de stoommachine in zijn volledigheid behandeld, maar komt de stoomketel nauwelijks aan bod. Dit tekort met betrekking tot de stoomketel in

¹ R.L. Hills, *Power from steam. A history of the stationary steam engine* (Cambridge 1989), 120 e.v.

² Conrad Matschoß, *Die Entwicklung der Dampfmaschine*, twee delen (facsimile uitgave, Düsseldorf 1987).

de Nederlandse geschiedschrijving komt ook naar voren in de meer economisch georiënteerde onderzoeken van bijvoorbeeld I.J. Brugmans en J.A. de Jonge.³ Voor beide lijkt stoomkracht - wederom - synoniem te zijn voor de stoommachine. In dit hoofdstuk zal eerst de typologie van de stoomketel aan bod komen. Vervolgens zal hetzelfde gedaan worden met de zuigerstoommachine en de stoomturbine.

1.1. Stoomketels

Het gebrek aan een gedegen studie naar de ontwikkeling van de stoomketel is echter in het kader van dit onderzoek vervelend, maar niet rampzalig. De bestaande - voornamelijk buitenlandse - geschriften geven voldoende aanknopingspunten om tot een indeling te kunnen komen. De exacte dateringen van de toepassing van de verschillende ketels in Nederland zijn tot op heden nog niet bekend. Verder onderzoek is hiervoor nodig. Onderstaand zal dan ook slechts de grote lijn geschetst kunnen worden.

Zoals met alle werktuigen het geval is, heeft een stoomketel enkele kenmerken waardoor hij zich onderscheidt van andere werktuigkundige constructies. Gustaaf Pipijn ontleedde de ketel in vier delen, bestaande uit het vat, het fornuis, de rook of vuurgangen en de schouw.⁴

De indeling van Pipijn doet wel erg ouderwets aan en zal hier niet dienen als indelingsstramien voor de stoomketel. Toch noemt hij wel een paar nuttige categorieën. Ik heb er drie uitgehaald om de eerste indeling te kunnen maken. Ten eerste is er de waterhouder, het vat, waarin ook de stoom geproduceerd wordt. Ten tweede is er de stookinrichting, het fornuis, waar de brandstof verbrand wordt - onder toevoer van lucht. De warmte van de verbrandingsgassen verwarmen vervolgens het vat en eventueel enkele andere warmtewisselaars. Dit laatste is het derde onderdeel. Alle drie de delen maken in de

³ I.J. Brugmans, *Paardenkracht en mensenmacht* ('s Gravenhage 1961) en J.A. de Jonge, *De industrialisatie in Nederland tussen 1850 en 1914* (SUN reprint, Nijmegen 1976).

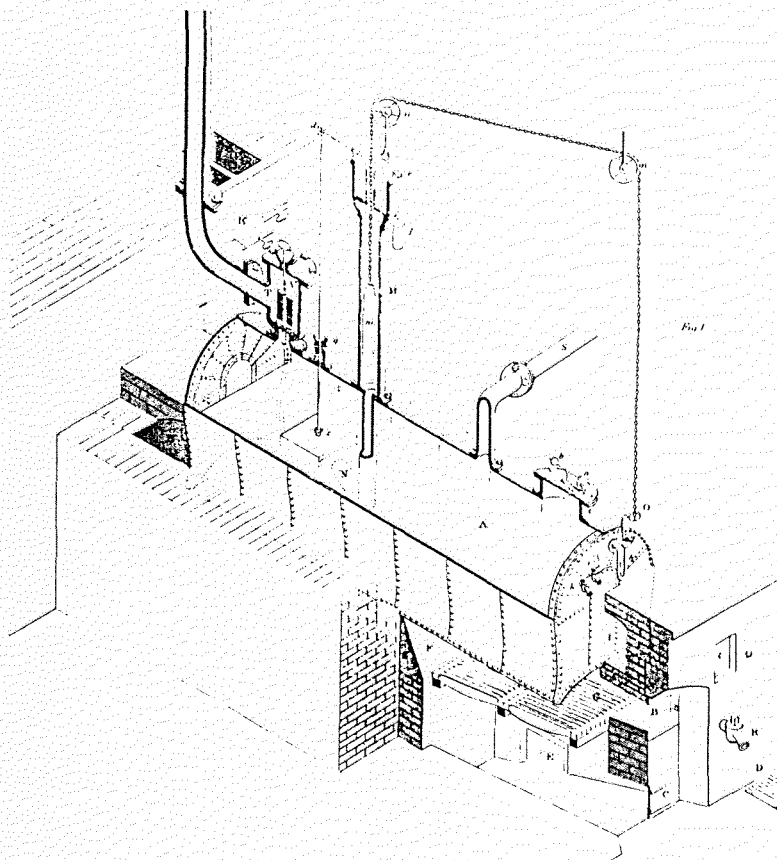
⁴ G. Pipijn, *Leerboek der werktuigkunde, stoomketels en stoommachines, met practisch onderricht over het vervaardigen en behandelen der grote stoomtuigen, alsmede de volledige verklaring en afbeelding der nieuwere stoommachines* (Gent 1876), 333.

loop der tijd een evolutie door. Aan de hand van de historische ontwikkeling van de stoomketel zal ik per onderdeel trachten tot criteria te komen om stoomketels te kunnen indelen.

1.1.1. het vat

Bij de vroegste stoomketels waren de verschillende onderdelen grotendeels van elkaar gescheiden. Toch zijn de principes van de hoofdtypen al rond 1800 grotendeels bekend.

De ketels die James Watt rond 1790 gebruikte om zijn machines van stoom te voorzien waren min of meer rechthoekige vaten, de zogenaamde wagonketels. De eerste uitvoeringen hadden rechte wanden. Later werden de ketels uitgevoerd met naar binnen toe ronde wanden, zowel aan de lange zijden als in de bodem. Het vuur - dat zich



Afbeelding 1 doorsnede van een wagonketel.

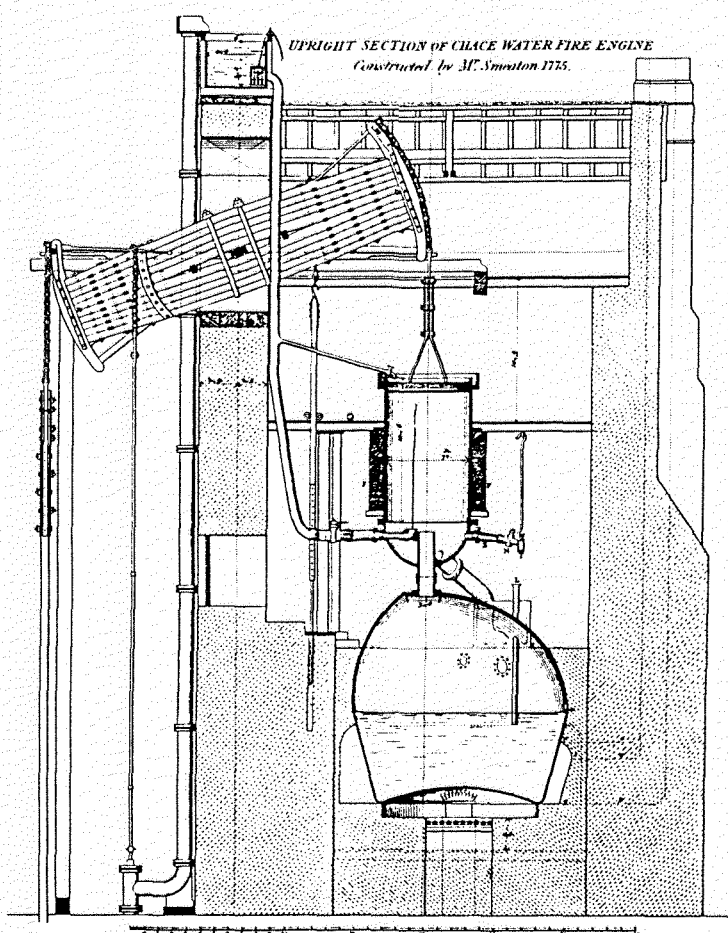
bevond - verwarmde eerst de onderzijde van het vat. De gassen gingen daarna langs het vat omhoog, waarbij ze de zijkanten verwarmde.⁵ Andere, vanaf ongeveer 1770 in Engeland gebruikte ketels hadden een ei-vorm of waren ovaal en hadden een concave bodem. Ze werden eveneens van onderen gestookt, met hout of

⁵ C. Matschoß, *Die Entwicklung der Dampfmaschine*, deel 1 (facsimile uitgave, Düsseldorf 1986) 598.

kolen. Het materiaal van het vat was meestal lood, koper of gietijzer.⁶ De ketels produceerden stoom met maar een zeer geringe overdruk.

In 1797 werd, volgens Brugmans, in Nederland de eerste stoommachine geplaatst door de industrieel Lucas Boon, voor het bewegen van molenstenen en pompen bij een branderij in Rotterdam.⁷ Hij vermeldt weliswaar niet dat er ook een ketel bij was, maar dit moet wel het geval zijn geweest. Het is dan ook niet uitgesloten dat de ketel een van de twee de bovengeschetste uitvoeringen had. Vóór deze toepassing waren er in Nederland al minder geslaagde proefnemingen geweest in het gebruik van stoomkracht. Een voorbeeld is de plaatsing van een Newcomen-machine en ketel die in 1776 bedrijfsklaar waren om de Rotterdamse grachten van vers water te voorzien en te bemalen. Van deze installatie is globaal bekend hoe de ketel er uitzag. "De ronde, staande stoomketel was van ijzer, had op de bodem een middellijn van 4,87 m en een hoogte van 3,35 m."⁸

Net zoals de zojuist genoemde ronde, staande ij-



Afbeelding 2 Smeaton balansmachine met ovale stoomketel.

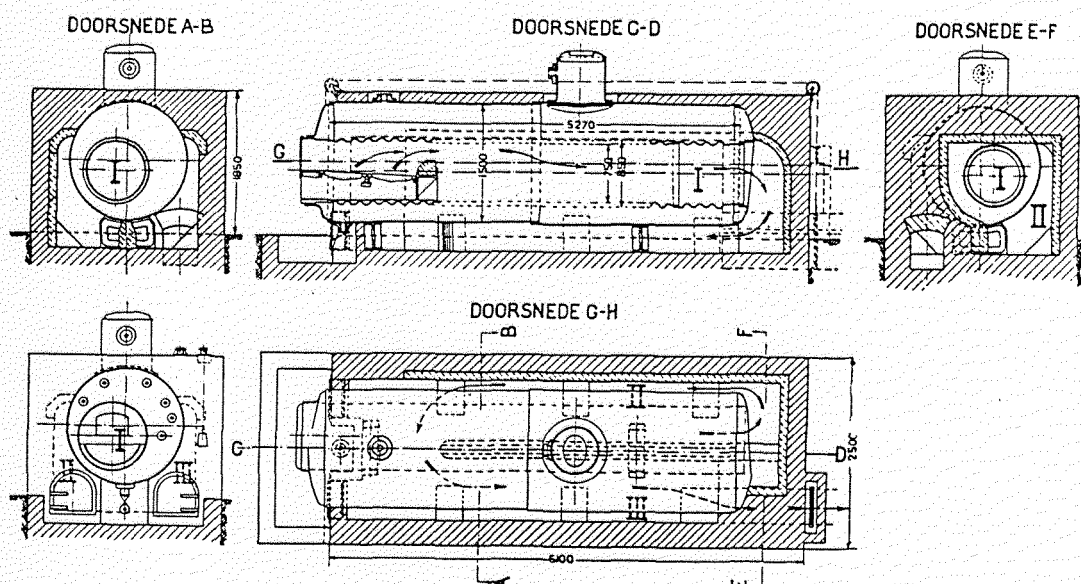
⁶ Matschoß, *Die Entwicklung I*, 594-596.

⁷ I.J. Brugmans, *Paardenkracht*, 47.

⁸ H.W. Lintsen, 'Stoom in ontwikkeling', *Geschiedenis van de techniek in Nederland*, IV (Zutphen 1993) 115.

zeren stoomketel, maakten de vorm van de ovale en wagonketel en het materiaal dat deze niet gebruikt konden worden voor hogere drukken. Om hogere drukken te bereiken experimenteerden al voor 1800 enkele ketelbouwers, als eerste de Amerikaan Oliver Evans rond 1786 met cilindervormige ketels.⁹ De ketel van Evans werd gestookt in een buis die door de ketel heen lag. Hiermee was het een zeer vroege versie van de later populaire Cornwall-ketel.

Oliver Evans wist in 1804 stoomdrukken van 150 pounds per square inch (p.s.i.), wat ongeveer overeenkomt met 10 bar, te bereiken. In Engeland kreeg Ralph Dodd in 1806 een patent op



Afbeelding 3 Doorsnede en aanzichten van een Cornwallketel.

een cilindrische ketel.¹⁰

De Cornwall-ketel dankt zijn naam aan het gebied waar het zijn oorsprong vond: de Dolcoath mijn in Cornwall. Richard Trevithick wordt gezien als de geestelijke vader van deze ketel. Hij bouwde in 1811 twee cilindervormige ketels met vlakke einden. Door het midden liep de stookbuis waar de gassen door heen stroomden. Een stookplaats lag aan één zijde van deze buis. De gassen werden aan de andere zijde afgevoerd.

⁹ Matschoß, *Die Entwicklung I*, 605.

¹⁰ R.L. Hills, *Power from steam*, 127-129.

Deze ketels van Trevithick waren ongeveer 90 cm in diameter en 12,2 meter lang. De maximale werkdruk lag rond de 7 bar. Door de slechte materialen en de slechte fabricage blies de ketel water en stoom uit al zijn poriën.¹¹

De uitvoering en vormgeving van de Cornwall-ketel en andere vroege stoomketels leidt naar het eerste spoor waarop een ketel kan worden ingedeeld, namelijk naar de grootte van het watervat. Deze ketels worden grootwaterruimtketels of tankketels genoemd. Het vuur van deze ketels kon onder of in de tank liggen, de zogenaamde ondervuren en stookbuizen, stookhuizen of vuurgangen.

Een tweede spoor met betrekking tot de uitvoering van een stoomketel begon in 1815, eveneens in Engeland. Toen bouwde de reeds genoemde Richard Trevithick een ketel waar het stoomvormende water niet in een grote ruimte gevat was, maar in pijpen waar de rookgassen langsstroomden. Hoe de constructie exact is geweest heb ik niet kunnen achterhalen. Het waren in totaal negen pijpen die direct in de schoorsteen gehangen waren. Iedere pijp was 914 mm breed en ongeveer 2,4 meter lang.¹²

In Duitsland experimenteerde vanaf 1815 de (oog)arts Ernst Alban eveneens met waterpijpen. Hij deed dit ten eerste om de bedrijfsveiligheid van de bestaande ketels te verhogen. Zijn eerste ketel bestond uit een aantal pijpen van kleine diameter, die van onderen gesloten waren en die in een gietijzeren kast naar beneden hingen. In die kast werden ze door een vloeibaar metaalmengsel (lood en tin) warm gehouden; dit mengsel werd op zijn beurt door het vuur verhit. Deze ketel was bestand tegen drukken van 50 tot 60 atmosfeer. Het kwam echter niet tot algemene toepassing. Rond 1840 fabriceerde hij een staande ketel met enkele grotere waterpijpen voor machines met ongeveer 10 pk vermogen.¹³ Het zou echter tot het einde van de negentiende eeuw duren voordat de waterpijpketel echt volwassen werd.

¹¹ Matschoß, *Die Entwicklung*, I, 606.

¹² idem, 607.

¹³ idem, 612.

Een derde spoor waarop zich de ontwikkeling van de ketel in de beginfase afspeelt is letterlijk het spoor: het zijn ketels die bedacht en ontworpen werden voor lokomotieven.

Ongeveer gelijktijdig met de uitvinding van de waterpijpketel, kreeg als eerste James Neville in 1826 een patent op een uitvinding waarbij de hete verbrandingsgassen door een groot aantal kleinere pijpen stroomden: de zogenaamde vlampijpen. Op het Europese Continent, met name Frankrijk, was het Marc Séguin die de ketel van een Stephenson-lokomotief verbeterde door er vlampijpen in toe te passen.¹⁴

Matschoß ziet in deze verandering niet echt een grote stap. Volgens hem "stellen sie [*de vlampijpen, wh*] im Grunde nichts anderes vor, als eine Auflösung des Trevithickschen Flammrohrs in eine grosse Anzahl dünner Röhren."¹⁵ Toch waren de eigenschappen van een ketel uitgevoerd met deze pijpen een stuk beter.

Om tot de eerste indelingscriteria te komen, kunnen we de geschiedenis van de stoomketel hier even stoppen.

Het eerste criterium dat achterhaald kan worden, heeft betrekking op de hoeveelheid water die in verhouding met de stoomproduktie in het stoomvormende deel van het vat of ketel aanwezig is. Is deze verhouding groot (d.w.z. veel water m.b.t. de stoomproduktie), dan spreekt men van een grootwater-ruimketel of van een tankketel.¹⁶ Is deze verhouding klein dan spreekt men van kleinwaterruimketels.¹⁷

De Cornwall-ketel is een dergelijke grootwaterruimketel. De waterpijpketel van Alban is in potentie een kleinwaterruimketel.

¹⁴ idem, 829-830.

¹⁵ idem, 616-617.

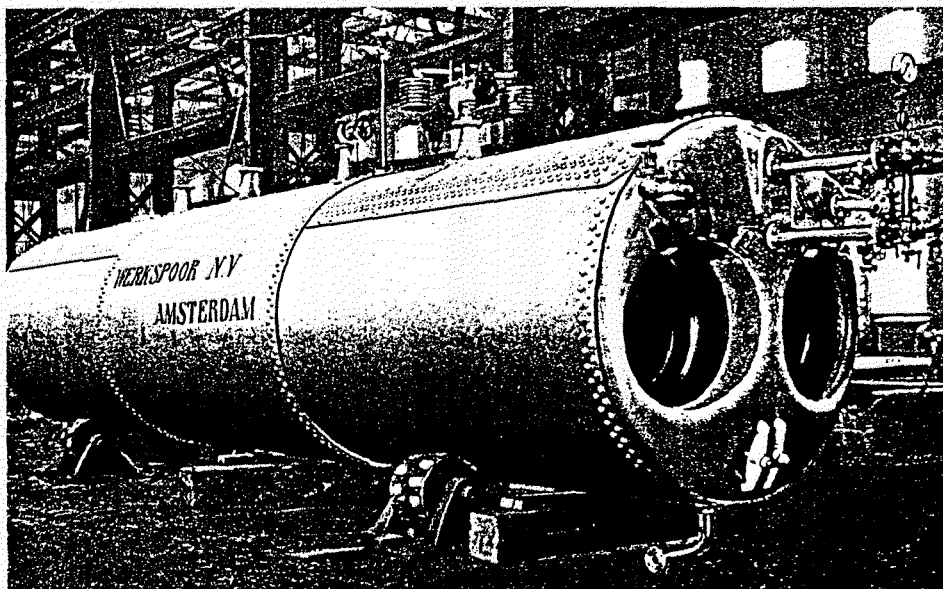
¹⁶ *Stoom, handleiding voor het stoombedrijf* (4^e druk, Deventer 1941), 95-96 en D.J. Boks en L.H. van der Deijl, 'Stoomketels' in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie*, deel M (5^e geheel gewijzigde druk, Deventer 1950), 179.

¹⁷ Uit de tabel in *Stoom*, 155 valt te herleiden dat tankketels een watervolume hebben van ongeveer 7,8 liter water per kg/uur stoomproduktie. Bij kleinwaterruimketels ligt deze verhouding rond of net onder de 1 kg/uur.

Het tweede indelingscriterium is naar de wijze waarop de verbrandingsgassen het water opwarmen. Zoals uit het bovenstaande blijkt, kan dit op vier manieren gebeuren:

- geheel door *uitwendige verwarming* van een gesloten ketel: de ei-vormige, ovale of wagonketel.
- met een *stookbuis of vuurgang* in de ketel: hierbij ontstaan en gaan de hete verbrandingsgassen door een grote buis, het rookkanaal.
- met *waterpijpen*, waarbij de gassen om de buitenzijde van een groot aantal pijpen gaan. In deze pijpen staat het stoomvormende water.
- met *vlampijpen*, waarbij de gasstroom door het inwendige van een groot aantal kleinere pijpen voert.

In de loop der tijd ontwikkelde zich uit bovengeschetste 'basistypen' allerlei hybride varianten die steeds als doel hadden de goede eigenschappen van de verschillende typen te combineren. Zo ontwikkelde Werkspoor in de jaren dertig van de twintigste eeuw een keteltype die de vuurgang-vlampijp-waterpijp ketel werd genoemd.¹⁸



Afbeelding 4 Een door Werkspoor gebouwde Lancashireketel opgesteld in de ketelmakerij. Opvallend zijn de twee vuurgangen waarmee de ketel gestookt wordt.

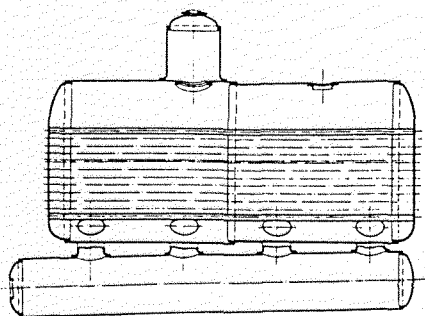
De ontwikkeling van de ketel - dat wil zeggen van het vat of waterhouder - stagneerde na 1830. Principieel nieuwe ontwerpen boden zich niet aan. In Engeland was het

¹⁸ Werkspoor 1827-1952. Gedenkboek uitgegeven ter gelegenheid van het honderd vijf en twintig jarig bestaan op 9 februari 1952 (Amsterdam z.j.), 102.

vooral de Cornwallketel die op grote schaal toegepast werd in landinstallaties. Een verbetering en uitbreiding hierop maakte de engelsman Fairbairn in de jaren '40 van de negentiende eeuw. Hij ontwierp een type Cornwallketel met twee parallelle stookbuizen, de zogenaamde Lancashireketel. Deze werd volgens Hills: "the most usual type in cotton mills from roughly the 1850s until the final abandonment of steampower."¹⁹

Op het Continent doet zich een iets andere ontwikkeling voor. Niet exact bekend is of Nederland een Engelse of een Continentale ontwikkeling doormaakt. Maar met name in Frankrijk, België en Duitsland en Zuidnederland kwam de bouilleurketel sterk op. Deze "cilindervormige ketels zijn het meest in gebruik en kunnen zowel voor hoge als lage drukking aangewend worden. Men heeft er met twee of drie kookbuizen of kanonnen", aldus Gustaaf Pipijn in 1876.²⁰ Deze ketels werden nog veel gestookt met een vuur onder de waterhouder. Tevens waren tussen de waterhouder en het vuur kookbuizen aangebracht, die met twee of drie tussenpijpen aan de waterhouder verbonden werden. Het geheel was met bakstenen ingemetseld, zoals gebruikelijk voor alle ketels in die tijd. Verder werden er volgens Pipijn nog "cilindervormige ketels met binnenvuurgangen [Cornwall-ketels; wh], tubulaire [vlampijpketels; wh] of pijpketels [waterpijpketels; wh], wagenvormige ketels, enz. enz." toegepast.²¹

Pas rond de laatste eeuwwisseling kwam een snelle ontwikkeling op gang komt in de fabricage van waterpijpketels. De midden negentiende eeuwse versies groeiden uit tot uitvoeringen die in staat om hoge stoomdrukken en grote hoeveelheden (oververhitte) stoom te produceren. Met name door de ontwikkeling van de stoomturbine aan het eind van negentiende eeuw ont-



Afbeelding 5 Schematische voorstelling van een bouilleurketel. De buizen onder de grote tank zijn de zogenaamde 'bouilleurs'.

¹⁹ Hills, *Power from steam*, 120.

²⁰ Pipijn, *Leerboek*, 334.

²¹ *ibidem*.

stond hieraan een toenemende behoefte. Twee succesvolle typen waterpijpketels zijn de Yarrowketel en de (B&W) sectie ketel. Nederland was geen koploper bij de ontwikkeling van deze ketels. Rond 1896 werd in Groot-Brittannië de Yarrow waterpijpketel in gebruik genomen. Bij Werkspoor in Amsterdam, begon met pas in 1908 met de fabricage van deze ketel.²²

In het gedenkboek Werkspoor is te lezen hoe de eerste Werkspoor Yarrow-landketel van 1908 er uitzag: "Dit [Yarrow; wh] keteltype bestond uit twee watertrommels en een daar midden boven liggende stoomtrommel, verbonden door twee bundels waterpijpen volgens de beide schuine zijden van een staande gelijkbenige driehoek. Daar van landketels nog geen eigen ervaring beschikbaar was, verzekerde men zich van het uitvoeringsrecht van een bekend buitenlandse fabriek, namelijk Steinmüller."²³ Tussen de schuin opgestelde pijpenbundels en de waterhouders lag de vuurhaard.

Wat ook van belang is voor een verdere typologie is dat bij deze ketel de hoofdbundels steil hellend geplaatst waren.

Eveneens in 1908 werden door de ketelbouwer Stork de eerste waterpijpketels gebouwd. Deze ketels waren oorspronkelijk van het fabriekaat Babcock en Wilcox.²⁴ Deze zogenaamde sectie ketels hadden een stoomvormende flauw hellende bundel waterpijpen in de vuurhaard hangen. Daarboven lag de stoom/waterhouder. Van 1908 tot 1948 plaatste Stork in totaal 1.107 dergelijke ketels. Hiervan waren er 131 bestemd voor schepen, 359 voor overzeese gebiedsdelen en de rest (617 stuks) voor landinstallaties in Nederland, bijna 56% van het totaal aantal ketels.²⁵

Bij alle bovenbeschreven ketels vindt de doorstroming van het water en de scheiding van het water en de stoom plaats op "natuurlijke" wijze: dat is door het natuurlijke verschil in

²² Werkspoor 1827-1952, 98.

²³ idem, 98-99.

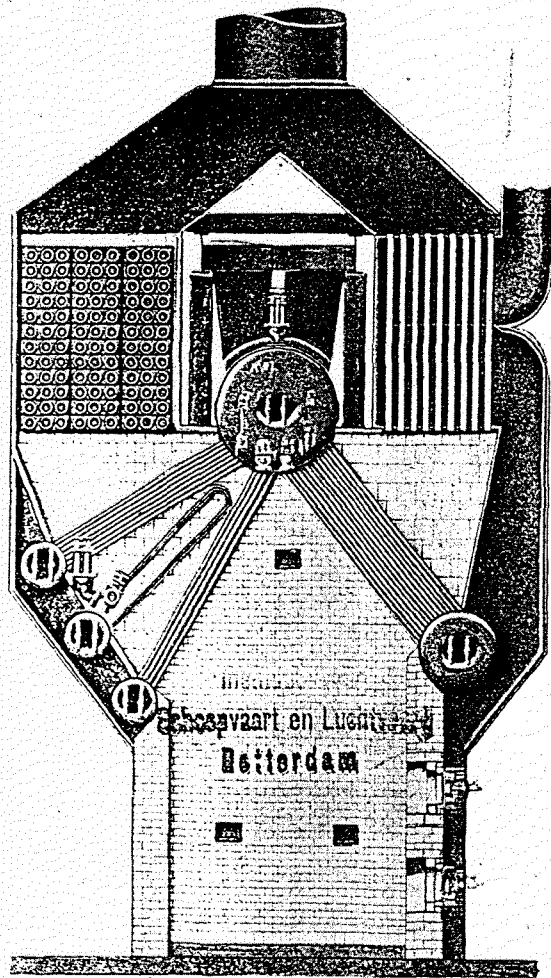
²⁴ Tachtig jaar Stork, 116-117.

²⁵ idem, statistiek van geplaatste Stork-B&W ketels.

soortelijk gewicht tussen water en stoom. Wanneer echter de drukken in de ketel toenemen, wordt dit verschil kleiner en kunnen problemen ontstaan met de rondgang (circulatie) van het water in de pijpen. Lokale oververhitting kan dan het gevolg zijn. Om dit probleem op te vangen kwamen in de jaren twintig en dertig van deze eeuw ketels tot stand met een gedwongen circulatie.²⁶

De geforceerde rondgang van het water door de pijpen (dit type ketels zijn altijd waterpijpketels) kan op twee manieren gebeuren. Eén ervan is dat het voedingwater door een pijpenbundel (economiser) de stoomwaterhouder in geperst wordt. Aan de onderzijde

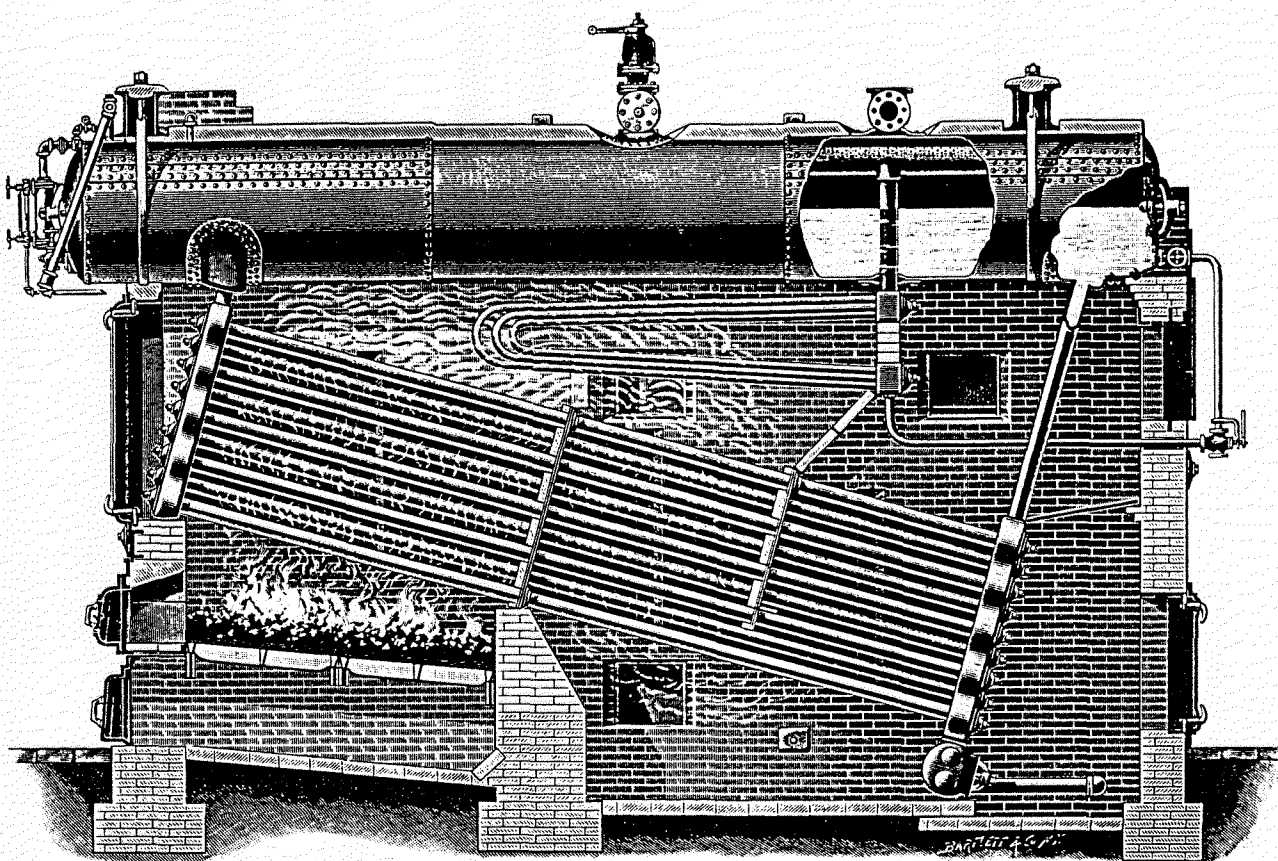
van dit vat wordt het water aangezogen door een circulatiepomp. De perszijde van de pomp brengt het water via de hoofdbundel in de vuurhaard wederom naar de stoomwaterhouder. De gevormde stoom wordt hier vandaan door een oververhitter geleid naar de verbruiksmachines. Dit type ketel is een rondpompketel (of La-Mont ketel).²⁷ Een ander type met gedwongen circulatie is de doorpomp- of doorstroomketel. Dergelijke ketels hebben geen stoomwaterhouder. Al het water wordt door de voedingpomp in een pijp gebracht waarin het



Afbeelding 6 Yarrow-landketel. Duidelijk is de driehoekige vorm te zien die de verschillende waterhouders en pijpen bundels met elkaar maken. Links en rechts van de grootste stoom-waterhouder zijn de bundels van de economiser en de luchtvoorwarmer te zien.

²⁶ Stoom, 135.

²⁷ De technische vraagbaak, deel M, 199 en Stoom, 135-139.



Afbeelding 7 Aanzicht in de vuurhaard van een Babcock & Wilcox sectieketel. Duidelijk zijn de flauwhellende waterpijpen en de daarboven liggende stoom-waterhouder (stoomdrum) te zien. Tussen de pijpenbundel en de drum is de oververhitter zichtbaar.

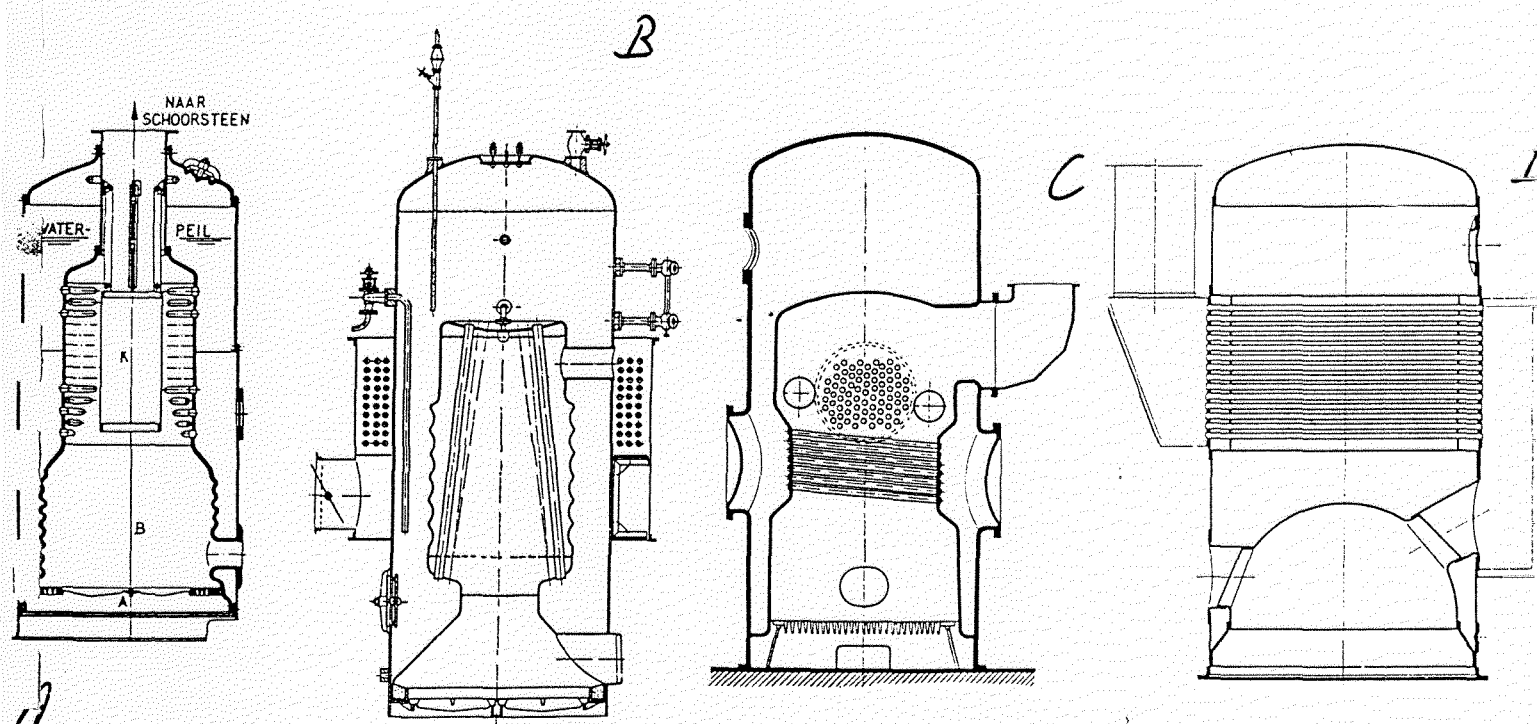
water in zijn geheel omgezet wordt in stoom. Dit type ketels wordt ook wel aangeduid met de namen Bensonketel of Sulzerketel, naar hun vroegste ontwerpers.²⁸

We zijn bijna aan het einde van de behandeling van het vat in de keteluitvoeringen die in de periode tussen ongeveer 1800 en 1950 ontwikkeld zijn. Eén voor het kleinbedrijf zeer belangrijk ketel type is echter nog niet genoemd. Dit zijn de staande of vertikale ketels. Ook dit type ketel werd reeds gebruikt bij het begin van de stoomtoepassing, maar dan voor het drijven van werktuigen voor vervoerdoeleinden.²⁹ Het grote verschil met de hierboven beschreven grootwaterruimketels is dat de cilinder (het vat) dat het water bevat rechtop staat, zoals de naam al doet vermoeden. Hierdoor neemt het een klein

²⁸ De technische vraagbaak, deel M, 199-200 en Stoom, 135-139.

²⁹ Stoom, 124-126.

vloeroppervlak in. Ondanks (of wellicht dankzij) zijn geringe afmetingen is het aantal uitvoeringen in de loop der decennia enorm geweest. Het zou hier te ver voeren om een chronologisch overzicht te geven, als dit al bekend zou zijn. Kenmerkend echter voor dit type ketel is, dat het water zich in een waterruimte (of pijpenbundel) direct boven het vuur - de vuurkist - bevindt. Voor de overdracht van de warmte van het vuur en de gassen zijn verschillende uitvoeringen gangbaar geworden. Hierbij is wederom een indeling te maken naar vuurgang-, vlampijp- en waterpijpketels, of een combinatie hiervan. Veel toegepaste staande ketels zijn onder meer de Clarkson-doppenketel met vuurgangen; de kruispijpketel met waterpijpen en de Cochranketel met vlampijpen. De bundels vlam- en/of waterpijpen kunnen horizontaal of vertikaal geplaatst zijn in het staande cilindrische vat.³⁰



Afbeelding 8 Enkele voorbeelden van staande ketels. A is een Clarkson-doppenketel; B is een zogenaamde Be-ve ketel, C een kruispijpketel en D een staande ketel met horizontale vlampijpen.

Veel van de bovengenoemde ketels werden in de jaren '50 van deze eeuw nog gebruikt. Een overzicht van het aantal geplaats-

³⁰ De technische vraagbaak, deel M, 187-189 en Stoom, 124-126.

te ketels in 1954 is terug te vinden in een uitgave van de Dienst voor het Stoomwezen in 1955.³¹

1.1.2. De stookinrichting en de vuurgangen

Nu de belangrijkste indeling - de manier waarop de warmteoverdracht op het water plaats kan hebben - om ketels de kunnen duiden uiteengezet is, kunnen een aantal kleinere, maar wel essentiële onderdelen nader bekeken worden. Een van deze onderdelen is de wijze waarop het vuur gestookt wordt, ook wel stookinrichting genoemd. Dit kan op een aantal - boven al summier aangehaalde - manieren geschieden.

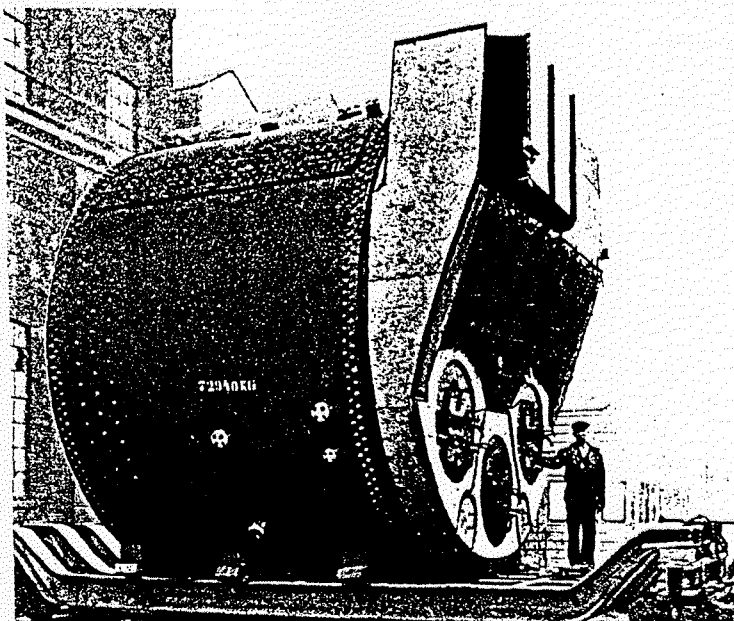
De vroegste ketels, de ei-vormige of wagonketels, werden gestookt met een ondervuur. Dit vuur lag geheel los van de ketel. Alleen het metselwerk zorgde ervoor dat het bouwwerk - ketel en vuur - een geheel vormde en dat de gassen langs de waterhouder geleid werden.

Het vuur werd één geheel met de ketel toen de Cornishketel zijn intrede deed. Het deel waar de brandstof (bijvoorbeeld kolen of turf) opgelegd werd, heette de stookbuis, de vuurgang of het stookhuis, al naar gelang de vorm die deze verbrandingsruimte had. Deze stookbuis stak door het vat waarin zich het water bevond. De warmteoverdracht op het omringende water werd hierdoor gunstig beïnvloed. De constructie van de ketel werd er echter wel zwakker door. Deze wijze van stoken is veel toegepast bij grootwaterruimketels. De al genoemde Cornwallketel, maar ook bij de Lancashire-ketel en later, tegen het einde van de negentiende eeuw, bij de Schotseketel.

Een derde vorm van stoken geschiedde met behulp van een vuurkist. Deze stookruimte vormde eveneens een integraal deel van de ketel. Vuurkisten werden met name toegepast in lokomotiefketels en in staande ketels. Hierbij was het grondoppervlak in lokomotiefketels rechthoekig en bij staande ketels meestal rond.

Pas met de komst van de waterpijpketel aan het eind van de negentiende eeuw deed een laatste type verbrandingsruimte zijn intrede: de vuurhaard. Ook deze ruimte is een integraal

³¹ zie bijlage 1.



Afbeelding 9 Schotse ketel. Door zijn compactheid en de uitvoering, waarbij de goede eigenschappen van de grootwaterruimketel en die van de waterpijpketel, wordt deze ketel zeer veel gebruikt.

onderdeel van de ketel. De (water)pijpen staan rondom deze haard opgesteld en 'ontvangen' zodoende een groot deel van de stralingswarmte van de vlammen. Hierdoor neemt de totale warmteoverdracht op het water toe. Daar waar geen verwarmde pijpen liggen wordt de ketel beschermd tegen de hitte door vuurvaste steen. Dit type ketel wordt ook wel stralingsketel genoemd, omdat een (groot) deel van de warmte van de vlammen wordt overgedragen op het stoomvormende water door radiatie of straling. De rest van de warmte in de gassen wordt gebruikt om het ketelwater voor te verwarmen of om de geproduceerde verzadigde stoom verder te verwarmen. De vroegere stookplaatsen maakten vooral gebruik van convectorie en geleiding voor de warmteoverdracht. In de volgende paragraaf wordt hier verder op in gegaan.

Een laatste aspect met betrekking tot de stookinrichting is nog niet behandeld. Dit betreft de gebruikte brandstof en de toevoer van de verbrandingslucht. Veruit de langste tijd werden steenkolen gebruikt voor het stoken van de ketel. Op plaatsen waar veel turf of hout voorradig was, werden de ketels geschikt gemaakt voor dit type brandstof. Gas en vloeibare brandstoffen begonnen pas aan het eind van de negentiende een kleine rol te spelen. Allereerst het gas,

gewonnen uit kolen. Tot grootschalige toepassing kwam het echter niet.

Voor de verbranding is er naast de brandstof ook zuurstof nodig. Deze zuurstof zit in de buitenlucht. Bij de negentiende eeuwse kolengestookte ketels werd de lucht door een natuurlijke trek naar het vuur gezogen. Wanneer echter de (zwaarbelaste) waterpijpketels hun intrede doen, met tal van obstakels (lees warmtewisselaars) in de gassenstroom is de natuurlijke trek niet meer voldoende om een goede doorstroming te krijgen. Om dit probleem op te lossen werden ventilatoren aan de toevoerzijde van de lucht en aan de afvoerzijde van rookgassen in de ketel aangebracht.

1.1.3. Niet stoomproducerende warmtewisselaars

Om het gehele rendement van de stoomketel te verbeteren zijn er tal van manieren bedacht om de warmte die nog in de rookgassen aanwezig is te benutten. In grote lijnen gaat het om warmtewisselaars die de restwarmte van de gassen overbrengen naar de verbrandingslucht, naar de verzadigde stoom, of naar het voedingswater. Voor alle drie de wijzen hebben de warmtewisselaars een kenmerkende naam meegekregen. Dit zijn respectievelijk de luchtvoorwarmer (luvo), de oververhitter (ovo) en de economiser (eco). In de ketel en daarbuiten kunnen echter nog tal van andere ver- of voorwarmers opgenomen zijn die de stoom en voedingwater extra energie geven. Deze voorwarmers vallen echter buiten het bestek van deze studie. Relevant is echter dat deze warmtewisselaars reeds vroeg in de ontwikkeling van de stoomketel toegepast werden. Een voorbeeld van een vroege ketel die uitgerust was met een oververhitter en twee economisers was de in 1864 door de Zwitserse gebroeders Sulzer gebouwde bouilleur- of franseketel.³² Echt veelvuldige toepassing vinden deze warmtewisselaars bij de vraag naar grotere vermogens en continue bedrijfsprocessen. Bij de kleinere staande stoomketels werden ze doorgaans niet gebruikt.

³² Matschoss, *Die Entwicklung II*, 449-450.

Ten laatste moet mog worden vermeld dat stoomketels kunnen worden ingedeeld naar het aantal keren dat de gasstroom in de ketel van richting verandert. Wanneer dit niet het geval is, bijvoorbeeld bij de allereerste Cornwallketel, heet dit een eentreksketel. Wanneer de gassen een, twee of meer keren keren, heet dit twee-, drie of meer treksketel.

In bijlage 2 zijn de meest relevante criteria op een rijtje gezet. Bijlage 3 geeft een voorbeeld van een ingevuld formulier op basis van het schema in bijlage 2.

1.2 Stoommachines

Over de geschiedenis van stoommachine is, zoals in de inleiding al kort aangegeven, in de loop der tijden veel geschreven. Met name de vroege ontwikkeling van de stoomkracht heeft veel aandacht van de historicus en de in de geschiedenis geïnteresseerde ingenieur gekregen. De historicus beperkte zich meestal tot de 'grote mannen' en de (oorzaken en gevolgen) van de toepassing het krachtwerktuig. Zijn technisch geschoolde collega benaderde de ontwikkeling van de stoommachine voornamelijk vanuit de wijze waarop de machines geconstrueerd waren, de werking en de toepassingen. Een uitzondering op deze tweedeling is de al eerder genoemde Duitse ingenieur Conrad Matschoß. Hij heeft een brug proberen te slaan tussen de ontwikkeling van de stoomkracht, de maatschappelijke gevolgen en de rol van de belangrijke ontwerpers en bedenkers van de machines hierin. In Nederland is, met name door H.W. Lintsen in diverse publicaties, op een beperkt gebied - dat van de polderbemaling - een integrale analyse van ontwikkeling en de toepassing van de stoomkracht in brede zin onderzocht. Hierbij wordt een aantal krachtbronnen behandeld, waaronder stoommachines, maar het is niet tot een indeling van een typologie van de stoommachine gekomen. Wellicht is een eenduidige typologie van stoommachines, net zoals bij de indeling van stoomketels, niet geheel mogelijk. Hiervoor is de geschiedenis van het werktuig te lang en waren de toepassingsgebieden te breed om dit te bewerkstelligen. Ook vroegere auteurs hebben zich gewaagd aan indelingen, maar eenduidige, onderling vergelijkbare indeling ben ik niet tegengekomen. De meeste schrijvers geven een indeling naar doel, naar werkingsprincipe van de stoom en naar constructie.³³ Het gevolg is dat dezelfde machine op verschillende wijzen beschreven kan worden.

Onderstaand zal ik een poging wagen om tot een bruikbare ordening te komen. Uitgangspunt is de praktische, direct te herkennen kenmerken zo hoog mogelijk in de indelingsboom te plaatsen. Dit betreft dan in eerste instantie het drijfwerk, dat zeer bepalend is voor de constructie. De beschrijving kan

³³ De technische vraagbaak, deel M, 220-221; T. Schwartze, *Katechismus der Dampfkessel, Dampfmaschinen und anderer Wärmemotoren* (7e druk, Leipzig 1901) 171-173; C. Matschoß geeft geen samenvattende indeling.

vervolgens worden "verfijnd" door een indeling van het werkingsprincipe van de stoom toe te passen. Door onderling niet te herleiden deeltcriteria is een vrij platte indelingsstructuur met vier naast elkaar staande hoofdcategorieën het resultaat. Deze vier hoofdcategorieën zijn: het drijfwerk, de stoomstroming, de stoomwerking en de stoomverdeling. Aan iedere categorie is een paragraaf gewijd

Sommige aspecten zijn in deze indeling ondervertegenwoordigd. Ik denk dan met name aan het kopje stoomverdeling. Alleen over dit onderwerp zijn al tal van monografieën verschenen. Het zou in het korte bestek van dit onderzoek onmogelijk zijn om deze allemaal de revue te laten passeren. Het onderwerp wordt in het kort aangesneden. Van enkele belangrijke, veel toegepaste schuifbewegingen zijn beschrijvingen opgenomen aan het eind van dit hoofdstuk.

1.2.1. *Het drijfwerk*

In 1884 wordt door Charles Algernon Parsons voor het eerst in het openbaar een werkende roterende stoommachine getoond.³⁴ Hierdoor is een eind aan het begin van deze eeuw een eind gekomen aan de hegemonie van de zuigerstoommachine bij de opwekking van grote vermogens en in de elektriciteitsvoorziening. Omdat de vormgeving en het werkingsprincipe van de stoomturbine zo sterk verschilt met die van de gewone stoommachine wordt hierdoor een eerste indeling van stoommachines mogelijk. Deze indeling heeft betrekking op de bewegingsvorm van het drijfwerk: roterend of heen- en weergaand. Stoomturbines hebben als hoofddrijfwerk een roterende as, alle zuigerstoommachines maken een heen- en weergaande beweging, die door een drijfstang-kruk mechanisme kan worden omgezet in een roterende beweging. De indeling van de stoomturbine wordt in paragraaf 1.2.2. behandeld.

Thomas Newcomen wordt over het algemeen gezien als de man die aan de bakermat van de stoom als drijfkracht heeft gestaan. Zijn 'stoom'installatie was in staat om arbeid te leveren door gebruik te maken van het verdampen en condenseren

³⁴ Matschoß, *Die Entwicklung*, deel 2 (facsimile), 610.

van water. De installatie had twee eigenaardigheden, die beide tot de komst van de Wattse machine aan het eind van de 18e eeuw synoniem waren met de stoommachine.

Het eerste kenmerk van de Newcomen-klasse (atmosferische) machines was dat deze werkten op vacuüm. Door in een met waterdamp gevulde ruimte water te spuiten, condenseerde de damp. Hierdoor trad een volumevermindering op. De aan de buitenzijde aanwezige luchtdruk duwde de zuiger naar beneden waardoor arbeid geleverd werd. Deze arbeid werd gebruikt om direkt water aan te zuigen. Zoals bekend werden deze machines voornamelijk toegepast in de mijnbouw om water uit de putten te pompen. Een tweede kenmerk betreft dan ook het drijfwerk. De zuiger was met stangen en kettingen via een houten balans verbonden aan de waterpomp. Ook in Nederland zijn dergelijke machines toegepast. Er is bijvoorbeeld sprake van een atmosferische Newcomen machine van het gemaal bij de Oostpoort te Rotterdam in 1776.³⁵ Een Smeaton machine van vier paardenkrachten was rond 1835 actief in de Achterhoek bij de ijzergieterij die in die jaren in eigendom was gekomen van H.A. Hederburgh en J.L. Nering-Bogel.³⁶

De atmosferische machine had altijd een balans of schijf die voor de overbrenging van de zuigerbeweging naar het arbeidswerktuig zorgde. Dit is de zogenaamde balansmachine. De arbeidsmachine - bijvoorbeeld een mijnpomp, blaasbalg of zaag-raam - maakte ook een heen- en weergaande beweging. Voor roterende arbeidsmachines, zoals in de textiel veel gebruikt werd, was deze overbrenging niet geschikt. In de achttiende eeuw werden twee uitvindingen gedaan die te samen zorgden voor een doorbraak van de roterende machines. Dit type is zo bekend dat deze kortweg wordt aangeduid als stoommachine; het vertegenwoordigt veruit de grootste verscheidenheid stoommachines.

Alvorens dit type verder te beschrijven zal eerst een beschrijving gegeven worden van de directwerkende stoommachine.

³⁵ H.W. Lintsen, 'Stoom in ontwikkeling', *Techniek in Nederland IV* (Zutphen 1993) 115.

³⁶ R.T. Griffiths, *Industrial retardation in the Netherlands 1830-1850* (Den Haag 1979) 119, voetnoot 12 op pagina 223.

1.2.1.1. *Directwerkende stoommachines*

Voor de eerste onderverdeling in hoofdtypen zuigermachines moeten we even terug naar de machine van Newcomen. Het zal gebleken zijn dat deze installatie geen draaiende delen bezat om de beweging van de zuiger over te brengen op een werktuig. Deze overbrenging was direct op het drijfwerk van de pomp. Deze uitvoering wordt later in de negentiende eeuw verder ontwikkeld voor het aandrijven van met name (water)pompen. Daar de noodzakelijke beweging van een zuigerpomp dezelfde is als zuigerbeweging van een stoommachine kunnen beide machines direct met een eenvoudige stangen aan elkaar bevestigd worden. Krachtwerktuig en arbeidswerktuig kunnen dan ook bijna altijd in één machine verenigd zijn. Het spreekt voor zich dat de toepassing van deze uitvoering zeer beperkt is. Naast pompen werd dit type machine gebruikt bijvoorbeeld in de metaalnijverheid voor blaasbalgen, stoomhamers en ponsmachines

1.2.1.2. *Indirectwerkende stoommachines*

Uit de aard der zaak volgt dat zuigerstoommachines een mechaniek nodig hebben om de heen en weer gaande beweging van de zuiger om te zetten in een roterende, ronddraaiende beweging. Rond 1770 werd in Engeland de vraag door de opkomende textielindustrie naar machines die een rondgaande beweging maakten zo groot, dat een aantal bouwers begon te zoeken naar praktische oplossingen. In 1780 lukte het James Pickard uit Birmingham om een atmosferische directwerkende balansmachine om te bouwen tot een balansmachine met een roterend wiel.³⁷ De stang die voorheen (direct) een pomp aandreef werd door hem vervangen door een een kruk-drijfstang mechanisme en een vliegwiel. Dit vliegwiel - een vinding van Wasborough - was noodzakelijk om de gang van de machine te waarborgen op de momenten dat de zuiger omkeerde van bewegingsrichting. Hierdoor ontstond een eerste versie van de later veel toegepaste boven balansmachine. Deze balansmachine werd aan het begin van de negentiende eeuw verder ontwikkeld. Rond 1804 bijvoorbeeld bouwt Arthur Woolf op dit drijfwerk zijn zeer succesvol-

³⁷ R.L. Hills, *Power from steam*, 60.

le Woolfse-machine (de voorloper van de receiver compoundmachine, die door de G.M. Roentgen werd ontwikkeld).

Ook in Nederland werden balansmachines toegepast. De bekendste, nog bestaande machine is de Cruquius. Samen met de Lijnden en Leeghwater werd deze machine gebruikt voor het bemalen van de het Haarlemmermeer in de jaren veertig van de negentiende eeuw.³⁸ Nederlandse fabrikanten speelden echter bij de fabricage van dit soort grote machines in die tijd geen of nagenoeg geen rol.

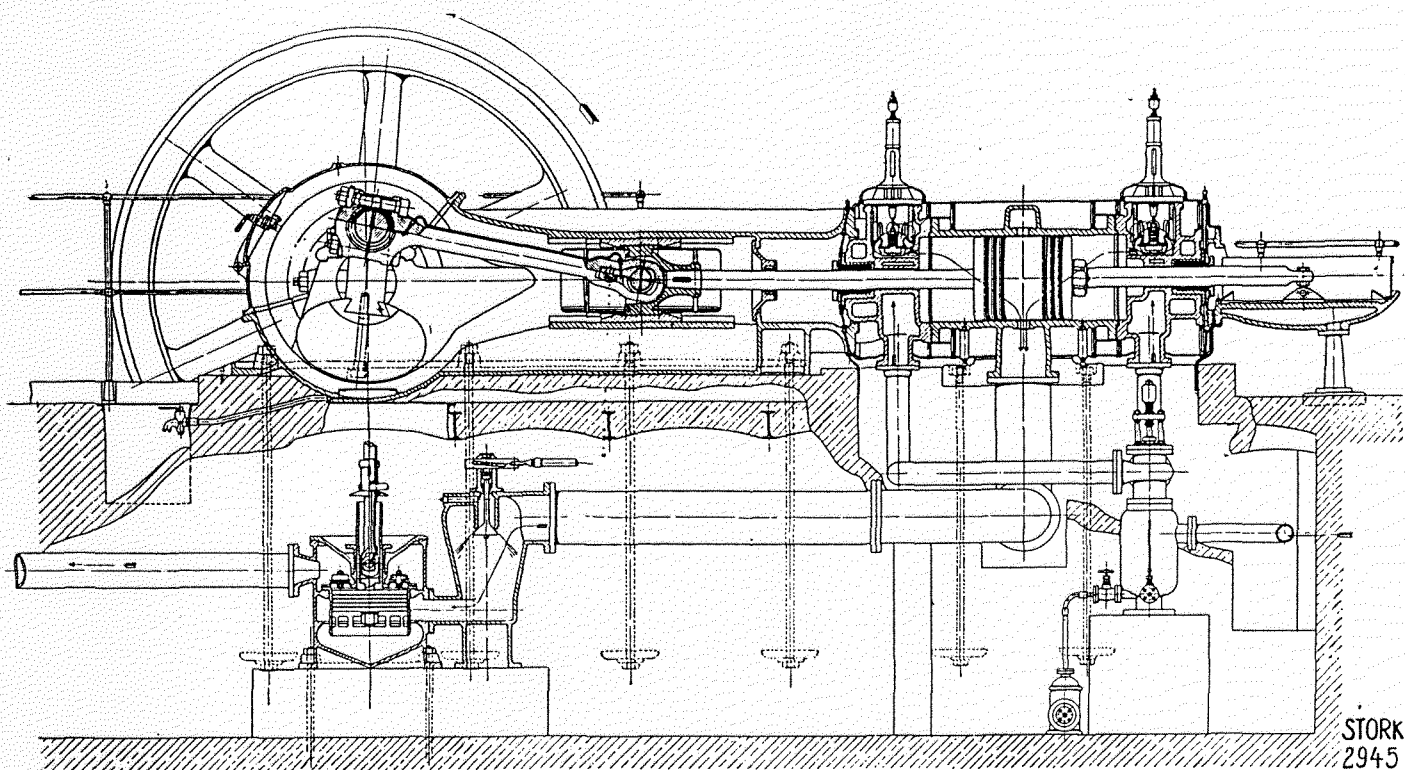
De rol van de balansmachine nam in de eerste helft van de negentiende eeuw geleidelijk af. Nieuwe machines deden hun intrede. Deze machines waren over het algemeen kleiner voor het geleverde vermogen, eenvoudiger op te bouwen en economischer in de bedrijfsvoering. Een van deze nieuwe ontwikkelingen was de komst van de kruishoofdmachine. De andere was de uitvinding van de trunkzuigermachines.

1.2.1.2.1. Kruishoofdstoommachines

De kruishoofdmachine kan op twee manieren voorkomen. De oudste toepassing was de staande, verticale machine. Enkele decennia later begon de opmars van de liggende, horizontale machine. Zeker voor stationaire toepassingen heeft deze laatste uitvoering in de tweede helft van de negentiende eeuw tot na de Tweede Wereldoorlog ruime toepassing gevonden in tal van werkplaatsen en fabrieken.

De kruishoofdmachine kenmerkt zich door een scharnierende verbinding tussen zuigerstang en drijfstang. Deze scharnierende verbinding - het kruishoofd - zorgt ervoor dat de zuigerstang in een perfect rechte lijn beweegt. De stuwkrachten op de zuiger worden dus via het kruishoofd overgedragen op de drijfstang: Deze drijfstang maakt aan de kruishoofdzijde een lineaire beweging en aan de krukzijde een roterende. Het kruishoofd zelf wordt meestal voorzien van leisloffen. Deze leisloffen bewegen langs het stilstaande deel van de machine - de leibanen - om de krachten loodrecht op de bewegingsrichting van de zuigerstang op te kunnen vangen. Aanvankelijk waren

³⁸ H.W. Lintsen, 'Stoom en bemaling' *Techniek in Nederland IV* (Zutphen 1993), 141-142.



Afbeelding 10 liggende, langzaamlopende dubbelwerkende zuigerstoommachine met kruishoofd.

deze leibanen niet meer dan stangen of balken waarover het kruishoofd kon schuiven. Later ontstond de veel toegepaste (holle) bajonetgeleiding.³⁹

De oorsprong van de kruishoofdmachine moet gevonden worden in de lokomotief machine. Aanvankelijke paste men staande machines toe op lokomotieven. Maar door beperkingen met de hoogte van de machine werden al snel schuinliggende en horizontale machines toegepast. De terughoudendheid in de toepassing van liggende machines moet gezocht worden in het gegeven dat bij liggende machine de zuiger eenzijdig (d.w.z. alleen aan de onderzijde) te veel slijt. Met de stand van de fabrikagetechniek aan het begin van de negentiende eeuw was dit een groot probleem. In de Verenigde Staten was het Taylor in 1826 die als eerste de doorbraak in de grootschalige toepassing van de liggende stoommachine forceerde.⁴⁰ Deze machines werden veel toegepast in de suikerfabrieken in West-Indië.⁴¹ Het is

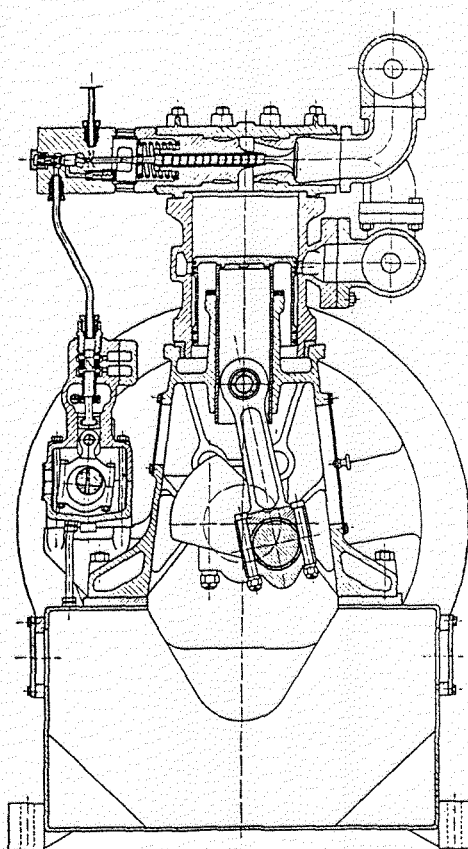
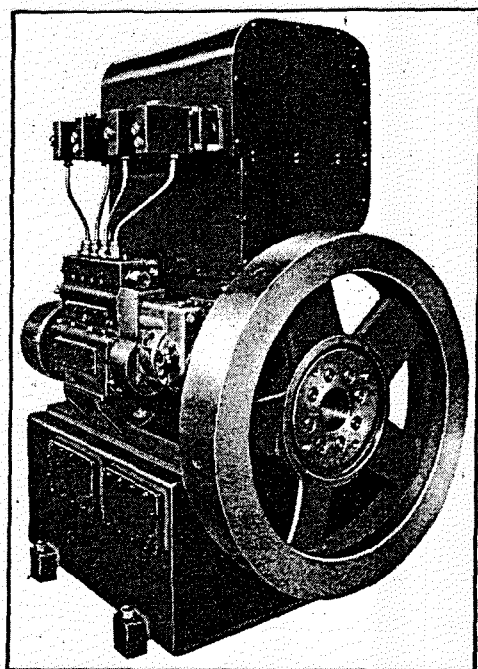
³⁹ T. Schwartz, Katechismus, 173-174.

⁴⁰ C. Matchoß, *Die Entwicklung I*, (1908) 408.

⁴¹ idem, 409.

mogelijk dat de Amsterdamse firma Van Vlissingen en Dudok van Heel in de jaren dertig ook dergelijke machines fabriceerde voor de suikerindustrie in Suriname.⁴²

Een bijzondere uitvoering van de kruishoofdmachine, zowel de liggende als de staande, is die met terugwerkende drijfstang. Hierbij is als het ware de drijfstang teruggeklapt langs de stoomcilinder naar de kruk en het vliegwiel. Bij stationaire machines werd deze echter alleen toegepast wanneer de ruimte waarin een machine geplaatst diende te worden beperkt was.



Afbeelding 11 Staande trunkzuigerstoommachine voor hoge toerentallen, een zogenaamde stoommotor.

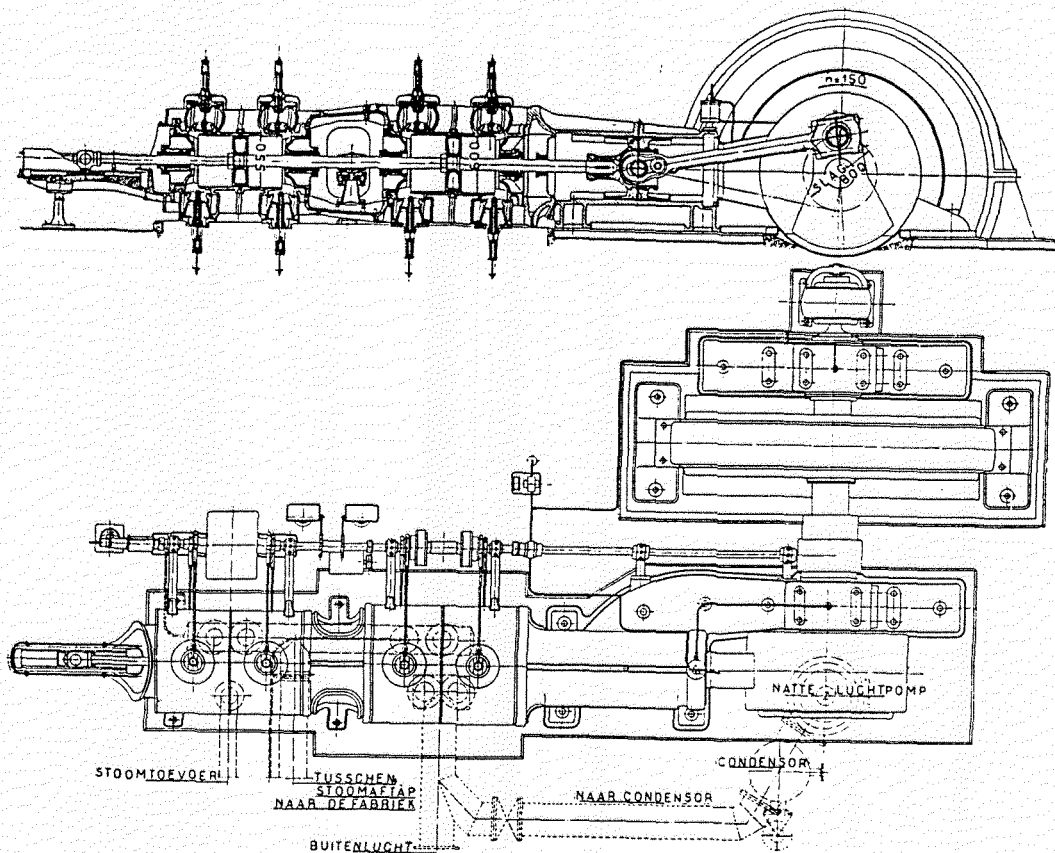
1.2.1.2.2. *Trunkzuigermachines*

De tweede methode om de heen en weer gaande beweging van de zuiger om te zetten in een draaiende beweging, gebeurde door een trunkzuigermachine. Bij deze machine is de zuigerstang

⁴² M.G. de Boer, *Honderd jaar machineindustrie op Oostenburg Amsterdam 1827-1927* (Amsterdam 1927), 19-20.

tevens de drijfstang, een kruishoofd ontbreekt dan ook. Het scharnierpunt (om de roterende beweging mogelijk te maken) lag bij de eerste vormen van deze machine de buitenzijde van de cilinder. De eerste praktische uitvoeringen van dit type stoommachine ontstonden eveneens in de eerste decennia van de negentiende eeuw in Groot Brittannië en in de Verenigde Staten. Hierbij was de zuigerstang vast aan de zuiger bevestigd waardoor de draaiende beweging uitgevoerd moest worden door de gehele cilinder. Deze oscillerende beweging van de cilinder - vandaar de naam oscillerende stoommachine - maakte dat de besturing van de machine problematisch was.⁴³ Uit deze oscillerende machine ontwikkeld zich, via kleine tussenstapjes de zeer bekend geworden trunkzuigermachine of stoommotor. De kleine afmetingen en het hoge toerental maakten dat deze machine uitstekend geschikt was voor het aandrijven van kleinere generatoren voor de opwekking van electriciteit.

⁴³ Matschoß, *Die Entwicklung I*, 403.



Afbeelding 12 Doorsnede en bovenaanzicht van een liggende tandemmachine. De achter elkaar liggende zuigers verschillen van diameter. De stoom stroomt eerst in de cilinder met de kleinste diameter, vervolgens naar de andere cilinder.

1.2.1.2.3. Meerlingen

Een moeilijk onder te brengen aspect van de constructie of uitvoering van stoommachines is het gegeven dat er machines gebouwd zijn met meerdere identieke cilinders op verschillende krukken. Hierdoor is dit onderdeel als een apart indelingskenmerk opgenomen, en is het criterium serie- of parallel machine opgenomen. Meerling machines (tweeling, drieling, etc.) zijn machines waarvan twee of meer cilinders parallel aan elkaar werken. Deze cilinders werken onder dezelfde aanvangs- en einddrukken, hebben dezelfde zuigersnelheden en zuigerslag: kortom volbrengen hetzelfde (deel)proces. De stoomverdeling kan gescheiden zijn. Altijd werken ze op een ander deel van de krukas of balans. De parallelwerking van de cilinders kan geïntegreerd zijn in een groter geheel waar ook in serie werkende cilinders bij betrokken zijn. Daar waar er meerdere cilinders op de machine zitten, en waar geen sprake is van

parallelwerking, zijn deze machines altijd in serie werkende machines. Over het algemeen werden parallelmachines niet (veel) toegepast op landinstallatie, voornamelijk op schepen vonden dit type machines emplooi.⁴⁴

1.2.2. De werking van de stoom

Nu de verschillende drijfwerken van stationaire machines gekend zijn, kan worden overgaan tot de indeling van de machines naar de werking van de stoom. Dit is het deel dat eigenlijk alleen betrekking heeft op de inrichting en uitvoering van de stoomcilinder en de daarin bewegende zuiger. Eerst zal ik kort stil staan bij de twee manieren waarop de stoom door de cilinder kan stromen. Daarna wordt dieper ingegaan op wijzen waarop de werking van de stoom in de machine kan worden ingedeeld.

1.2.2.1. Stoomstroom

In de jaren '80 van de vorige eeuw deed zich in de stoommachinbouw een nieuwe ontwikkeling voor. Tot die tijd waren alle stoommachine uitgerust volgens het zogenaamde wisselstroom principe. Dit houdt in dat de stoom dezelfde weg de cilinder verlaat als het is binnen gekomen. De schuiven en kleppen sturen de toe- en afvoer van de stoom. Een groot nadeel hierbij is dat de afgewerkte stoom cilinderwand, zuigerkop en cilinderdeksel sterk afkoelt, waardoor de nieuwe lading verse stoom eerst die plaatsen weer moet opwarmen. Dit gaat gepaard met een aanzienlijk warmteverlies, de zogenaamde begin- of aanvangscondensatie, iedere slag weer. Een aantal uitvinders, Stapfer de Duclos in 1884, Todd in 1885 en Bourel & Frelzau eveneens in 1885 om er slechts een paar te noemen, experimenteerden met een andere stoomdoorstroming van de cilinder.⁴⁵ Pas in 1908 werd dit probleem afdoende opgelost door de Duitser J. Stumpf. Hij ontwierp en bouwde een machine die zodanig was vormgegeven dat de stoom niet twee keer dezelfde weg aflegde. Een stoommachine waarbij dit principe wordt toegepast

⁴⁴ zie bijvoorbeeld Matschoß, *Die Entwicklung*, II facsimile, 499-503 voor een beschrijving van een driecilinder compoundmachine.

⁴⁵ D.A. de Fremery, 'Constructie-details van gelijkstroomstoommachines', *De Ingenieur*, 38 (1918) No. 12, 807-808.

is een gelijkstroomstoommachine. In Nederland zijn door verschillende machinefabrieken veel van dit soort machines gebouwd, onder andere door Jaffa te Utrecht en Stork te Hengelo. Wisselstroomstoommachines kunnen voorkomen als enkelwerkende machines, hierbij wordt slechts aan een zijde van de zuiger stoom toegelaten, of als dubbelwerkende machines. Dit laatste geeft aan dat aan beide zijden van de zuiger stoomtoegelaten wordt om de machine te bewegen. Gelijkstroomstoommachines zijn altijd dubbelwerkend uitgevoerd.

1.2.2.2. Stoomwerking

Er zijn twee manieren waarop de stoom in een stoomcilinder gebruik kan worden om arbeid te leveren. De oudste wijze werd geïntroduceerd door D. Papin en vervolgens toegepast en verbeterd door Savery, Newcomen, Smeaton en Watt. Het berustte op het vacuümprincipe van de stoom. De drijvende kracht was de atmosferische luchtdruk die de zuiger in beweging bracht en zodoende de arbeidsslag volbracht. De verwarming van het water tot stoom - die expandeerde - zorgde ervoor dat de zuiger weer terugging naar zijn oorspronkelijke stand. Afkoeling (door de omgeving of door het inspuiten van water) zorgde ervoor dat de stoom condenseerde waardoor er een partieel vacuüm in de cilinder (onder de zuiger) ontstond en het proces zich kon herhalen. De gehele achttiende eeuw was dit de enige wijze waarop stoomkracht gebruikt werd. Dit type machine wordt de atmosferische machine genoemd.

Rond 1800 introduceerden Richard Trevithick in Engeland en Oliver Evans in de Verenigde Staten een tweede vorm van stoomkracht. De verandering met het voorgaande was dat ze gebruik maakten van stoomdrukken groter dan de atmosferische druk en geen vacuüm toepasten aan het eind van het proces.⁴⁶ Aanvankelijk lagen de drukken rond de 25 p.s.i. (ongeveer 1,7 bar) maar in de loop der jaren werden stoomdrukken toegepast tot ongeveer 4,5 bar boven de zuiger.⁴⁶ De machine blies na gedane arbeid zijn afgewerkte stoom vrijelijk in de atmosfeer. De zojuist beschreven machine van Trevithick is de eerste machine die ingedeeld kan worden als overdrukmaschine; machines die met

⁴⁶ Hills, *Power from steam*, 101-103.

een beduidend hogere druk werken dan de atmosferische. De overdrukmaschine stond hiermee aan het begin van een glansrijke carrière, ondanks de zware kritiek van de firma Boulton & Watt.⁴⁷ De Wattse machine, die met een lichte overdruk werkte, en de vacuümmachine verdwenen langzaam van het industriële toneel. Voor het einde van de negentiende eeuw waren alle toegepaste stoomkrachtbronnen overdrukmachines.

In de loop van die eeuw ontwikkelden zich drie 'ondertypen' overdrukmachines. Hiervan zijn de eerste twee al door Trevithick geïntroduceerd: de gelijkdruk en de tegendrukmaschine. Bij een gelijkdrukmaschine of volledrukmaschine, wordt gedurende de arbeidsslag de volle stoomdruk blijvend boven de zuiger toegelaten. Het volledruk principe slaat hiermee op de duur waarop de stoom wordt toegelaten in de cilinder, dit in tegenstelling het andere type overdrukmaschine: de tegendrukmaschine. Zoals de naam al enigszins aangeeft, ondervindt de stoom bij het verlaten van de cilinder bij dit type machine een tegendruk. Dit is de atmosferische luchtdruk of een druk hoger dan deze. Tegendrukmachines werden veel toegepast bij bedrijven die naast bewegingsenergie een grote hoeveelheid warmte nodig hadden voor het bedrijfsproces. De afgewerkte stoom uit de stoommaschine kon voor deze verwarmingsdoeleinden gebruikt worden.

Het derde en laatste 'ondertype' is de expansiemachine. Deze machine is zodanig geconstrueerd dat tijdens de arbeidsslag de stoomtoevoer wordt gestopt. De (rest van de) bewegingsenergie wordt aan de stoom onttrokken door expansie. Alhoewel het niet altijd zo is geweest, wordt nu met de benaming expansiemachine aangenomen dat de expansie tot in het (partieel) vacuüm plaatsheeft. Een condensor is hierbij dus altijd aanwezig. Expansiemachines zelf kunnen weer onderverdeeld worden in enkelvoudige expansie (machines met één cilinder); compoundmachines (machines met twee expanderende cilinders); triple-expansie machines (met drie expanderende cilinders), enzovoort.

Een bijzondere uitvoering van de compoundmaschine is de tandemmaschine. Deze machine is zeer veel toegepast in het bedrijfsleven als krachtbron. Het kenmerkende van deze machine is dat de hogedruk zuiger en de lagedruk zuiger in het

⁴⁷ idem, 102.

verlengde van elkaar liggen, en dat ze op dezelfde drijfstang werken.

Een laatste uitvoering met betrekking tot de werking van de stoom is de aftapmachine. Hiervan is sprake als een machine zodanig is ingericht dat ergens in het werkingsproces van de stoommachine, een hoeveelheid stoom van een bepaalde druk en temperatuur uit de machine gelaten wordt. Deze stoom heeft dan al enige arbeid verricht en kan vervolgens gebruikt worden voor bijvoorbeeld het voorwarmen van het ketelwater of voor machines en apparaten die stoom eisen lager dan de keteldruk en temperatuur. De overige stoom vervolgt zijn weg door de rest van de stoommachine. Het resultaat is dat het rendement van de totale bedrijfsinstallatie toeneemt, wat resulteert in een lager totaal brandstofverbruik.

1.2.2.3. *Stoomverdeling*

Na deze opsomming van de manieren waarop een stoommachine door de stoom kan worden gedreven, is het nodig om even kort te kijken naar de wijzen waarop deze stoom gestuurd wordt. Zoals uit het bovenstaande al zou kunnen blijken, zijn de werkingsprincipes van de verschillende stoommachines al aan het begin de negentiende eeuw bekend. Tot algemene toepassing kwam het meestal niet omdat de stand van de techniek nog niet genoeg ontwikkeld was om de machines voldoende nauwkeurig te kunnen bouwen. De meest toegepaste materialen waren gietijzer en hout. Bewerkingsmachines als draaibanken, freesmachines en dergelijke en meetinstrumenten ontbraken nog, of waren te onnauwkeurig. In de loop van de negentiende eeuw veranderde dit. Machineonderdelen konden met een hogere precisie vervaardigd worden. Hierdoor werd het mogelijk om de stoommachine nauwkeuriger te fabriceren: ook de precisie-onderdelen voor de besturing van de machine. De werking van de stoommachine werd hierdoor aanzienlijk verbeterd. Over deze zogenaamde stoomverdeling volgt hieronder een paar korte opmerkingen.

Meer nog dan de aan de constructie van de stoommachine, hebben technici aandacht besteed aan de verdeling van de stoom in een stoommachine. Het doel van deze verdeling is om op het juiste ogenblik een juiste hoeveelheid stoom tot de machine

toe te laten, zodat een regelmatige en efficiënte werking verkregen wordt.

Een behandeling van een fractie van de bedachte stoomverdelingstoestellen zou al ver buiten het bereik van dit hoofdstuk vallen. Aan het eind van de negentiende eeuw waren er in Duitsland alleen al meer dan 500 octrooien verleend op dergelijke toestellen.⁴⁸ Met recht vormt de stoomverdeling de meest complexe materie van de stoommachine, omdat ingewikkelde mechanische constructies nauw moeten aansluiten bij de theoretische aspecten van de stoomkracht.

Toch kan er in grote lijnen wel iets over gezegd worden. Eerst zal ik de drie hoofduitvoeringen beschrijven, waar bij wijze van voorbeeld twee belangrijke uitvoeringen - de Corliss besturing en het Sulzer-systeem - besproken zullen worden.

1.2.2.3.1. Kranen

In de vroegste tijden van stoomkracht werden de machines handmatig bediend door kranen. Van de machinist werd verwacht dat hij op het juiste moment deze handeling zou verrichten. Dat deze wijze traag en inefficiënt was behoeft dan ook geen betoog. Voor roterende (krukas)machines is deze handmatige besturing niet toegepast. Wel zijn er uitvoeringen van door de machine zelf gedreven roterende kranen bekend. De belangrijkste hiervan is de Corliss besturing. Deze besturing is genoemd naar de Amerikaan George Henry Corliss. Hij bedacht in 1851 een methode om een efficiëntere besturing van de stoommachine te verkrijgen. Het principe van de glijdende schuif werd door hem vervangen door vier afzonderlijke kranen, ook wel draaiende schuiven genoemd, die door een schijf en stangen korte draaiende bewegingen maakten. Er waren twee kranen voor de toestroom van de stoom (de inlaat) en twee voor de uitstroom van de stoom (uitlaat). Verdere uitwerkingen van dit principe zijn ook toegepast door Nederlandse machinebouwers, zoals door de IJzergieterij de Prins van Oranje uit Den Haag en de machiniefabriek 'Breda'.⁴⁹

⁴⁸ E.F. Scholl, *De gids voor machinisten* (5e druk Leiden 1896), 671.

⁴⁹ Scholl, *De gids*, 371-376.

1.2.2.3.2. *Schuiven*

Een tweede wijze van stoomverdeling is met behulp van de stoomschuif. De klassieke, vlakke schuif is voorzien van openingen aan één zijde die de inlaat- en uitlaat kanalen van de cilinder opent en afsluit. Latere versies zijn cilindrisch van vorm (de zuigerschuif) en hebben openingen rondom. Iedere schuif krijgt zijn beweging via een overbrenging van de krukas. Meestal wordt de roterende beweging van de krukas door middel van een excentriek omgezet in de heen- en weergaande beweging. Zowel de vlakke als de zuigerschuif kunnen weer in tal van variaties voorkomen. Enkele voorbeelden zijn de dubbeleschuif, lange kanaalschuif, bak- of C-schuif als ondertype vlakke schuif en de veel gebruikte bosschuif als type zuigerschuif.⁵⁰

1.2.2.3.3. *Kleppen*

De laatste hier te behandelen methode om de stoom naar de cilinders te dirigeren is door middel van kleppen. De beweging is dezelfde als van de schuif, echter bij een klep kan de stoom geheel rondom de klep de cilinder in- en uitstromen. Hierdoor treden er minder smoorverliezen in de kanalen op dan bij schuiven het geval is. Een voorbeeld van een stoomverdeling met kleppen is de uitvinding van de Gebroeders Sulzer. De kleppen, die aan de boven- en onderzijde van de liggende cilinder zijn aangebracht worden daar een stangenstlesel en een excentriek geopend. Een spiraalveer en de stoomdruk sluiten de klep. Dit principe werd door onder andere Sulzer in 1867 bedacht en toegepast. De 'Nederlandse fabriek van stoomwerktuigen en spoorwegmaterieel' had een licentie om het Sulzer systeem toe te passen. In 1895 bouwden ze rond dit stoomverdelingsprincipe een compoundmachine van 250 PK voor het opwekken van elektrische energie.⁵¹ Werkspoor bouwde tot na de Tweede Wereldoorlog snellopende stoommotoren (staande

⁵⁰ idem, 358-363.

⁵¹ idem, 386 voetnoot 1.

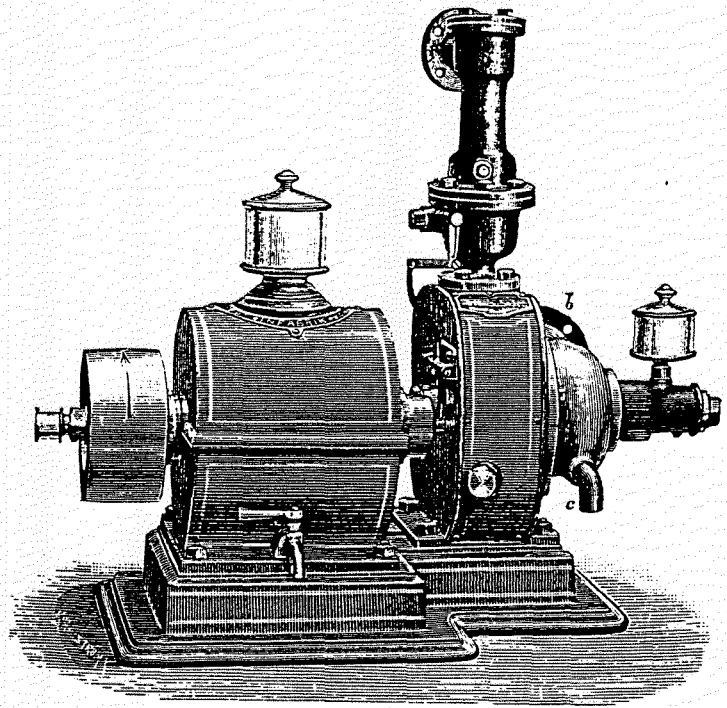
trunkzuiger stoommachines) waarin de Meier-Mattern-oliedruk-
klep voor de toelaat van de stoom zorgde.⁵²

Een overzicht van de typologie wordt gegeven in bijlage 4.
Een ingevuld (voorbeeld)schema is bijgevoegd als bijlage 5.

⁵² H.M. Meier Mattern en C. Sokoloff, 'Zuigerstoomwerktuigen', *De technische vraagbaak machines en mech. technologie*, deel M (5e druk Deventer 1950), 261-264.

1.3. Stoomturbines

Met betrekking tot krachtbronnen kan de negentiende eeuw beschouwd worden als de eeuw van de stoommachine. Nagenoeg alle werktuigen werden aan het eind van die eeuw aangedreven door zuigerstoommachines. In het eerste decennium van de twintigste eeuw bereikte het gebruik van de zuigerstoommachine zijn hoogtepunt, met de gelijkstrooommachine, hogere stoomdrukken



Afbeelding 13 Lavalturbine.

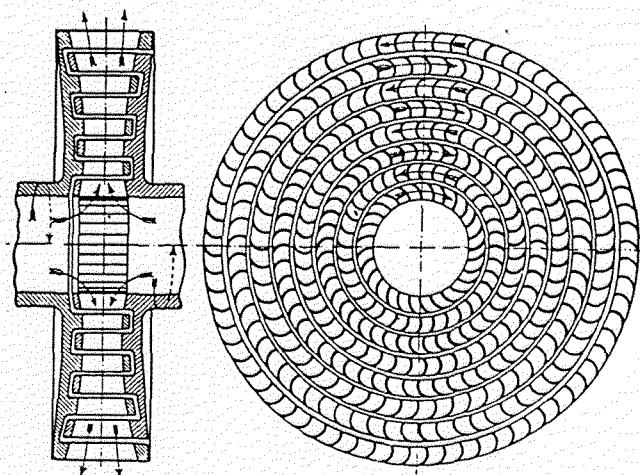
en oververhitte stoom en condensatiemachines als de grootste verbeteringen. Nadien nemen de verbrandingsmotor voor de kleinere vermogens en de turbine voor de grotere vermogens het van de zuigerstoommachine geleidelijk aan over.

Omstreeks 1890 vermoedde nog slechts een enkeling dat de nieuwe vindingen en toepassingen van C.A. (Charles) Parsons in Groot-Brittannië en C.G.P. (Gustaf) De Laval in Zweden, een belangrijke, wellicht doorslaggevende bijdragen zouden leveren aan de totstandkoming van een kleine revolutie binnen de energieopwkking. De kleine turbines, die een nerveus fluitende toon produceerden - een sterk contrast met de rustige gang van de stoommachine - en tevens een geweldig vermogen wisten te ontwikkelen, werden toen op beperkte schaal al toegepast.

In Nederland echter nog niet. Het waren de landen om ons heen - Franrijk, België en Duitsland en natuurlijk Engeland en Zweden die het voortouw in deze ontwikkeling namen. N.C.H. Verdam, in een vertaling van het werk van E.F. Scholl, geeft aan dat er "...thans [1896; wh] in Stockholm een groote fabriek in werking is, die reeds meer dan 700 stuks [De Laval turbines; wh] heeft afgeleverd, terwijl de machine voor

Frankrijk geconstrueerd wordt door de bekende fabriek "Maison Breguet" te Parijs, voor België door John Cockerill, te Seraing, en voor Duitschland door de Maschinebau-Anstalt Humboldt te Kalk bij Keulen."⁵³ Ook C.F. Stork in het gedenkboek van het vijftigjarige bestaan van het Koninklijk Instituut voor Ingenieurs in 1897 maakte geen melding van de produktie in Nederland van stoomturbines.⁵⁴

Twee decennia later echter is de produktie van dergelijke machines wel op gang gekomen. Hoewel bij de bouw van de krachtcentrale te Den Haag in 1906 de turbine in overweging was genomen, werd toch nog een Stork zuigerstoommachine geïnstalleerd.⁵⁵ De over-



Afbeelding 14 Het werkingsprincipe van een radiale stoomturbine.

weging voor de opdrachtgever, met name ir. N.J. Singels, om geen turbine te gebruiken was dat met deze machines nog te weinig ervaring was opgedaan. Een jaar later, in 1907, was de techniek kennelijk meer volwassen, want zowel in Amsterdam als in Rotterdam werden turbines geïnstalleerd in de gemeentelijke krachtcentrales.⁵⁶ Stork bouwde overigens in 1906 wel haar eerste Zoelly-stoomturbine.⁵⁷ Kenmerkend is dat W.H.P.M. van Hooff geen melding maakt van de produktie van stoomturbines: een teken dat de fabrikage van deze machines tot 1914 niet

Scholl, *De gids*, 410.

C.F. Stork, 'De Nederlandsche machine-nijverheid', *Gedenkboek uitgegeven ter gelegenheid van het vijftigjarig bestaan van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs 1847-1897* ('s Gravenhage z.j. [1897]), 213-218.

J. Muysken, 'Enige mededeelingen over het ontstaan en de ontwikkeling der machine-industrie in Nederland', *De Ingenieur* 48 (1928) No.11, W102.

M. Nooren en A.Jansen, 'Stroom voor allen. De gemeentelijke elektriciteitscentrale (1906-1940)', *Den Haag energiek, hoofdstukken uit de geschiedenis van de energievoorziening in Den Haag* ('s Gravenhage 1981), 271.

J. Muysken, 'Enige mededeelingen', W102.

veel zal hebben voorgesteld.⁵⁸ Pas later werden in Nederland meer turbine-installaties gebouwd, alle onder licentie van buitenlandse machinebouwers als STAL-Laval, Parsons, Rateau, Curtis en Zoelly. Zo ging in 1933 Werkspoor samenwerken met de fabriek STAL (Svenska Turbinfabriks Aktiebolaget Ljungström). Dat wil zeggen de zeer nauwkeurig te fabriceren onderdelen werden betrokken van deze fabriek in Zweden, de overige onderdelen maakte Werkspoor zelf.⁵⁹ Voor de Tweede Wereldoorlog bezat de N.V. Koninklijke Maatschappij 'de Schelde' te Vlissingen alle licenties om Parsons-turbines te bouwen. Werkspoor te Amsterdam bezat in die tijd licenties om alleen de Parsons scheepsturbines te vervaardigen.⁶⁰ Stork te Hengelo bouwde toen in ieder geval ook Zoelly turbines.⁶¹

Na deze zeer korte en onvolledige schets over de bouw van de stoomturbine in de beginperiode in Nederland, is het zaak over te gaan naar het doel van dit hoofdstuk: een typologische indeling van de stoomturbine. Een typologie van de turbine is vergeleken met die van de stoommachine een redelijk eenvoudige. Het grote verschil met deze machine is dat aan de turbine het mechaniek ontbreekt - niet nodig heeft - om de heen- en weergaande beweging om te zetten in een roterende. Dit is de reden waarom de stoomturbine en de zuigerstoommachine typologisch anders ingedeeld zijn. Een indeling naar (uitwendige) constructie is in zekere zin niet zinvol. Alle typen turbines lijken uiterlijk sterk op elkaar: ze zijn compact en hebben geen uitwendig drijfwerk dan alleen de aandrijfas. De bij de andere krachtbronnen gehanteerde indeling naar (uitwendige) constructie zal hierom niet gehanteerd worden.

De reeds genoemde N.C.H. Verdam geeft in een vertaling van het werk van E.F. Scholl een beschrijving van de op dat moment in opkomst zijnde stoomturbine van C.A. Parsons. "G.A. Parsons schijnt het eerst geslaagd te zijn in het construeeren van zulk een stoomturbine, die een bevredigend rendement had.

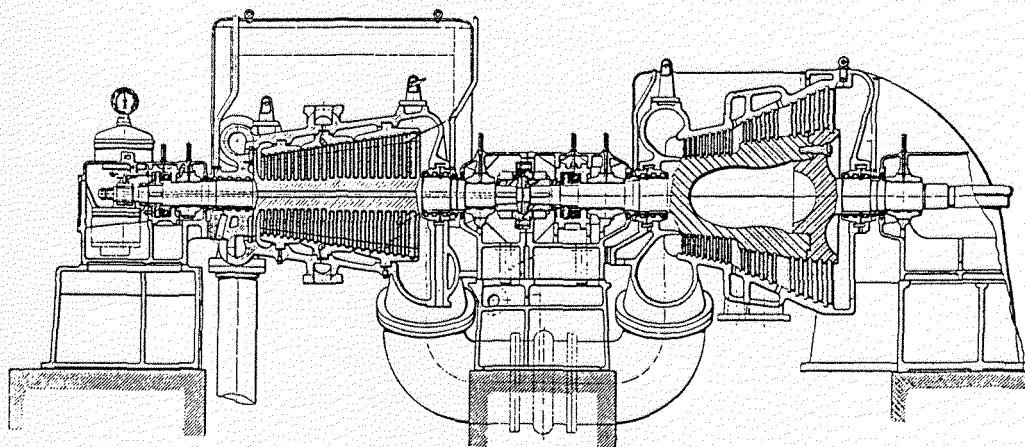
G. van Hooff, *In het rijk van de Nederlandse vulcanus* (Amsterdam 1990), 190 (tabel 35) en 191.

Werkspoor 1827-1952, 89-90.

Stoom, 408, voetnoot 1.

idem, 396.

Oorspronkelijk maakten zijn motoren 10.000 à 13.000 omw. en werd de stoom achtereenvolgens door een reeks van schoepenraden evenwijdig met de as gevoerd (axiaal-turbine). Later heeft hij de inrichting in zooverre gewijzigd, dat de stoom loodrecht op die richting intreedt (radiaal-turbine) en het aantal omw. verminderd is tot 4500 à 5000, terwijl nu ook condensatie van den stoom werd toegepast. Deze machine wordt meestal direct gekoppeld met met een wisselstroom-dynamo."⁶² Enkele pagina's daarvoor had Verdam al de ontstaansreden en de essentie van de beide principes geschetst: "Sedert eenige jaren is men echter in geheel andere richting geslaagd het vraagstuk der roteerdende stoommachine op te lossen, nl. door geheel en al af te zien van het mechanisme van zuiger en cylinder, en den stoom zijn arbeid te doen verrichten in eene turbine, hetzij dan door zijn druk als in de stoomturbine van Parsons, hetzij door zijne snelheid in die van De Laval."⁶³



Afbeelding 15 Doorsnede van een Parsons aftapstoomturbine, verdeeld over twee turbinehuizen.

De Parsonsturbine kenmerkt zich door een rotor (loopwiel) met loopschoepkransen die tussen de keerschoepen (of leischoe-
pen) heen draaien. Deze leischoepen zijn in het turbinehuis
bevestigd. De drukval - het verschil tussen begin- en einddruk
- vindt zodoende in meerdere trappen plaats over de gehele

Scholl, De gids, 409.

idem, 337, cursievering wh.

rotor, in kleine stapjes per leischoep-loopschoep paar. Hierdoor zijn stoomsnelheid en rotorsnelheid beduidend lager.

De essentie van de machine van De Laval geeft Verdam verder als volgt weer: "Wanneer stoom van een zekere spanning door een konisch, zich verwijdend mondstuk, uitstroomt in een ruimte, waarin een geringeren spanning heerscht, dan zal deze stoom met een zeer groote snelheid uitvloeien."⁶⁴ Deze snelstromende stoom wordt geleid naar een wiel met schoepen dat vervolgens een zeer groot toerental krijgt. Volgens Verdam liggen deze snelheden tussen de 30.000 omwentelingen per minuut voor machines van 5 pk en 7.500 omw. per minuut voor machines van 300 pk.⁶⁵ Bij deze turbine vindt de drukval in een enkele trap plaats over de straalbuis. De stoomdruk voor het loopwiel is gelijk aan de stoomdruk achter het wiel.

Met de uitvindingen en toepassingen van Parsons en De Laval is de eerste indeling van de stoomturbine - die naar werkwijze of de manier waarop de stoom expandeert - mogelijk. De naar Parsons genoemde uitvoering heet overdrukturbine of reactieturbine, die naar De Laval is de gelijkdrukturbine of impulsturbine. Later is er door de Fransman Rateau een turbine ontwikkeld die beide principes in zich verenigde. Dit was een turbine waarbij als het ware een aantal in serie geschakelde gelijkdrukturbines die elk op verschillend drukniveau werkten.

Een ander type turbine is de Curtis-turbine, genoemd naar de Amerikaan Curtis, die één snelheidstrap (de straalbuis) combineert met meerdere (2 of maximaal 4) op één wiel aangebrachte druktrappen. Beide turbines typen kunnen echter op een andere wijze - typologisch gezien - ingedeeld worden zodat ze niet als aparte typen voorkomen.

Ook het tweede indelingskriterium volgt uit de omschrijving van de turbines zoals Verdam die geeft. Het betreft de expansie van de stoom over een enkele trap of over meerdere trappen. Een trap is hierbij een combinatie van straalbuis en loopschoep(en) op een wiel in een De Laval of Curtis turbine, of een loopschoep - leischoep samenstelling in een Parsons

idem, 410.

idem, 411.

turbine. In de praktijk zal een Parsons turbine altijd meertrappig zijn.

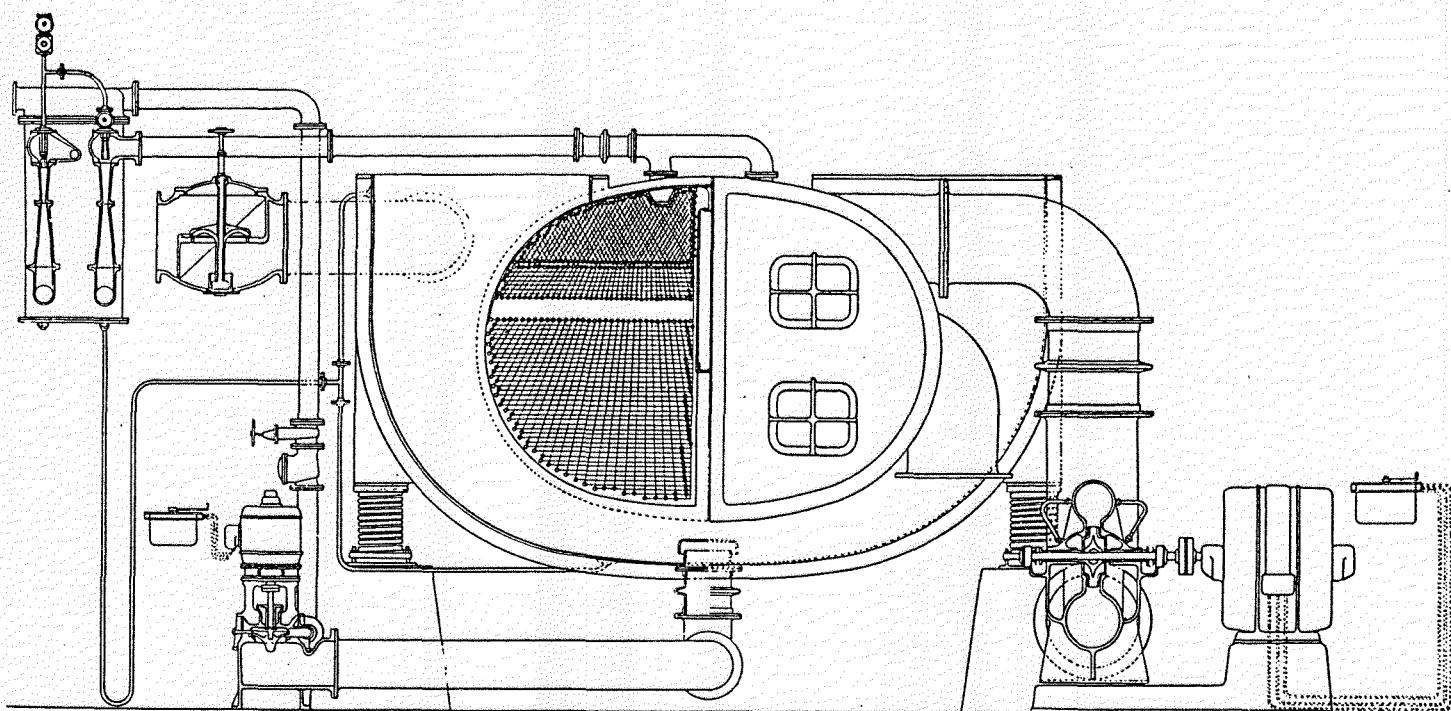
Uit de beschrijving van Verdam is nog een derde indeling de distilleren. Deze heeft betrekking op de stroomrichting van de stoom ten opzichte van de rotoras. Wanneer deze stoomstraal gericht is evenwijdig met de rotoras spreekt men van axiaal-turbines, wanneer de stoomstroom er loodrecht op staat spreekt men van radiaal-turbines. De Zweed Ljungström heeft in de negentiende eeuw op dit laatste type patent gekregen. Deze machine wordt ook dubbel-rotatie turbine genoemd, omdat iedere helft van de rotorschijf een andere richting op beweegt. Er is nog een derde, weinig toegepaste manier waarbij de stoom tangenciaal (dat is aan (een deel van) de omtrek van de rotor) het wiel aandrijft. Een dergelijke machine is bijvoorbeeld ontwikkeld door Terry.

Behalve dat de stoom t.o.v. de rotor stroomt, kan het ook op verschillende wijzen door het turbinehuis stromen. Hierbij zijn er drie mogelijkheden: de enkelstroomturbine, waarbij het van begin tot eind op dezelfde wijze door het turbinehuis stroomt; dubbelstroomturbine (of diaboloturbine), waarbij de stoom in midden wordt toegelaten om vervolgens in twee tegengestelde richtingen door het turbinehuis te stromen en de meerhuizige- of compoundturbine, waarbij de stoom door twee of meer separate turbinehuizen stroomt. Hierbij kunnen de rotoren van de verschillende turbines in elkaars verlengde liggen (tandem opstelling) of de rotoren kunnen middels een tandwielkast het vermogen afstaan. De laatste vorm van stoomstroom is de re-entry of herhaalde-stroom turbine waarbij de stoomstraal enkele malen door hetzelfde schoepenwiel wordt geleid.

Een vierde en laatste hoofdcategorie voor de indeling van turbines heeft te maken met de manier waarom de turbine in het gehele stoomkring gebruikt wordt. Evenals dit bij de zuiger-stoommachine het geval was kan dus een indeling gemaakt worden naar tegendrukmachine, condensatiemachine en aftapmachine. De verschillende redenen voor de specifieke toepassing van een dergelijke machine is reeds bij de behandeling van de zuigerstoommachine gegeven. Turbines met aftapstoom kunnen zowel condensatieturbines als tegendrukturbines zijn.

In bijlagen 6 en 7 worden de verschillende mogelijkheden schematisch weergegeven, waarbij in schema bijlage 7 wederom een ingevuld 'voorbeeld' is gegeven.

Tot slot van dit hoofdstuk over de indeling van stoomketels en -machines, volgt onderstaand een aantal opmerkingen over de bijkomende apparaten voor een goede werking van de stoominstallatie als geheel. Met name condensatiemachines en aftapmachines behoeften nog een groot aantal apparaten en werktuigen voor een goede werking van het geheel. Bij wijze van voorbeeld zal er slechts één, zij het zeer belangrijk apparaat, behandeld worden.



Afbeelding 16 Vooraanzicht van een condensor, voor het onderhouden van het vacuum voor stoominstallaties van groot vermogen.

Zoals al een enkele keer in de is tekst voorgekomen, is de condensor onontbeerlijk voor condensatiemachines. De condensor is een bijzondere soort warmtewisselaar: hij heeft tot doel om een druk te onderhouden die lager is dan de normale luchtdruk. Er zijn twee typen condensers: inspuitscondensers, waarbij de stoom verdicht wordt door het inspuiten van koelwater en oppervlakte condensers, waarbij de stoom verdicht wordt door water dat langs een oppervlakte (platen of pijpen) stroomt

waaraan de andere zijde de stoom zich bevindt. De stoom expandeert in een condensor op een lager warmteniveau, waardoor de totale rendement van de installatie toeneemt. Om dit vacuüm te onderhouden zijn luchtpompen of ejectors noodzakelijk. Bij zuigerstoommachines werden meestal luchtpompen gebruikt, die direct door de machine gedreven werd. Al in het begin van de negentiende eeuw was dit principe bekend. Vooral bedrijven die beschikten over voldoende koelwater - uit bijvoorbeeld een nabij gelegen rivier - konden hiervan gebruik maken.

Samenvattend kunnen er met betrekking tot stoomkracht enkele ontwikkelingen geschetst worden. Vanaf het derde kwart van de achttiende eeuw is er de toename van stoomdruk en stoomproductie in de stoomkracht installaties. Een groei die tot op heden doorgaat. Door de vraag naar grotere vermogens en lager brandstofverbruik kwamen verschillende typen (zuiger)stoommachines op. Van de atmosferische machine, via de Wattse machine, naar de hogedruk machine. De ketels konden hierbij niet achterblijven. De eerste wagonketel werden vervangen door de Cornwallketel en de bouilleurketel, die op hun beurt vervangen werden door waterpijpketels en flessenketels. In het warmteproces zijn de toepassing van oververhitte stoom en de opkomst van de stoomturbine, beide aan het einde van de vorige eeuw, factoren die de stoomkracht de twintigste eeuw in stuwten. Aan het eind van de negentiende eeuw lopen de toekomstige opponenten van de stoomkracht zich al warm. Over de typologie van één van die opponenten, de verbrandingsmotor, gaat het volgende hoofdstuk.

Inleiding

De interne verbrandingsmachine opnemen als een afzonderlijk krachtwerktuig kan gerechtvaardigd worden doordat deze machine in thermodynamisch opzicht in uitvoering sterk van de stoommachine verschilt. De aanwezigheid van een stoomketel is noodzakelijk voor de werking van een stoommachines. De interne verbrandingsmachine, hierna te noemen motor voor de interne verbrandingsmotor en gasturbine voor een roterende machine met interne verbranding, werken geheel door een in de machine zelf opgewekte krachtontwikkeling. De voordelen zijn hierdoor dat de machineinstallatie als zodanig kleiner kan zijn dan bij stoominstallaties. Meestal is de installatie ook eenvoudiger te bedienen en efficiënter in gebruik. Zeker geldt dit voor de gasturbine die een zeer kleine volume weet te koppelen aan een zeer groot te ontwikkelen vermogen. In paragraaf 2.1. zal ingegaan worden op de typologie van de interne verbrandingszuigermotor. Vervolgens - in paragraaf 2.2 - wordt zeer kort de typologie van de gasturbine geschetst.

2.1. Interne verbrandingsmotoren

De verschillen tussen de stoommachines en de verbrandingsmotor laten zich tekenen door een verschillende wordingsontwikkeling. Was de stoommachine al in de achttiende eeuw in gebruik, de motor zou pas na 1860 sterk opkomen als krachtbron. De eerste fase van deze ontwikkeling, vanaf 1860, betreft de opkomst van een motor die gas als brandstof had. De tweede fase wordt gekenmerkt het gebruik van vloeibare brandstoffen als benzine, petroleum en spiritus. Dit begon in de jaren '80 van de vorige eeuw. De derde en laatste fase is de opkomst van motoren die diesel en zwaardere oliën gebruiken als brandstof.

De gasmotor heeft zich dankzij de benzine kunnen ontwikkelen tot de meest geproduceerde motor ter wereld: in bijna iedere personenauto zit tegenwoordig een dergelijk motor. De dieselmotor, die op een ander verbrandingsprincipe gebaseerd is, is

hedentendage eveneens springlevend. Vooral in tractie en scheepvaart werd en wordt deze motor veel gebruikt. Voor stationaire toepassingen is de interne verbrandingsmotor minder voorkomend dan verwacht zou kunnen worden. Van het totaal van de 532 'TM' (trunkzuiger) motoren die tussen 1930 en 1950 bij Werkspoor gebouwd zijn was slechts een kwart van voor stationaire doeleinden, gemalen en energiecentrales. De rest kwam voor rekening van de scheepvaart.¹ Het betreft hier motoren van een vermogen tussen ongeveer 60 en 160 pk per cilinder. Waarschijnlijk is dit meer dan voor het stationaire bedrijf in het klein- en middenbedrijf aan vermogen nodig was. In deze periode heeft tevens de elektrificatie van Nederland bijna zijn voltooiing bereikt, waardoor de keuze voor stationaire drijfkracht eerder op de elektromotor zal zijn gevallen, dan op de verbrandingsmotor.

De typologie van de interne verbrandingsmotor laat zich zoals al aangegeven in eerste instantie splitsen in de zuigermachines en de roterende machines. Een eerste indeling die ook bij de stoommachines gehanteerd is. De volgende indelingsstappen worden gezet in twee verschillende richtingen: de constructie en de uitvoering van het arbeidproces - de werking - van de machine. Met name dit laatste zorgt voor de verschillen tussen de motoren onderling. Het verschil in werking wordt in eerste instantie veroorzaakt door de gebruikte brandstof.

De historische ontwikkeling hierin is, zoals reeds boven enigszins aangegeven, ten eerste het gebruik van gas, vervolgens benzine, petroleum of spiritus. Deze brandstoffen leiden tot machines die een externe energiebron nodig hebben om de ontbranding of explosie te veroorzaken. Dit zijn de zogenaamde mengselmotoren, omdat zich bij aanvang de compressie een mengsel van lucht en gasvormige brandstof in de cilinder bevindt. Ten tweede resulteert het gebruik van ruwe olie - dieselolie en later stookolie tot machines die door een hoge eindcompressiedruk zelf de explosie inleiden. Dit zijn de zogenaamde inspuitmotoren. De brandstof petroleum vervult hierin een dubbelrol. Voor deze brandstof is een tussenvorm motor ontwikkeld: de middeldruk motor, beter bekend als onder meer gloeikopmotor.

¹ Werkspoor 1827-1952, 68 figuur 17.

Aangezien het drijfwerk voor de drie typen machines niet verschillend hoeft te zijn, zal eerst in het kort iets over de mogelijke uitvoeringen gezegd worden. Kort, omdat een groot deel hiervan reeds bij de behandeling van de zuigerstoommachine ook aan bod is gekomen. Daarna volgt een beschrijving van zowel de mengselmotor en de inspuut- of dieselmotor.

Het gebruik van de gasmotor in Nederland is tot de jaren '90 van de negentiende eeuw nog niet erg verbreid. Volgens Van Hooff was een aantal Otto en Langen machines actief in het midden- en kleinbedrijf.² Hij noemt echter geen type, maar gezien de periode - voor 1872 - moet dit wel de atmosferische machine geweest zijn. Dit type machine heeft de kritieken des tijds niet kunnen overleven: na ongeveer 1880 was zijn rol uitgespeeld.

Uit de onvolledige registers van het stoomwezen en het patentrecht komt een aantal cijfers naar voren met betrekking tot de verspreiding van gasmotoren in 1880 en 1890. In Nederland waren er in die twee jaren respectievelijk 5 en 22 gasmotoren in bedrijf. In 1880 waren dit er 2 voor de houtnijverheid en 3 voor de metaalindustrie. In 1890 was dit toegenomen tot 6 in de houtnijverheid, 1 in de leernijverheid, 11 in de metaalindustrie en 4 in de voedingsmiddelenijverheid.³ Vergelijken met het totaal aantal krachtbronnen is dit eigenlijk te verwaarlozen: in 1880 waren er volgens dezelfde bronnen 2737 krachtwerktuigen in bedrijf en in 1890 waren het er 3925.⁴ Opmerkelijk is dat De Jonge stelt dat na 1900 voor het gebruik van de gasmotor daalt. In zijn woorden luidt het: "Het aantal geïnstalleerde gasmotoren bereikte echter al spoedig een hoogtepunt, omdat na 1900 de gasmotoren in vele gevallen alweer vervangen werden door de inmiddels op de markt gekomen elektromotoren".⁵ Een tabel van Van Hooff geeft echter aan dat het aantal gasmotoren, dat op het openbare gasnet werd aangesloten na 1900 nog steeg. Hoe dat in relatie staat met de

² G. van Hooff, *In het rijk van de Nederlandse vulcanus* (Amsterdam 1990), 200.

³ H.W. Lintsen, *Techniek in Nederland*, VI (Zutphen 1995) bijlage, 277.

⁴ *idem*, 270.

⁵ De Jonge, *Industrialisatie*, 183.

groei van de elektromotor is - naar mijn weten - niet bekend. De cijfers van Van Hooff zijn in tabel 2.1. weergegeven.⁶ Wat opvalt is dat het vermogen per motor in twintig jaar stijgt met een factor 2,4.

Tabel 2.1 Aantal lichtgasmotoren op openbaar gasnet.⁷

jaar	aantal	pk	gem pk/motor ⁸
1895	932	3314	3,556
1903	2570	15000	5,837
1907	2807	18296	6,518
1910	2882	18856	6,543
1914	3109	26516	8,529

Voor de groei van het aantal Kromhout dieselmotoren tussen 1905 en 1940 geeft Westermann een uitgebreid overzicht.⁹ De motorenfabriek Kromhout produceerde voornamelijk motoren van laag tot gemiddeld vermogen voor de scheepvaart, maar ook machines voor het stationaire bedrijf werden vervaardigd. In onderstaande tabel (2.2) zijn deze cijfers gereproduceerd.

Tabel 2.2. Gebouwde Kromhoutmotoren tussen 1905 en 1940

type motor	periode	I	II	III	IV	V
2takt benzine	1902-1905	2	28	14	6	4,7
2takt petroleum	1905-1920, 1926-1929	577	14724	26	697	21,1
2takt ruwe olie	1910-1915, 1934	438	17198	39	552	31,1
2takt middendruk	1913-1939	5367	238393	44	7561	31,5
2takt hogedruk	1918, 1926-1940	1692	85288	50	3078	27,7
4takt Gardner	1932-1940	1955	104689	54	7627	13,7
Genet Major	1939-1940	50	8250	165	350	23,6

Kolom I is het aantal gebouwde motoren; kolom II het totaal aantal paardenkrachten van al deze motoren; kolom III het gemiddeld aantal pk's per cilinder; kolom IV het totaal aantal cilinders; kolom V geeft het vermogen per cilinder weer. Kolommen III en V zijn door mij [wh] toegevoegd.

Van de eerste tienduizend motoren waren 1.270 motoren (minder dan 13%) bestemd voor stationaire doeleinden. Verreweg de meeste motoren werden geplaatst in schepen (7.038 stuks).¹⁰

2.1.1. Het drijfwerk

In de vroege periode van de verbrandingsmotor is veel van het loopwerk gebaseerd op de stoommachine. Zo had de eerste Lenoir

⁶ Van Hooff, *In het rijk*, 202; tabel 37.

⁷ idem, 202 tabel 37.

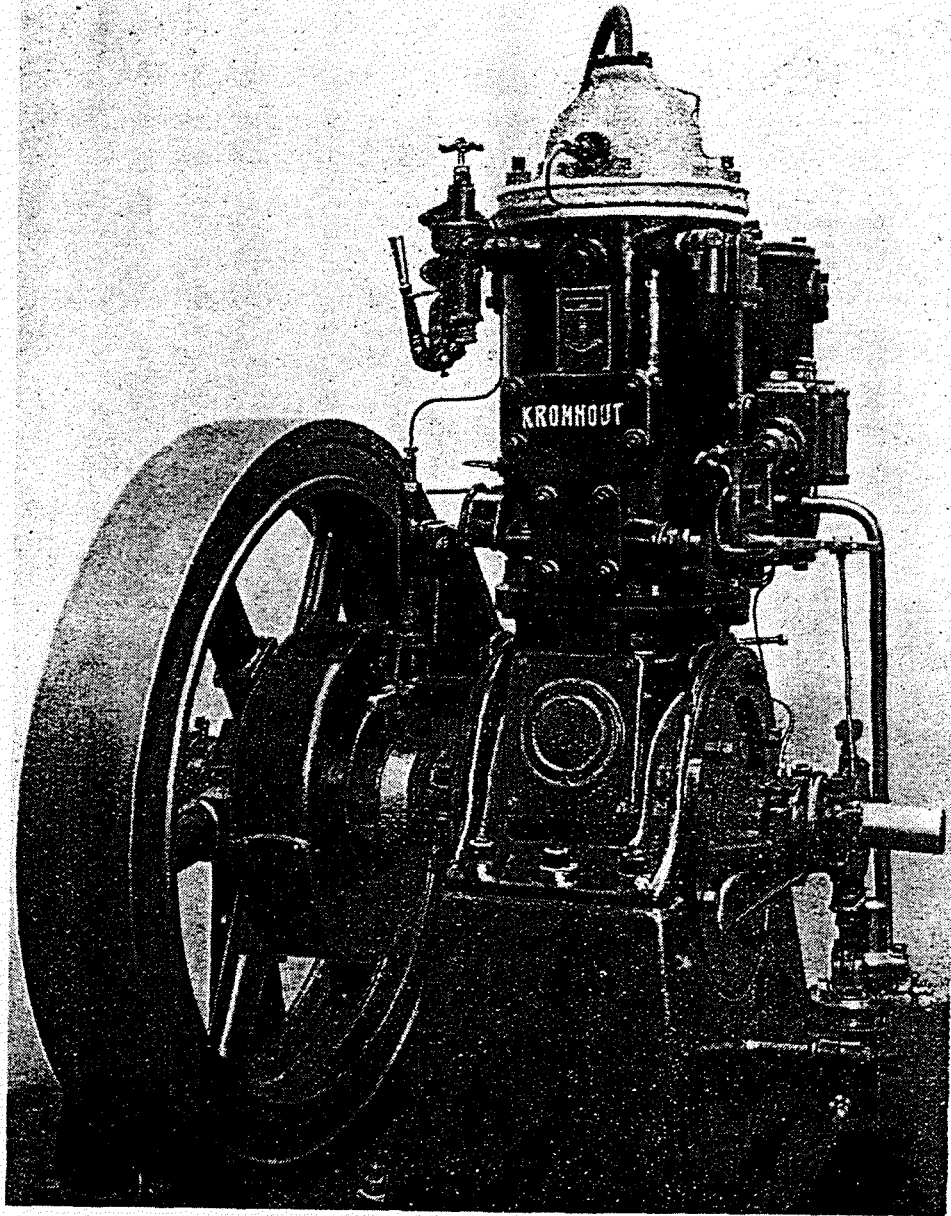
⁸ door mij toegevoegde kolom.

⁹ J.C. Westermann, *Kagen, clippers, werven en motoren*, (Amsterdam 1942) bijlage 1 (280).

¹⁰ idem, 278.

machine uit 1861 een liggende constructie van zuiger, zuigers-
tang, drijfstang, kruk en vliegwiel. De geleiding tussen de
drijfstang en de zuigerstang was het uit de stoommachine
bekende kruishoofd. Dit kruishoofd echter verdween al spoedig
om pas met de opkomst van de langzaamlopende motoren, met
toerentallen lager dan zo'n 200 omwentelingen per minuut, weer
aan een opmars te beginnen.

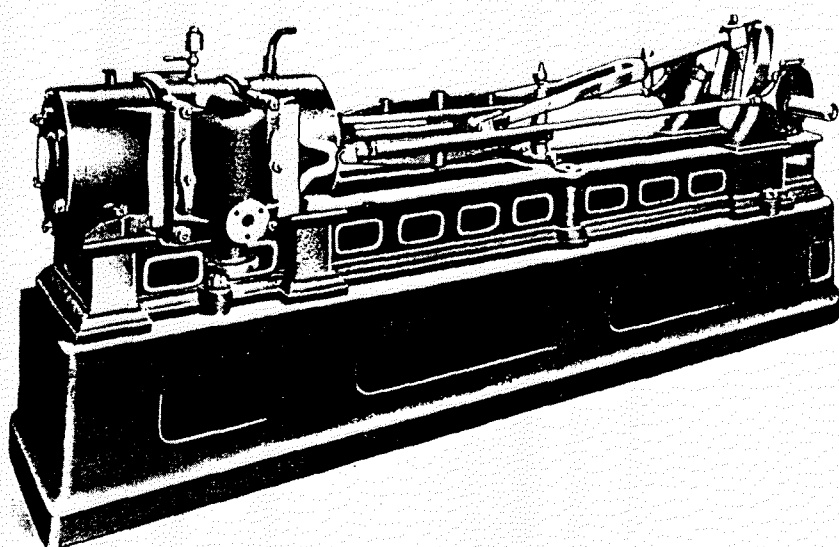
De machine
van Lenoir
is een
liggende,
horizontale
machine. De
toe- en
afvoer van
de gassen
werd door
een
schuifmecha-
nisme
bediend.
Voor
gasmotoren
zou dit
lange tijd
de
opstelling
blijven.
Ook de Otto
en Langen
gasmotor,
ontwikkeld
rond 1878
heeft deze
vormgeving.
H.A. Romeyn



Afbeelding 17 Kromhout eencilinder middendrukmotor. Opvallend is het grote vliegwiel.

geeft hiervan een beschrijving.¹¹ Romeyn geeft ook een beschrijving van de reeds genoemde atmosferische machine van Otto en Langen.¹² Deze machine was vertikaal opgesteld, met een op- en neergaande zuiger, die via een tandheugel en ratelkoppeling een krukas met twee vliegwielen aandreef. Ondanks het geringe vermogen - tussen de half en twee paardenkrachten - en het enorme kabaal dat de overbrenging maakte, werden van dit type Otto en Langen machine 2649 stuks in de jaren tussen 1864 en 1882 gebouwd. De grootste jaarproductie van de gasmotorenfabriek in Deutz was van augustus 1875 tot juni 1876 met 634 stuks. Na de komst van de bovengenoemde Otto en Langen liggende viertakt gasmotor daalde de produktie zeer sterk.¹³

Romeyn merkt op dat de meeste gebruikte machines liggende machines zijn. De "staande machine wordt echter alleen maar uitgevoerd bij kleinere machines, en dan nog slechts, wanneer men aan eene zeer beperk-



Afbeelding 18 Liggende Lenoir gasmotor uit 1860.

te plaatstruimte gebonden is."¹⁴ Tevens konden horizontale machines 'solider' worden opgesteld en waren de delen toegankelijker. Bij kleinere gasmotoren ontbrak het kruishoofd. De trunkzuigermotoren zouden snel terrein winnen. Zeker na de komst van de dieselmotor zijn nagenoeg alle stationaire machines trunkzuigermotoren. Liggend uitgevoerd wanneer het de

¹¹ H.A. Romeyn, *De hedendaagsche motoren voor gas, benzine, petroleum, en spiritus* (2e verbeterde en vermeederde druk, Leiden 1914), 73.

¹² Romeyn, *De hedendaagsche motoren*, 33-34.

¹³ C.L. Cummins Jr., *Internal fire*, (Lake Oswego 1976), 150.

¹⁴ Romeyn, *hedendaagsche motoren*, 73-74.

grotere vermogen betrof en de staande uitvoering voor de kleinere typen. Op het moment dat de gasmotor geheel van het toneel was verdwenen, werden ook de liggende machines een zeldzaamheid. Zo zijn bijvoorbeeld alle door Kromhout gebouwde motoren vertikaal opgesteld.¹⁵

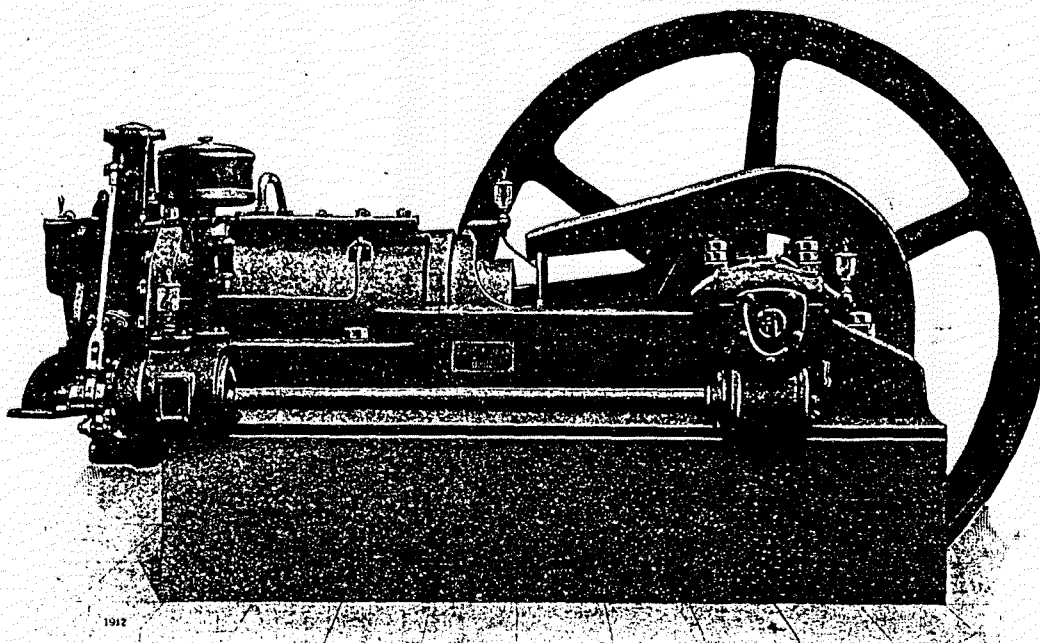
Een tweede criterium voor een indeling van het drijfverk is het aantal en de onderlinge opstelling van de cilinders. Waren de eerste motoren één-cilinder motoren, latere motoren hadden meestal meer cilinders die werkten op dezelfde krukas. Voor de onderlinge standen tussen de cilinders is een aantal benamingen in gebruik gekomen. Zo heten motoren waarbij de cilinders in het vlak en aan dezelfde zijde van de krukas liggen lijnmotoren. 'V'-motoren zijn motoren waarbij de cilinders een onderlinge hoek maken. Verder zijn er nog ster-motoren die met name voor de vliegtuigbouw zijn ontwikkeld; boxermotoren voor auto's en motorfietsen (waarbij de cilinders in het zelfde vlak liggend maar tegengesteld gericht zijn ten opzicht van de krukas) en motoren met twee tegengesteld bewegende zuigers in een cilinder, waarbij er in plaats van een, twee krukassen zijn, de zogenaamde Doxformotoren of motoren van Öchselhäuser. Zoals uit de korte opsomming blijkt zijn deze laatsten eigenlijk allemaal ontwikkeld voor andere toepassingen dan voor het stationaire bedrijf.

2.1.2. De gasmotor

De eerste produktieve ontwikkeling van de interne verbrandingsmotor werd gemaakt door Jean Joseph Etienne Lenoir. Hij bouwde in 1860 een werkende machine waarbij de drijvende warmte in de machines zelf werd opgewekt. De zogenaamde interne verbrandingsmachine. Qua constructie van het loopwerk en de sturing van de gassen toonde deze machine zeker enige gelijkennis met de liggende stoommachine van die tijd. Zijn landgenoot Pierre-Constant Hugon ontwikkelde in 1865 een staande gasmotor die op overeenkomstige wijze werkte. Daar waar de stoommachine zijn kracht ontleende aan de druk en expansie van de stoom, ontleende de explosiemotor van Lenoir - en de gasmotoren in

¹⁵ J. Goedkoop, 'De ontwikkeling van den Kromhout-Motor van 1901 tot op heden' in: J.C. Westermann, *Kagen, clippers, werven en motoren* (Amsterdam 1942), 284-316.

het algemeen - de drijvende kracht aan de verbranding van gas en de daarmee gepaard gaande volumevermeerdering.



Afbeelding 19 Deutz liggende gasmotor uit 1912.

De gasmotor wordt gevoed door een mengsel van gas en lucht. Deze wordt in ongeveer een mengverhouding van een op vijf tot zeven door middel van kranen en kleppen aan de cilinder toegelaten. Dit mengsel wordt tijdens de inlaatslag door de zuiger zelf de machine ingezogen. De zuiger doet dit zonder 'hulp van buitenaf' en motoren die op deze manier de cilinder met gas vullen heten zelfaanzuigende motoren. Dit in tegenstelling tot de bij de dieselmotor te behandelen motoren met drukvulling.

Na de inlaatslag volgt de compressieslag met de explosie die veroorzaakt wordt door een vonk van een bougie. De eerste gasmotoren, zoals die van Lenoir en Hugon waren dubbelwerkend, dat wil zeggen dat zowel aan de bovenzijde (dekselzijde) van de zuiger, als aan de onderzijde (krukaszijde) een verbranding plaatsvond in tegenstelling tot enkelwerkende machines. Die verbranding van het gasmengsel voltrekt zich zo heftig dat dit type motor ook explosiemotor genoemd wordt. De eerste gasmotor van Lenoir was dubbelwerkend en daardoor ontstond een grote warmteontwikkeling in de cilinder. Er was een aanzienlijke hoeveelheid koelwater nodig om de machine enigszins goed te laten werken.

De staande, atmosferische motor van Otto had één verbranding per asomwenteling en is hierdoor te kenmerken als een twee-takt motor. De later geproduceerde Otto gasmotor van 1878 was een viertakt motor. Deze was zodanig geconstrueerd dat er twee asomwentelingen nodig waren voor één arbeidsslag. Na het verdwijnen van de Lenoir machine - dat met een beetje goede wil als een eentakt motor gezien kan worden - zijn er alleen nog maar twee- en viertakt machines gebouwd.

Voordat de werking van de benzine-, petroleum- en spiritus-motor beschreven wordt, moet eerst nog kort iets gezegd worden over de gebruikte gasvormige brandstoffen. Aan het eind van de vorige eeuw waren enkele soorten gassen in gebruik. De bekendste is natuurlijk het lichtgas, dat voor de verlichting van straten en huizen en gebouwen gebruikt werd. Het werd onttrokken aan steenkolen die in luchtdichte retorten 'gekookt' werd. Het zo geproduceerde lichtgas bestond voor een groot deel uit "zware koolwaterstoffen, en verder waterstof, kooloxyd en geringe hoeveelheden zuurstof en stikstof".¹⁶ Daarnaast was er nog het luchtgas of generatorgas, watergas en menggas of krachtgas, genoemd al naar gelang de verhouding tussen de samenstellende bestanddelen. Tevens kon het gas onder druk staan, het zogenaamde drukgas of Dowsongas of kon het gas onder lagere dan atmosferische druk beschikbaar zijn: het zogenaamde zuiggas.¹⁷ Voor de opwekking van het gas waren vaak omvangrijke installaties nodig.

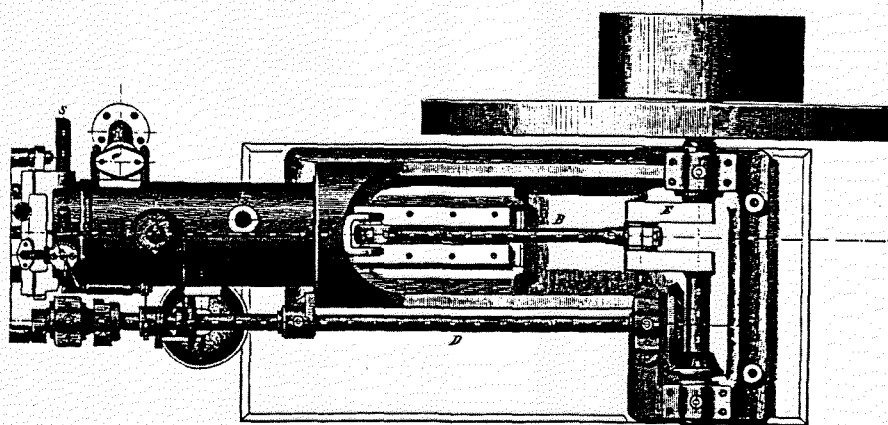
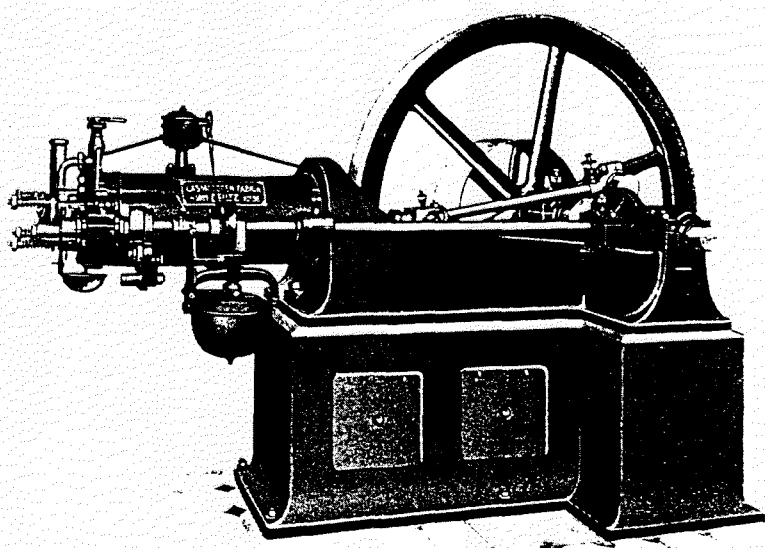
2.1.3. De petroleum-, spiritus- en benzinemotor

Het werkingsprincipe van een petroleum, spiritus of benzine-motor verschilt niet met dat van een gasmotor. Echter, om de motor op de - bij atmosferische condities vloeibare - brandstoffen te laten werken is een extra voorziening nodig. De vloeistof moet eerst worden omgezet in gas alvorens het zich met de verbrandingslucht vermengt en in de cilinder gelaten kan worden. Deze extra voorziening is de carburator. Benzine, spiritus en soms petroleummotoren zijn dus - evenals gasmoto-

¹⁶ Romeyn, *hedendaagsche motoren*, 36.

¹⁷ *idem*, 36-49.

ren - mengselmotoren en explosiemotoren, met verbranding onder lagere druk.

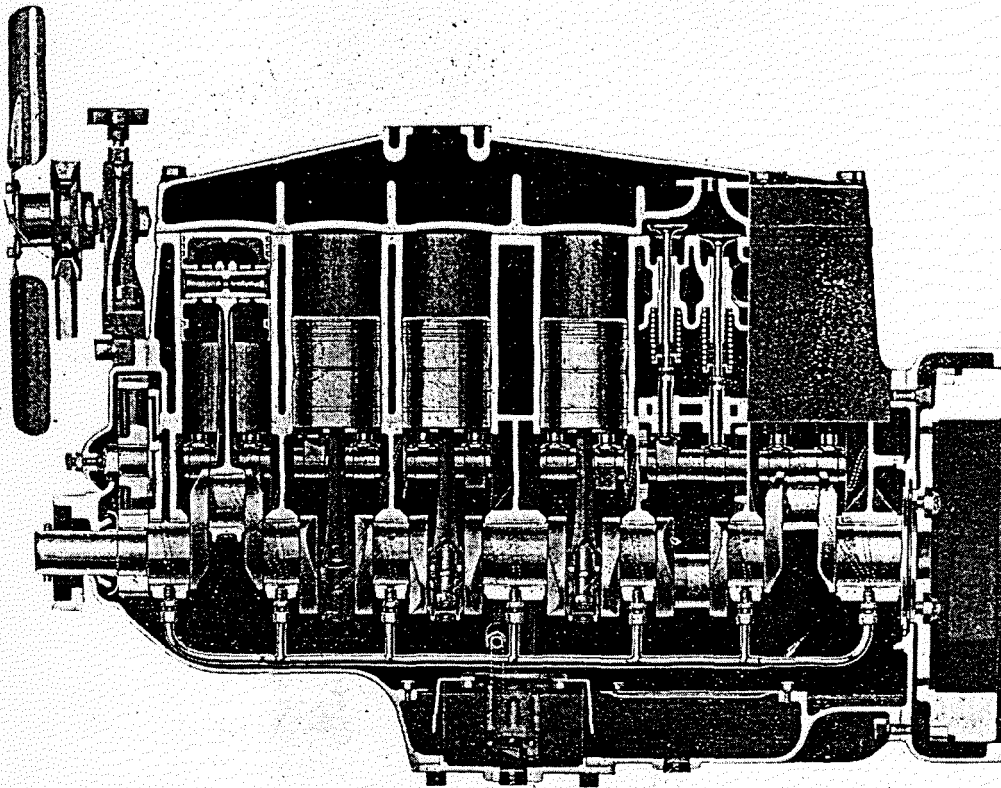


Afbeelding 20 Otto viertakt gasmotor uit 1877, deze motor werd in serie gebouwd.

De reeds kort aangehaalde tussenvorm is een verdere ontwikkeling van de petroleummotor tot de gloeikopmotor. Hierbij wordt het principe van de brandstofinspuiting toegepast zoals dit bij de moderne dieselmotor gebruikelijk is. Een groot verschil is echter dat de compressiedrukken van de gloeikopmotor nog niet zo hoog zijn (tussen de 6 en 8 bar), dat direct na inspuiting van de petroleum de brandstof verdampt en verbrand. Om de verbranding in te leiden is er op dit type motor een vrij massieve cilinderkop

bevestigd die voor deze energie zorgt. Alvorens de machine gestart kan worden, moet deze kop, met bijvoorbeeld een gasbrander, verwarmd worden. De kop wordt tijdens het bedrijf warmgehouden door de verbranding van de petroleum in de cilinder.

Van dit type motor dat in de eerste jaren van deze eeuw zijn intrede deed, zijn vooral van het Zweedse merk Bolinder zeer veel motoren gebouwd.



Afbeelding 21 Zescilinder Hercules benzinemotor.

2.1.4. De dieselmotor

Een laatste fase in de vroege ontwikkeling van de interne verbrandingsmotor gaat in met de komst van de dieselmotor. Dit type motor dankt zijn naam aan de Duitser Rudolf Diesel. In het zoeken naar een hoger rendement van de bestaande verbrandingsmotoren, kwam Diesel tot de conclusie dat dit mogelijk is door het verhogen van de verbrandingsdruk in de motor. Zijn eerste experimentele motoren werkten dan ook met een eindcompressiedruk van meer dan 30 bar. Een probleem hierbij was dat een mengsel van lucht en brandstof al voordat de machine zijn compressieslag had voltooid tot (zelf)ontbranding overging: de temperatuur liep te hoog, tot boven de 600 graden Celsius, op. Diesel zelf ondervond dit door de brandstof (petroleum) pas aan de lucht toe te voegen op het moment dat de zuiger de compressie van de lucht had voltooid. Deze werkwijze heet brandstofinspuiting. De verbranding die optreedt is er een die zich, vergeleken met de mengselmotor, over iets langere tijd uitstrekt bij ongeveer gelijk blijvende druk: het gelijkdruk proces. Na het uitvinden van 'zijn' motor zijn er geen funda-

mentele veranderingen meer aan de interne verbrandingsmotor gemaakt.

2.1.5. *Verbrandingscycli, inspuitingmethoden en spoelsystemen*
Diesels gelijkdruk verbrandingsmotor werkte volgens de vier-takt-cyclus van arbeidsslag, uitlaatslag, inlaatslag en compressieslag. De besturing van dit proces geschiedde door middel van twee kleppen die zich in de cilinderkop van de motor bevonden. Het viertakt principe werkt als volgt.

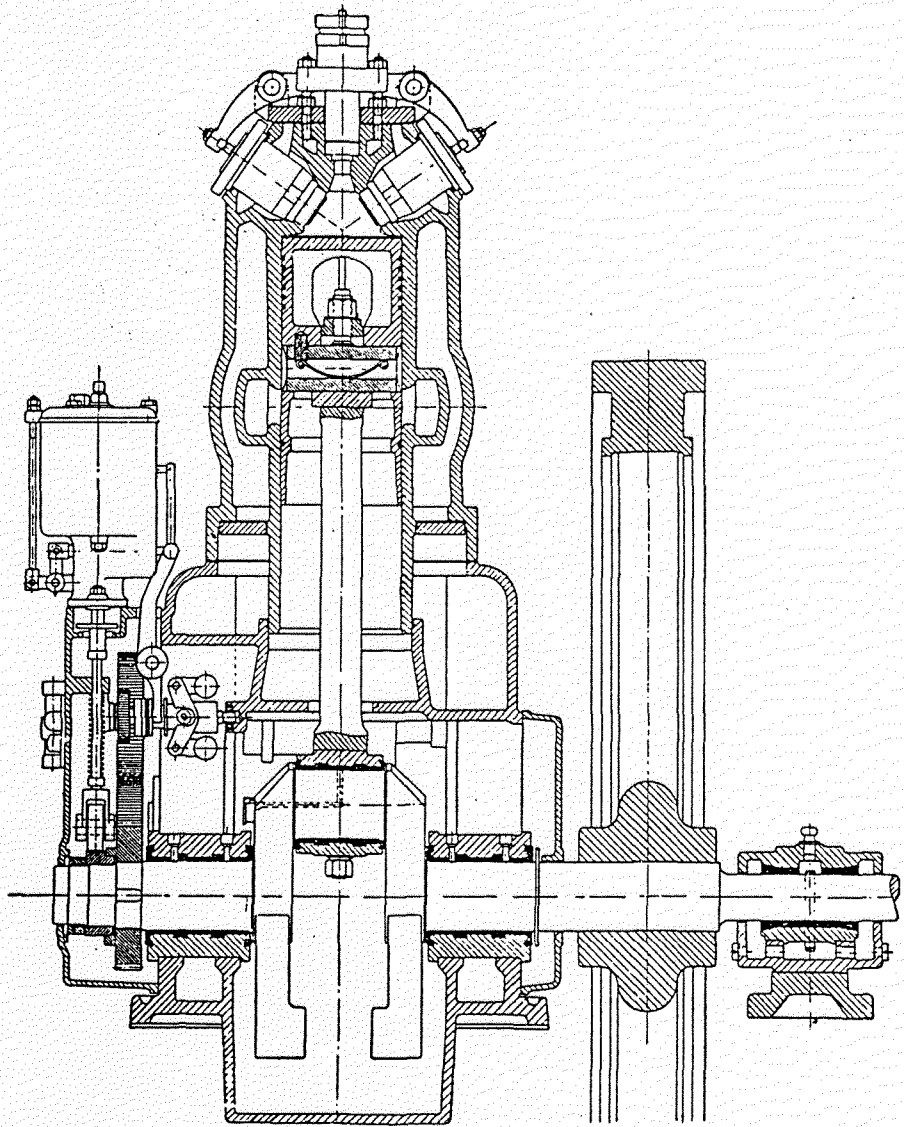
Tijdens de arbeidsslag zijn beide kleppen gesloten en beweegt de zuiger zich (enigszins versnellend) richting de krukas. Nadat de zuiger de onderste stand bereikt heeft, wordt door een kleplichtmechaniek de uitlaatklep geopend. De nu opwaartse beweging van de zuiger drijft de verbrandingsgassen uit de cilinder de buitenlucht in. Bij het keren van de bewegingsrichting van de zuiger wordt de inlaatklep geopend en de uitlaatklep gesloten. Verse lucht wordt door de neergaande zuiger aangezogen. Wanneer de zuiger in de onderste stand staat, sluit zich de inlaatklep en de nu weer naar boven bewegende zuiger drukt de ingesloten lucht samen. In de ruimte boven de zuiger stijgt de druk en temperatuur, totdat de lucht wordt aangevuld met de brandstof die daarna ontbrandt. De hierdoor nog verder stijgende druk (en temperatuur) werken op de zuiger. Deze versnelt en staat hierdoor arbeid af aan de krukas met daarop het vliegwiel en eventueel de arbeidsmachine. Aanvankelijk werd bij de dieselmotor de brandstof door een zeer hoge luchtdruk (van 60 à 70 bar) in de cilinder ingespoten (luchtverstuiving). Later geschiedde dit door het direct inspuiten van de brandstof (directe inspuiting). De Groninger J. Brons heeft op dit gebied aan het begin van de twintigste eeuw pioniersarbeid verricht.¹⁸

Verschillende uitvoeringen van motoren met drukverstuiving zijn op de markt gebracht. Zo zijn er, met name snellopende motoren ontwikkeld (met toerentallen hoger dan 1000 omwentelingen per minuut), die werkten met wervelkamers, voorkamers en luchtkamers in de cilinderdeksels om de lucht en de brand-

¹⁸ *Oliemotoren*, (5e druk, Groningen 1943), 8.

stofdeeltjes goed te laten mengen voor en tijdens de verbranding.

In de loop van de twintigste eeuw werden tal van kleinere onderdelen van de dieselmotor verbeterd en aangepast. Om een hoger vermogen te krijgen werd bijvoorbeeld al snel het tweetakt principe toegepast. Dit tweetaktprincipe, waarbij arbeidsslag en compressieslag elkaar afwisselen, leidde er op



Afbeelding 22 Dwarsdoorsnede van een trunkzuigerdieselmotor

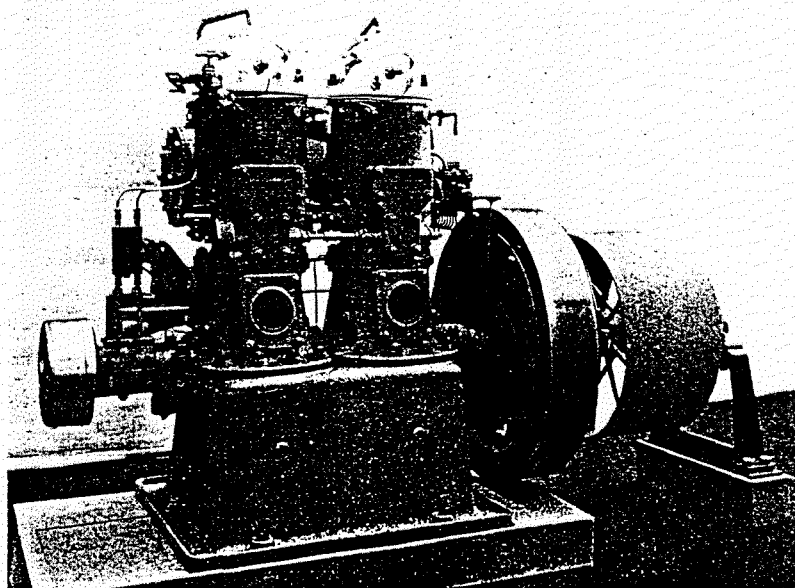
termijn toe dat op dieselmotoren drukvulling toegepast moest worden. Het onder druk toedienen van lucht was essentieel voor de werking van tweetakt motoren. Aanvankelijk werd als 'spoelpomp' de onderzijde van de zuiger gebruikt. Later geschiedde dit door het toepassen van externe pompen, al dan niet samenwerkend met de onderzijde van de zuiger(s). Deze drukvulling maakte het mogelijk om meer lucht, en dus meer brandstof in de cilinder te brengen. Hierdoor steeg het motorvermogen aanzienlijk bij gelijkblijvende afmetingen. Het rendement daalde overigens omdat de aandrijving van de luchtpompen arbeid kost. De Zwitser Adolf Büchi bracht hierin verandering: hij gebruik-

te de warmte van de uitlaatgassen om een turbine aan te drijven die vervolgens een compressor aandreef waarmee de lucht onder druk de cilinder in geblazen kon worden. Zijn eerste ideeën stamden uit 1905, maar kwamen pas in 1928 tot volle wasdom.¹⁹ Het totale rendement van de motor steeg hierdoor behoorlijk.

Een laatste belangrijk aspect bij de dieselmotor is de wijze waarop de lucht in en de uitlaatgassen uit de cilinder gelaten kunnen worden. De term die hiervoor gebruikt wordt is het spoelen en koelen van de cilinder en omringende delen. Bij de viertakt machine zal dit vrijwel altijd door middel van kleppen in het cilinderdeksel gebeuren. Bij twee-takt motoren is er nog een andere veel toegepaste mogelijkheid. Deze manier kenmerkt zich door het feit dat de zuiger zelf de toestroom van de lucht en

gassen toelaat, dan wel verhindert. Een motor die op deze wijze 'ademt' maakt gebruik van spoelpoorten. Deze poorten zijn in de cilinderwand aangebracht en staan in verbinding met de verbrandingsluchtleiding (de inlaatpoorten) of met de uitlaatgassenleiding (uitlaatpoorten). Nu kunnen

motoren zodanig uitgevoerd zijn dat ze gebruik maken van inlaat en uitlaatpoorten of van inlaatpoorten en (een) uitlaatklep(pen). Afhankelijk van de onderlinge ligging van poorten en kleppen ontstaan verschillende spoelsystemen. Enkele voorbeelden zijn: bij tegenover elkaar liggende inlaat- en uitlaatpoorten ontstaat dwarsspoeling, bij boven elkaar



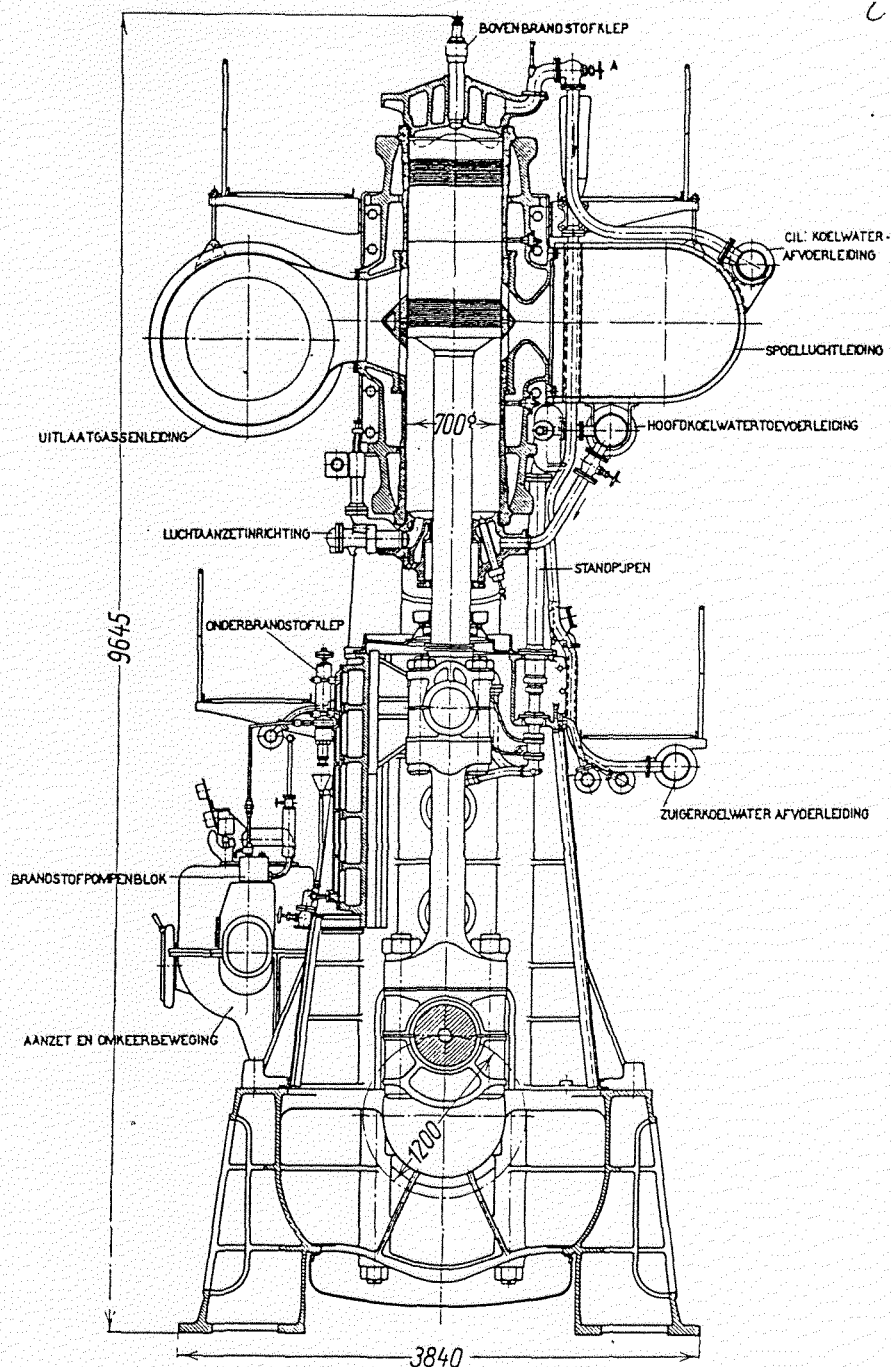
Afbeelding 23 Kromhout tweecilinder 2-takt stationaire middendrukmotor van 60pk.

¹⁹ H.W. van Tijen en C. Kapsenberg, *Scheepsolomotoren en gasturbines* (9e druk, Deventer 1956), 119.

liggende poorten onts-
taat rond-
spoeling, bij
inlaatpoort
en uitlaat-
klep ontstaat
langsspoeling
en bij
inlaat- en
uitlaatklep
ontstaat lus-
of keerspoe-
ling. Daar de
spoelwijze
een gevolg is
van de keuze
van de (on-
derlinge)
ligging van
de poorten of
kleppen,
wordt dit
kenmerk niet
als apart
kriterium
opgenomen.

In het bo-
venstaande
zijn de inde-
lings moge-
lijkheden .

voor een typologie van de interne verbrandingsmotor in vo-
gelvlucht de revue gepasseerd. In bijlage 8 is deze in de vorm
van een lijst weergegeven. Bijlage 9 geeft een ingevuld
voorbeeld van een in code omgezette lijst 8.



Afbeelding 24 Staande tweetakt dubbelwerkende kruishoofd Stork-Hessman die-
selmotor.

2.2. De gasturbine

Hoewel niet veel toegepast als krachtbron, wordt onderstaand volledigheidshalve een summiere typologische indeling van de gasturbine gegeven.

De roterende interne verbrandingsmachine, of gasturbine, heeft een zeer korte geschiedenis. Een experimentele machine die enigszins wilde werken werd in 1905 door Rateau ontwikkeld. Het zou echter tot de jaren dertig duren voordat er machines gebouwd konden worden die voldoende (thermisch) rendement hadden om gebruikt te kunnen worden. Pas na de Tweede Wereldoorlog kwam de gasturbine tot meer praktische toepassingen. Door het bijna natuurlijke vermogen om de uitlaatgassen met een enorme snelheid uit de machine te stuwen, is de vliegtuigbouw het terrein bij uitstek waarop gasturbines toegepast werden en worden. Het was de ontwerper Whittle die in 1930 deze toepassing zag en er patent op kreeg. Zijn idee duurde zeven jaar om te ontwikkelen: in 1937 bouwde de Britse machinebouwer Thomson-Houston het eerste model. Gasturbines werden ook geschikt geacht voor de aandrijving van auto's en vrachtwagens (1950), tractie (1941) en schepen (de hoovercraft in 1963).²⁰ Op al deze gebieden waren ze niet of slechts in zeer beperkte mate succesvol. Voor stationaire doeleinden, behalve dan voor de opwekking van elektriciteit, zijn gasturbines nauwelijks gebruikt voor de jaren '70 van deze eeuw. Indien ze toegepast werden, was dit meestal in een proceskringloop met andere krachtbronnen. Een voorbeeld hiervan zijn de zogenaamde STEG (stoom en gas) installaties bij de opwekking van elektriciteit.

Alle praktisch toepasbare gasturbines zijn gebouwd rond drie hoofdonderdelen: de compressor, de verbrandingskamer en de turbine.²¹ In het gehele verbrandingsproces doorloopt de lucht (of een ander gasvormig arbeidsmedium) deze drie stadia. De compressor zorgt ervoor dat de verbrandingslucht aangezogen wordt vanuit de buitenlucht en verdicht wordt tot ongeveer 4 atmosfeer. In de verbrandingskamer wordt brandstof (gas of

²⁰ R. Harman, 'Gas turbines', *Mechanical engineer's handbook* (New York 1986), 1984-1998.

²¹ F. Guhrauer, 'De gasturbine', *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie deel M* (5e geheel gewijzigde druk, Deventer [1950]), 325.

gepurificeerde gasolie - ook wel kerosine genaamd) ingespoten en ontstoken. De verbranding zorgt voor een explosieve toename van het gasvolume. Deze gassenstroom wordt door de turbine geleid en staat daar de kinetische energie via een schoepenwiel af aan de rotoras.

Daar de werking van alle gasturbines dezelfde is, wordt het type - en daarmee de uitvoering - bepaald door het proces waarin de turbine moet werken. Er zijn drie verschillende processen: de open kringloop, de gesloten kringloop en de semi-gesloten kringloop.²² Het grote verschil tussen deze systemen is dat bij het eerste systeem de toegevoerde lucht in direct contact komt met de brandstof, verbrandt en de machine in zijn geheel verlaat. Bij het tweede systeem - de gesloten kringloop - wordt de lucht (of een ander arbeidsmedium) niet intern verbrandt, maar van 'buiten' sterk verhit, waardoor eveneens een grote expansie plaats heeft. De semi (of half) gesloten kringloop is hier een mengvorm tussen. Voor een goede werking van gasturbines in een gesloten kringloop zijn extra voorzieningen nodig: de regenerator en koeler om het van de turbine terugkerende arbeidsmedium te koelen voordat het de compressor in gaat en een externe warmtebron die de uit de compressor tredende gassen verhit.

Een tweede indelingcriterium is de wijze waarop de turbine samengesteld is. De gehele gasturbine kan namelijk worden gesplitst in twee afzonderlijke compressor-turbine assen die samen deel uit maken van één kringloop. Dergelijke systemen zijn gasturbines met twee assen. Ook kan het voorkomen dat er twee compressoren worden gedreven door één turbine en dat de andere turbine het arbeidswerktuig, al dan niet met zijn collega turbine, aandrijft. Dergelijke opstellingen worden nagenoeg alleen aan boord van schepen toegepast.²³

Voor gasturbines zal worden volstaan met alleen een schema voor de typologische indeling van dit type krachtbron. Deze is gegeven in bijlage 10.

²² idem, 325-327.

²³ Van Tyen, *Scheepsolomotoren*, 553.

Inleiding

De groei van de elektrische aandrijfkraft kan globaal ingedeeld worden in drie perioden die zich alle afspeelden in het laatste kwart van de vorige eeuw en het eerste decennium van de twintigste eeuw.¹ Deze indeling geeft de ontwikkeling van de elektriciteit als krachtbron in de landen, Duitsland en de Verenigde Staten, die voorop liepen in de toepassing hiervan. Nederland was geen echte koploper: de invoering van de elektriciteit als krachtbron ijlt in de meeste gevallen zo'n tien jaar na op de pioniers Duitsland en de Verenigde Staten. De eerste ontwikkelingsperiode is in Nederland nagenoeg geheel overgeslagen. Deze periode liep in Duitsland van ongeveer van 1834 tot 1866, en was de tijd van de door galvanische elementen aangedreven bewegingsmechanismen. Dit waren de zogenaamde galvanomotoren. Deze motoren waren dermate gering van vermogen dat ze niet als echte krachtbronnen te beschouwen zijn. Ze komen in het onderstaande dan ook niet verder voor. In de volgende periode, die ruwweg loopt van 1867 tot 1885, begint met de feitelijke toepassing van installaties voor het overbrengen van krachtstroom en eindigt met de opkomst en verdere uitbouw van stroomnetten. Dit is de tijd waarbij de elektriciteit door op zichzelf staande installaties, per blok of per wijk opgewekt werd.²

De derde en laatste fase leidt de periode in waarin op planmatige wijze energiecentrales gebouwd en in gebruik genomen worden voor de elektriciteitsvoorziening aan nijverheid en industrie. Deze periode loopt van ongeveer 1885 tot 1900. In deze laatste periode liep Nederland redelijk in de pas met de ons omringende landen.³

¹ F. Heintzenberg, 'Die ersten Entwicklungsstufen des elektrischen Antriebs im 19. Jahrhundert', *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 30 (Berlin 1941) 33.

² A.N. Hesselmanns, 'Gas, licht en elektriciteit', *Geschiedenis van de techniek in Nederland* 3 (Zutphen 1993) 141.

³ *idem*, 147, tabel 8.2.

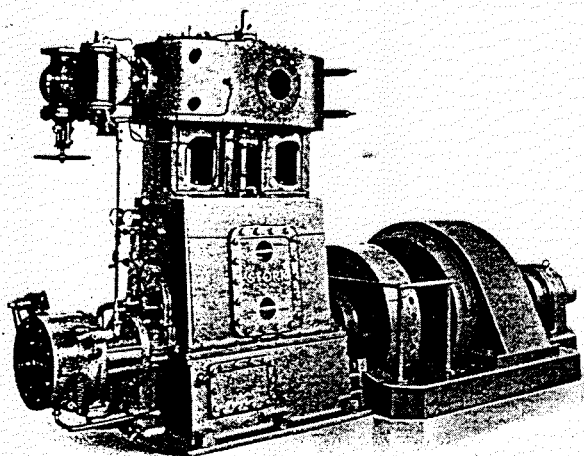
Voor 1895 werkten de meeste, zo niet alle toegepaste krachtinstallaties in Nederland met gelijkspanning. Het gebruik was grotendeels gericht op de opwekking van elektrisch licht. Men schafte daarvoor complete installaties aan. Dat wil zeggen een 'set' bestaande uit een krachtbron, meestal een stoommachine, met daaraan een door een riem gedreven dynamo (gelijkstroomgenerator), één of meerdere lampen en de nodige meters en kabels. In werkplaatsen en fabrieken werden soms 'losse' dynamo's aan het reeds bestaande drijfwerk gekoppeld om voor de verlichting te zorgen.⁴ Het geheel kon worden gecombineerd met accumulatoren.

Met de komst van de draaistroomelektromotor, geïntroduceerd door Siemens en Halske op de tentoonstelling van Frankfurt in 1891, is de weg vrij op de elektriciteitsopwekking centraal te gaan aanpakken.

De gelijkstroommachine heeft als groot nadeel dat er veel energieverlies

optreedt bij het transport over lange afstanden. Veel vermogen gaat in de kabels zitten, tenzij de spanning zeer hoog genomen wordt. Echter, gelijkstroom kan niet (direct) getransformeerd worden naar andere spanningsniveaus: de opgewekte spanning is ook de gebruiksspanning. Hoge voltages bij het gebruik van een 'open' elektriciteitssysteem vereist speciale, dure apparatuur met veel koper en is bovendien levensgevaarlijk.

Draaistroom heeft dit probleem niet omdat het door middel van transformatoren naar ieder gewenst spanningsniveau gebracht kan worden. Met de uitbreiding van het draaistroomnet (het hoogspanningsnet) in Nederland verdwijnen tevens de installaties die autonoom gelijkspanning opwekken.



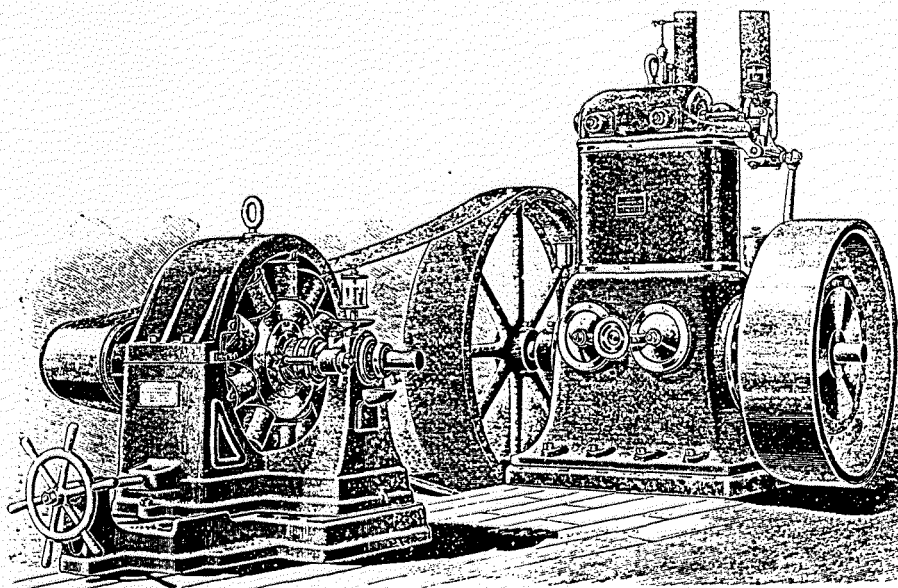
Afbeelding 25 Stork tweekruks-tweelingstoommachine met generator, gebruikt in de jaren dertig van de twintigste eeuw.

⁴ J.W.P.P. van den Noort, 'Het begin van het Rotterdams gemeentelijk elektriciteitsbedrijf (1895)', Jaarboek van de geschiedenis van bedrijf en techniek 1 (1984), 289-290.

In het onderstaande zal alleen een indeling gegeven worden van de elektriciteitsverbruikers: de gelijk- en wisselstroom-elektromotoren. De opwekkers als zodanig worden dus buiten beschouwing gelaten. De motivatie hiervoor is enerzijds dat elektromachines in principe omkeerbaar zijn. Dat wil zeggen dat een generator die niet aangedreven wordt, maar wel spanning op "de klemmen" heeft als motor kan werken. Het omgekeerde - een motor als generator gebruiken - is ook mogelijk. Een tweede overweging is dat elektromotoren als energieverbruikers in veel grotere aantallen en uitvoeringen geproduceerd werden en worden. Een hiermee samenhangend aspect is dat het alleen de elektromotor is die als krachtbron gelijkgesteld kan worden met de andere krachtbronnen, de stoommachine en de verbrandingsmotor. Om deze reden is ook een typologische beschrijving van de transformator hier niet opgenomen. Dit apparaat is slechts een tussenstation, waarmee wisselspanning van een bepaald niveau getransformeerd kan worden naar een ander niveau. Het kan niet worden gebruikt als roterende krachtbron zoals elektromotoren dit kunnen.

3.1. Aandrijving en opwekkers

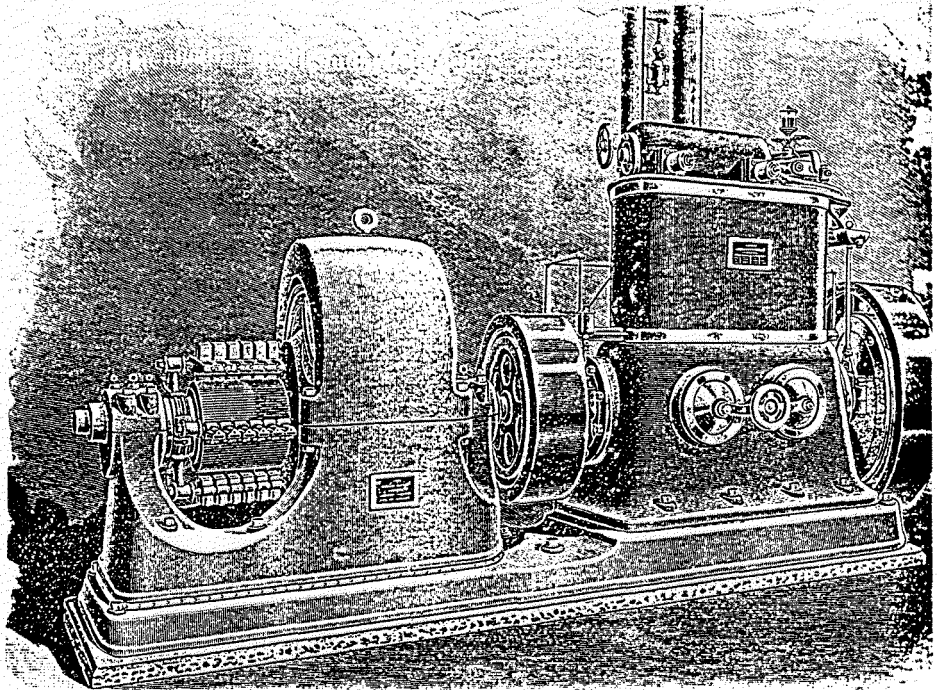
Alvorens een indeling gegeven wordt van de verschillende elektromachines is het wellicht inzichtelijk eerst enkele woorden te wijden aan de primaire krachtbronnen voor de aandrijving van dynamo en generator.



Afbeelding 26 Drijfriem aandrijving van een gelijkstroomgenerator. Links is duidelijk het handwiel te zien waarmee de generator op zijn stoel verschoven kan worden, waardoor de riem strakker of losser gespannen wordt.

De eerste als krachtbron toepasbare dynamo's werden aangedreven door stoommachines. Deze stoommachines werkten op de wijze zoals de in hoofdstuk 2 beschreven machines. Het konden liggende of staande machines zijn. De komst van elektriciteit heeft er wel voor gezorgd dat men meer aandacht is gaan geven aan de werking van de stoommachine. Ook voor de ontwikkeling van de verbrandingsmotor heeft de toepassing van elektriciteit gevolgen gehad.

Twee aspecten met betrekking tot de karakteristieken van de primaire krachtbronnen spelen hierbij een cruciale rol. Dit zijn het toerental van de machine en de regelmatige (rond)-gang van de aandrijfmachi-

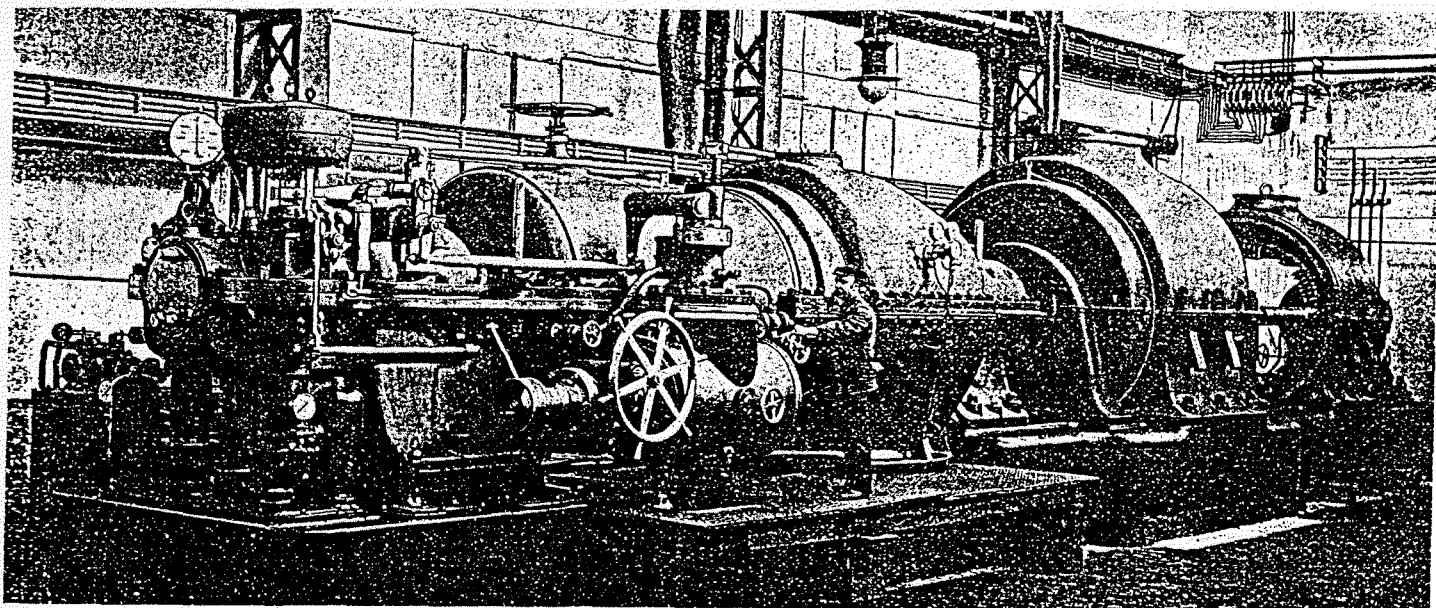


Afbeelding 27 Opstelling waarbij de generator direct, door middel van een vaste koppeling, wordt aangedreven door een tweekruks-stoommachine.

ne. Omdat het hier niet de plaats is de achtergrond te schetsen van beide bovengenoemde criteria die een generator stelt, zal volstaan worden met slechts enkele opmerkingen hierover.

De regelmatige gang van de aandrijfmachine, uitgedrukt in de oneenparigheidsgraad, is essentieel voor een vlakke spanningsopwekking bij gelijkstroommachines en een stabiel frequentieverloop bij wisselspanningsmachines. Waarbij de laatste vele malen nauwkeuriger luistert dan de eerste. Door de aandrijfmachine uit te rusten met een groot vliegwiel, een goede reguleur en meerdere krukken wordt de rondgang van de machine al zeer regelmatig.

De eerste dynamo's werkten met toerentallen van meer dan 1000 omwentelingen per minuut.⁵ Stoommachines haalden in die tijd maximaal 200 omwentelingen per minuut. Door verschillende diameters van aandrijfwielen toe te passen, bijvoorbeeld het drijfwiel van de stoommachine 5 keer groter te nemen dan het drijfwiel van de generator, konden de toerentallen op elkaar afgesteld worden. Een erg gelukkige oplossing was het niet, want het kwam geregeld voor dat de drijfriem door de krachtoverbrenging opgerekt werd, waardoor deze over de kleine aandrijfwielen van de generator slipte. Vaak werd dan ook de fundatie van de generator gesplitst uitgevoerd, met een deel dat verankerd was in de vloer en een deel waarop de machine zich bevond en dat met een trekstang over de fundatie verschoven kon worden. Ook werd door een groot verschil in diameter tussen drijfwiel en aangedreven wiel de oneenparigheid versterkt.



Afbeelding 28 Turbine-aandrijving van een generator in een fabriekshal.

Deze opstelling verdwijnt geleidelijk wanneer de directe aandrijving door stoomturbine, (gas)motor en stoommotor in de jaren negentig van de negentiende eeuw opkomt. Deze machines zijn zodanig geconstrueerd dat ze het vereiste toerental hebben om de dynamo of generator direct aan te drijven. Ook de

⁵ P. van Cappelle, *De electriciteit* (zesde, herziene en veel vermeerderde druk, Delft 1908) 302.

dieselmotor wordt al spoedig geschikt gemaakt voor directe aandrijving. Daarbij maakte met name deze aandrijving gebruik van (zeer) grote vliegwielen, meerdere krukken en een goede reguleur om te voldoen aan de eisen van de elektriciteitsopwekking: de reeds genoemde constante spanning en een constante frequentie.

Na de eerste twee decennia van de twintigste eeuw tekent zich een constellatie af waarbij de eigen opwekking van elektrische energie wordt vervangen door het inkopen van deze energie voor de aandrijving van elektromotoren en verlichting. Vanaf dat moment werken nagenoeg alle elektrische machines (als secundaire krachtbronnen) op draaistroom. Alleen in bijzondere gevallen wordt nog gelijkspanning gebruikt (bijvoorbeeld spoorwegen en transportmiddelen).

3.2. Elektriciteitsverbruikers

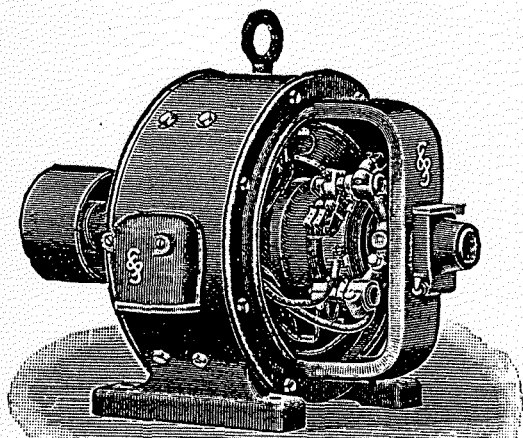
Het (theoretisch) fundament voor het overbrengen van vermogen door middel van elektriciteit is het magnetisme. Iedere elektromotor, gelijk- dan wel wisselspanning is op de werking ervan gebaseerd. Wanneer een stroom door een geleider loopt, ontstaat er een magnetisch (krachten)veld waardoor ijzeren delen in dit veld aangetrokken worden. Een elektromotor maakt ook gebruik van dit principe. Hiertoe is de elektromotor voorzien van twee belangrijke delen: de stator met wikkelingen om een weekijzeren kern waarin een magnetisch veld wordt opgewekt als er een stroom loopt en de rotor of het anker, die bestaat uit ijzeren samengepakte schijven die op een as zijn bevestigd. Op dit pakket ijzer werken de magnetische krachtlijnen die er vervolgens voor zorgen dat het geheel gaat draait. Op rotor of anker kunnen eveneens stroomgeleiders worden aangebracht om het magnetische effect te versterken. Bijna alle verschillen tussen de machines onderling komen voort uit de manieren waarop de stroom door de diverse wikkelingen in de elektromotoren zijn aangebracht. Deze onderlinge verschillen bepalen de karakteristieken van de diverse uitvoeringen.

Een aspect dat voor zowel de gelijkstroommachines als de wisselstroommachines dezelfde is, zijn de verschillende uitvoeringen van de behuizing van de machines. Omdat dit

criterium bij de behandeling van het werkingsprincipe van de machines niet meer aan de orde zal komen zal onderstaand hierover enkele opmerkingen geplaatst worden. De indeling naar behuizing is er een die betrekking heeft op de omgeving waarin de elektrische machine gebruikt wordt. Deze omgeving kan variëren van een schone, beschutte ruimte tot een zeer hete, vochtige of stoffige ruimte, waar ook explosieve gassen aanwezig kunnen zijn (bijvoorbeeld in de mijnbouw). Voor iedere toepassing is een uitvoering van een elektromotor mogelijk.⁶ Zoals in tabel E.1. weergegeven is. Uit de opsomming in tabel E.1. valt ook te lezen dat elektromotoren nog toegepast kunnen worden als krachtbron, in die omstandigheden waarbij andere krachtbronnen, stoommachines en verbrandingsmotoren, onacceptabel zijn.

3.2.1. de gelijkstroommotor

Zoals boven reeds is aangegeven, was alle toegepaste elektriciteit tot aan de beginjaren negentig van de vorige eeuw gelijkspanning. De nadelen van gelijkstroom zijn bovenstaand ook reeds aangestipt.



Afbeelding 29 Een Siemens gelijkstroommotor voor kleine vermogens, aan het begin van deze eeuw.

Na de introductie van draaistroom werden gelijkstroommachines alleen nog maar toegepast voor bijzondere aandrijvingen. Ondanks het grote nadeel van het transport van gelijkstroom, heeft deze vorm van energie een groot voordeel: het toerental laat zich zeer eenvoudig regelen. Hierdoor werd en wordt de gelijkstroommachine veel toegepast in transportmiddelen

en in tractie. In het onderstaand zal hier echter niet verder op in gegaan worden.

⁶ Electrotechniek. Handleiding voor het elektrisch bedrijf (5^e druk, Deventer 1947) 74-77. Deze opsomming is aan het eind van dit hoofdstuk opgenomen als tabel E.1.

Het werkingsprincipe van elektromotoren is gebaseerd op een wisselend (draaiend) magnetisch veld om een anker, dat zodoende de eveneens magnetische anker wisselend aantrekt en afstoot. Omdat de 'aanspanning' (de spanning waarmee de motor aan het net verbonden wordt, ook wel klemspanning genoemd) niet in grootte (amplitude) verandert, moet in een gelijkstroommotor dit wisselende veld zelf gemaakt worden. Dit gebeurt door middel van een commutator - of stroomwisselaar - op het anker van de elektromotor. De commutator zorgt ervoor dat de aangebrachte spanning tussen de polen telkens omgekeerd wordt (plus wordt min en v.v.), waardoor ook het anker omgepoold wordt en het magnetisch veld van richting verandert. Er is slechts een beperkt aantal wijzen waarop de gelijkstroommotor (elektrisch) ingedeeld kan worden. Dit heeft alleen te maken met de manier waarop het anker en de veldwikkelingen gekoppeld zijn en bekrachtigd worden. De drie vormen uiteten zich in motoren met seriebekrachtiging, motoren met shuntbekrachtiging en motoren met zowel serie- als shuntbekrachtiging, de zogenaamde compoundmotoren of motoren met gemengde⁷ wikkeling. Het eerste en laatste type kunnen uitgevoerd worden als motoren met afzonderlijke bekrachtiging. Deze indeling vindt al aan het eind van de negentiende eeuw haar oorsprong en wordt tot op heden gehandhaafd. De verschillende typen hebben alle een andere motorkarakteristiek tot gevolg. Er wordt daarom ook wel van een serie-, shunt- en compoundkarakteristiek gesproken.

In het kort zal nog even worden stilgestaan bij de uitvoeringen van de verschillende machines en hun koppel- en toerenkarakteristiek. Een seriemotor heeft de veldwikkeling in serie met het anker. Hierdoor is de stroomsterkte die door het anker loopt dezelfde als de stroomsterkte die voor de bekrachtiging van het veld zorgt en is het aanloopkoppel (de ronddraaiende kracht bij stilstand van de motor) zeer hoog. Dit type motor wordt veel toegepast bij tractie en hijskranen. De motor moet wel belast aanlopen omdat anders het toerental ontoelaatbaar hoog oploopt. De shuntmotor is uitgerust met een wikkeling parallel aan de ankerbekrachtiging. Zodoende staat hierover altijd de volle

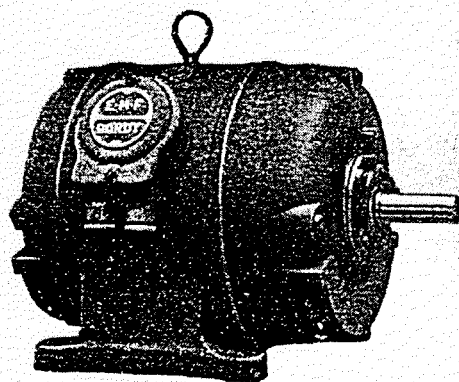
⁷ P. van Cappelle, *De electriciteit*, 150-151.

(constante) netspanning. De bekrachtiging is hierdoor ook constant. Het koppel dat de motor levert is nagenoeg recht evenredig met het toerental van de motor. Dit type motor werd dan ook veel gebruikt voor het aandrijven van gereedschapswerktuigen, pompen, liften, weefstoelen en spinmachines.⁸ De compound of gemengde motor is een combinatie van beide genoemde typen motoren: deze motor heeft zowel een serie- als een shuntwikkeling, waardoor een machine ontstaat die de eigenschappen van zowel de serie- als de shuntmotor in zich verenigt. Volgens Meyier werden ze veel minder toegepast dan de andere twee typen. De compoundmotor geldt alleen als een goede vervanger van de shuntmotor "wanneer een volmaakt constante snelheid vereischt wordt".⁹

3.2.2. de wisselstroommotor

Wisselstroom was al enige tijd bekend, maar pas in 1891 kwam de grote doorbraak van de toepassing deze vorm van energietransport. Het waren Siemens en Halske die in 1891 te Frankfurt demonstreerden dat wisselstroom superieur kon zijn aan gelijkstroom. Zijn waren, eveneens in 1891, de eersten die draaistroommotoren bouwden.

Deze eerste draaistroommotor was het type R van Siemens en Halske. Aanvankelijk werd deze meer als generator gebruikt dan als motor.¹⁰ Het volgende type, dat echt als motor gebruikt werd, werd in 1893 door Siemens en Halske op de markt gebracht. Het waren 'kleinere Drehstrommotoren mit Schleifringen' en ze waren geschikt voor een spanning van 110 tot 120 Volt. Dit type motor



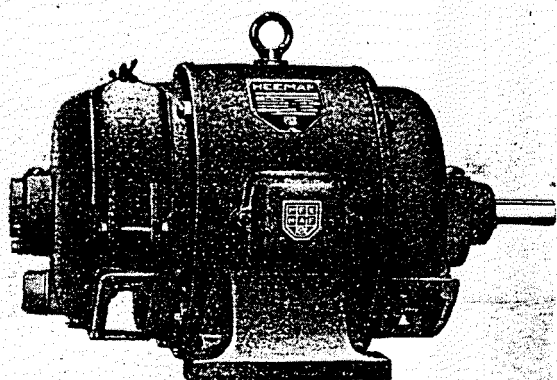
Afbeelding 30 Spatwaterdichte kooiankermotor uit de jaren dertig van het fabrikaat E.M.F. Dordt.

⁸ H.E.Ch. Poortman, 'Electrische machines en transformatoren', *Eerste Nederlandse systematisch ingerichte Encyclopaedie* 8 (Amsterdam 1950), 251-252.

⁹ J.E. de Meyier jr., *De technische vraagbaak voor Nederland en Koloniën* (2e druk, Deventer 1917) 821.

¹⁰ Heintzenberg, 'Die ersten Entwicklungsstufen', 44.

had een vermogen tussen een halve en 20 paardenkrachten bij een toerental van 1000 tot 1500 omwentelingen per minuut. De kostprijs was zeer hoog: tussen de 360 en 2200 mark en het (elektrisch) rendement was nog betrekkelijk laag, tussen de 50 en 86%.¹¹ Toch zorgde de draaistroommotor voor een gestage omwenteling in de toepassing van elektriciteit als krachtbron. Het gebruik hiervan nam in die periode snel toe. Zo was in 1894 in Berlijn elektriciteitsgebruik voor verlichtingsdoeleinden nog tien keer groter dan voor krachtopwekking, in 1898 was dit reeds gelijk en in 1900 was krachtstroom al vier keer dat van lichtstroom.¹² Ook in Nederland nam het gebruik van elektriciteit als krachtbron door de komst van de draaistroommotor in die periode sterk toe.¹³



Afbeelding 31 Druipwaterdichte uitvoering van een sleepringmotor, fabrikaat Heemaf.

Omdat éénfase motoren aanvankelijk redelijk veel, maar al spoedig minder vaak werden toegepast bij de overbrenging van kracht, wordt onderstaand volstaan met de beschrijving en indeling van drie-fase wisselstroommotoren, kortweg draaistroommotoren. Qua typologische indeling is er echter geen verschil, want een

draaistroommotor is in feite een samenstelling van drie éénfasemotoren die elk 120 (elektrische) graden ten opzichte van elkaar verschoven zijn en binnen een motor zijn aangebracht.

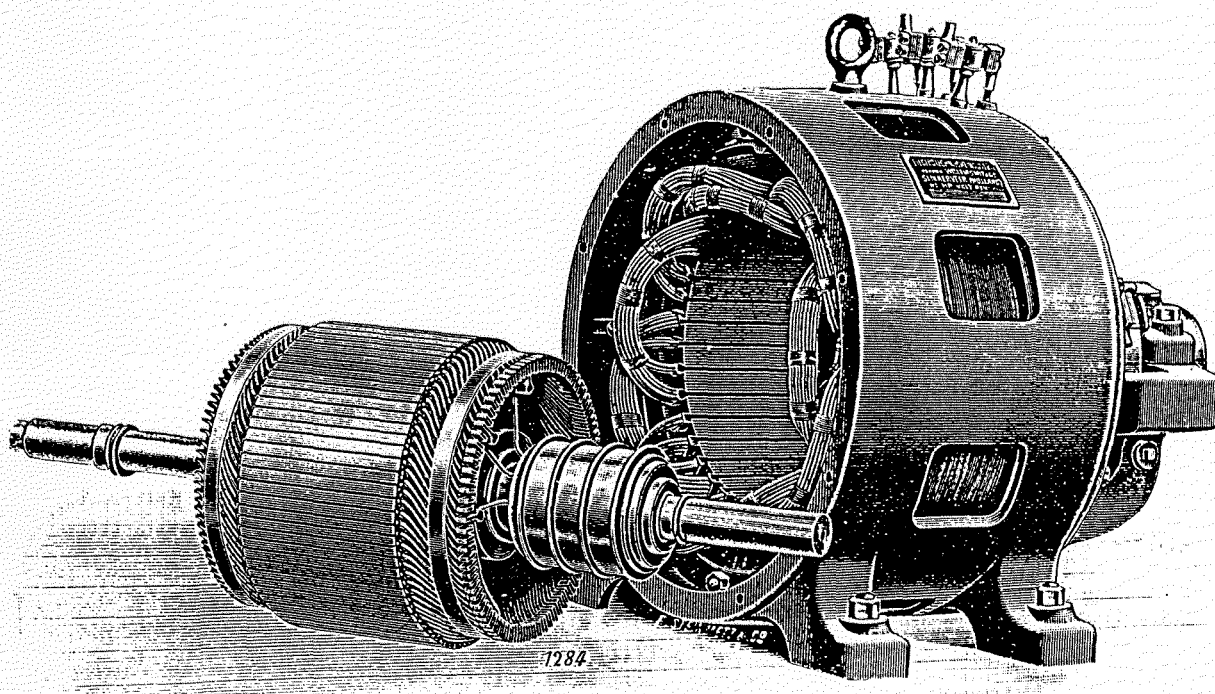
De wisselstroommotor, of draaistroommotor is net als de gelijkstroommotor uitgevoerd met een vast gedeelte - de stator - en een draaiend gedeelte - de rotor. Beide delen bevatten wikkelingen voor het opwekken van een magnetisch veld.

¹¹ ibidem.

¹² R. von Miller, 'Der Stromverbrauch im Wandel der Zeiten', *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 30 (Berlin 1941) 29.

¹³ De Jonge, *Industrialisatie*, 180.

Eveneens als de gelijkstroommotor is er sinds de vroegste ontwikkeling van wisselstroommotor wat uitvoering en werkingsprincipe nauwelijks iets veranderd. In eerste instantie kan een elektromotor gemaakt zijn als synchronemotor of als asynchronemotor. De synchrone motor is zodanig geconstrueerd dat deze ook als generator gebruikt kan worden. Dit type motor vindt echter slechts zeer weinig toepassing. Onderstaande zal dan ook alleen betrekking hebben op de



Afbeelding 32 Draaistroommotor met sleepringen. De motor is uit elkaar genomen zodat de stator (rechts) en rotor goed te zien zijn. Op de as van de rotor zijn de sleepringen goed zichtbaar.

asynchrone motor.

Er worden twee criteria gebruikt waarmee de verschillende draaistroommotoren ingedeeld kunnen worden. De eerste indeling heeft betrekking op de wijze waarop de wikkelingen van stator en rotor bekrachtigd worden. Dit kan op twee manieren gebeuren: de stroom in de rotorwikkeling wordt opgewekt door inductie, de zogenaamde inductiemotoren, of de rotorwikkeling krijgt een eigen bekrachtiging, de zogenaamde conductiemotoren. De tweede indeling betreft de uitvoering van de rotor- of ankerwikkelingen. De verschillende uitvoeringen leiden tot type motoren die kortsluitanker-, sleepringanker- of collectormotor genoemd worden.

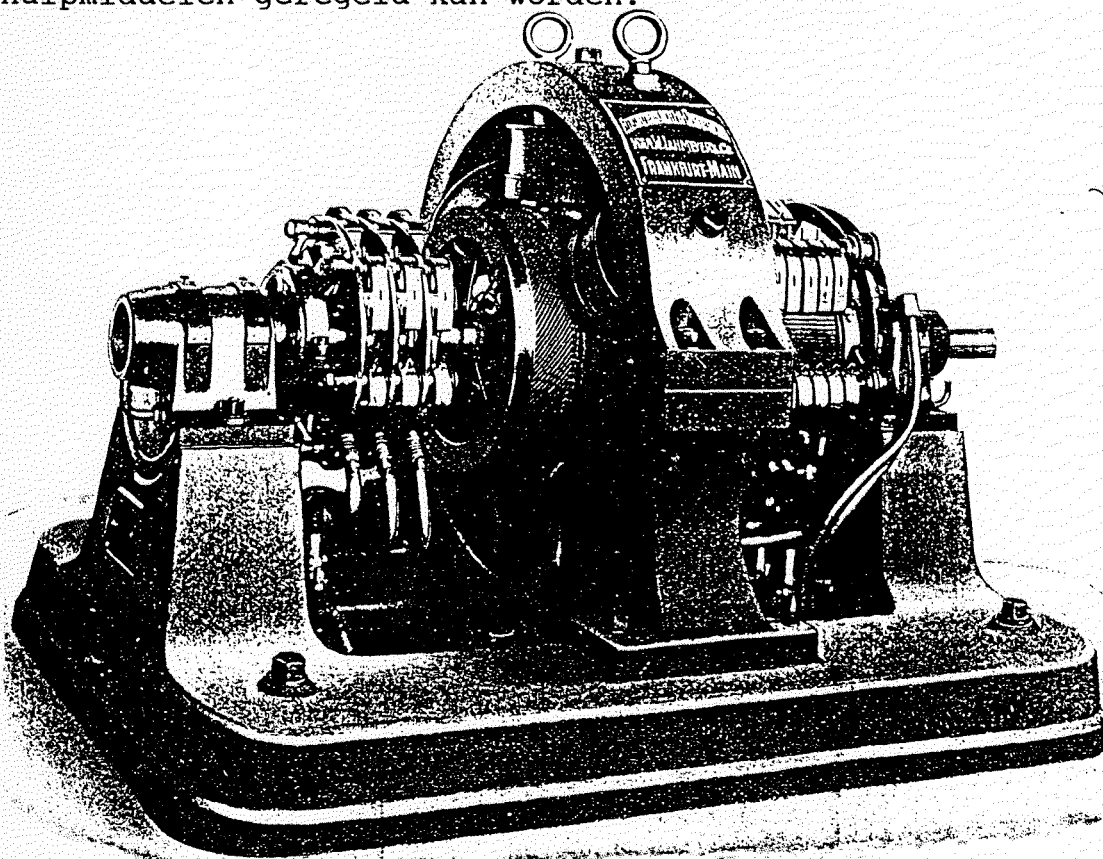
Bij kortsluitankermotoren zijn de wikkelingen van de rotor met elkaar verbonden en dus kortgesloten. De stroom in deze wikkeling die voor het rotor veld zorgt, wordt opgewekt door inductie. Dit type machines kan zonder extra voorzieningen alleen voor kleine vermogens, tot ongeveer 10 pk, gebruikt worden. Daarboven zijn extra voorzieningen nodig, zoals aanloopweerstand en speciale aanloopschakelingen, om de (kortsluit)stromen bij het starten van de motor te beperken. Een speciale uitvoering van een kortsluitanker - de meervoudige kooiconstructie - werd al in 1894 door Boucherot uitgevonden, het zou echter tot de jaren dertig duren voordat dit idee praktische toepassing vond.¹⁴

De grote kortsluitstromen, die bij het op toeren komen van een draaistroommotor in de rotor ontstaan, kunnen ook worden getemperd door de wikkelingen van de rotor aan te sluiten op een weerstand. Deze weerstand ligt buiten de machine en de verbinding tussen weerstand en de draaiende rotor wordt gemaakt met behulp van sleepringen. Dit type motor wordt dan ook sleeppringankermotor genaamd. Zoals boven al bleek, was de eerste Siemens en Halske elektromotor op deze wijze uitgevoerd. Wanneer een dergelijke motor eenmaal op toeren is, en de ankerstromen gering zijn, kunnen de rotorwindingen zonder tussenkomst van de weerstand met elkaar verbonden worden, waardoor de motor zich als een kortsluitankermotor zal gedragen. Een (draaistroom)sleeppringankermotor is te herkennen aan drie vaste koolborstels, voor iedere fase een, waartussen de sleeppring draait.

Het laatste type draaistroommotor is de collectormotor. Deze machine is uitgevoerd met drie wikkelingen, waarvan er twee in de rotor liggen en een in de stator. De statorwikkeling wordt bekrachtigd via de commutator op de rotor, waardoor ook een rotorwikkeling bekrachtigd wordt. Zodoende zijn er op dit type draaistroommachine zes koolborstels zichtbaar: voor iedere fase twee, namelijk één voor de rotor en één voor de statorwikkeling. Deze ingewikkelde constructie maakt het mogelijk dat het toerental van de motor geregeld kan worden door het verdraaien van de

¹⁴ *Electrotechniek*, 117.

onderlinge hoek tussen de borstels.¹⁵ Dit in tegenstelling tot de andere typen waar het toerental niet, of alleen met externe hulpmiddelen geregeld kan worden.



Afbeelding 33 Draaistroommotor met collector. Dit type motor valt op door zijn veelheid aan sleepringen en koolborstels.

Met het beschrijven van de commutatormotor is het aantal indelingen voor elektromotoren compleet. Binnen de diverse typen zijn nog wel verdere onderverdelingen mogelijk maar de beschrijving hiervan valt buiten het bestek van dit rapport. De keuze van een bepaalde elektromotor als krachtbron hangt in sterke mate af van de toepassing. Stationaire werktuigen zijn veelal ontworpen voor een bepaald toerental waarbij het gevraagde vermogen sterk kan variëren. Hierdoor zal ook de keuze van een elektromotor bepaald zijn: in de meeste gevallen zal het een kortsluitmotor betreffen, wanneer er sprake is van wisselstroom, of een shuntmotor, wanneer het net gelijkspanning levert. Al zal dit laatste op enkele speciale

¹⁵ idem, 139-140.

gevallen na niet veel voorgekomen zijn. Voor de toepassing van elektromotoren in het kleinbedrijf geeft Ten Bosch een aardige opsomming. Het vermeldt dat te Amsterdam rond 1910 er kleermakers, slaggers, kruideniers, tandartsen, hotels en dagbladen alle elektromotoren gebruiken voor het drijven van de machines en apparaten.¹⁶ Zijn opsomming over de toepassing van elektriciteit als drijfkracht in Rotterdam is nog veel uitgebreider en deze geeft het per bedrijfstak aantal gebruikte motoren inclusief vermogen weer. In totaal waren er net voor of in 1913 in 839 bedrijven en inrichtingen 1867 elektromotoren in bedrijf, met een totaal gemiddeld vermogen van 7,03 pk. Het vermogen per inrichting varieerde van gemiddeld 0.09 pk voor ventilatoren tot gemiddeld 34,29 pk voor het aandrijven van pompen van het waterleidingennet.¹⁷ Niet duidelijk is of Ten Bosch gelijkstroommotoren, danwel wisselstroommotoren beschrijft. Waarschijnlijk zijn beide opgenomen, maar zal het aandeel wisselstroommotoren groter zijn, omdat juist veel machines met klein vermogen voor niet variabel toerentallen genoemd worden. Deze machines zullen hun spanning en stroom onttrekken aan het elektriciteitsnet.

In bijlage 11 is de typologie met betrekking tot elektriciteitsopwekking (bijlage 11a) en elektrische motoren (bijlage 11b) weergegeven. Gezien de enorme variatie in uitvoeringen en toepassingen van de verschillende machines, die overigens vaak per fabrikant nog weer sterke nuance verschillen kunnen vertonen, is volstaan met slechts een zeer globale indeling van de aandrijfmachines en een globale indeling van de verschillende elektromotoren. Het schema geeft echter voldoende elementen om tot een eenduidige indeling van de verschillende veel toegepaste aandrijfmachines te komen. Door het grove karakter van deze indeling is een ingevuld schema met betrekking tot de verschillende typen achterwege gelaten.

¹⁶ A. ten Bosch N.Jzn., *De hoofdbegrippen over elektriciteit* (4e druk, Deventer 1913), 39.

¹⁷ *idem*, 39-40.

Tabel E.1: De verschillende uitvoeringen van de behuizingen van elektromotoren. Voor zowel gelijkstroom- als draaistroommotoren wordt dezelfde indeling gehanteerd. De uitvoeringen zijn zodanig gerangschikt dat met oplopend rangnummer de omstandigheden waaronder de motor blijvend moet functioneren extremer worden.

nr. naam van de uitvoering

- 1 open uitvoering
- 2 druipwatervrije, open uitvoering
- 3 gedeeltelijk beschermde uitvoering
- 4 druipwatervrije, beschermde uitvoering
- 5 druipwaterdichte uitvoering
- 6 beschermde uitvoering
- 7 druipwaterdichte, beschermde uitvoering
- 8 spatwaterdichte
- 9 uitvoering met enkele buisaansluiting
- 10 uitvoering met dubbele buisaansluiting
- 11 gesloten uitvoering
- 12 regendichte
- 13 waterdichte
- 14 uitvoering met gesloten koelsysteem
- 15 uitwendig gekoelde uitvoering
- 16 uitvoering met mantelkoeling
- 17 uitvoering met waterkoeling
- 18 uitvoering voor tijdelijk gasontploffingsgevaar
- 19 gasontploffingsveilige uitvoering

Conclusie

In het voorafgaande is getracht een typologische indeling te geven van een aantal verschillende krachtbronnen die in de periode tussen ongeveer 1830 en 1950 in Nederland in gebruik zouden kunnen zijn geweest. Deze voorzichtige formulering is noodzakelijk omdat niet voldoende materiaal voorhanden is om met zekerheid te stellen welke machines toegepast zijn in het bedrijfsleven. Wel is het mogelijk om met de typologische schema's uit de bijlagen de voorkomende machines, voor zover deze nog aanwezig zijn, bijvoorbeeld als 'industrieel erfgoed', te kunnen duiden en in te delen.

Bij wijze van samenvatting zal onderstaand voor iedere soort krachtbron een beknopt overzicht van de belangrijkste indelingscriteria gegeven worden.

De krachtbronnen vallen in eerste instantie uiteen in drie groepen, te weten: stoommachines, interne verbrandingsmachines en elektrische machines. Laatstgenoemde is bij deze indeling een zogenaamde secundaire krachtbron. Deze laatste groep machines kunnen pas werken als ze geschakeld worden aan een generator die op zijn beurt weer aangedreven wordt door een primaire krachtbron.

Stoommachines zijn dergelijke primaire krachtbronnen, echter deze machines zijn niet in staat zelf het krachtleverende medium tot leven te wekken: hiervoor is een stoomketel noodzakelijk.

Stoomketels worden meestal beschreven in een aantal globale kenmerken. Een dergelijke beschrijving zou de minimale beschrijving van een stoomketel genoemd kunnen worden. De drie basale criteria die bij ketels gehanteerd kunnen worden, zijn:

- de ligging van de ketel: staand of liggend. Met name kleinere ketels worden staand uitgevoerd.
- de stof die zich aan de binnenzijde van de pijp bevindt: zijn dit de rookgassen dan is het een vlampijpketel; is dit het water (en stoom) dan is het een waterpijpketel.

Samenhangend hiermee kunnen ketels ingedeeld worden naar

- de grootte van de ruimte waarin zich het stoomvormende water bevindt: grootwaterruimketels of kleinwaterruimketels.

Opgemerkt dient te worden dat grootwaterruimketels (of tankketels) nagenoeg altijd vlampijpketels zijn en kleinwater-ruimketels altijd waterpijpketels.

Voor stoommachines is eveneens een globale indeling te maken. Hierbij staat wederom de stand van de machine - horizontaal of verticaal - vooraan. Vervolgens kunnen ze worden beschreven naar:

- drijfwerk: kruishoofd of trunkzuiger
- werking: enkelwerkend of dubbelwerkend
- toerental: langzaamlopend (minder dan 200 omwentelingen) of snellopende machines (meer dan 500 omwentelingen per minuut).
- stoomverdeling: kranen, schuiven of kleppen.
- expansie: enkelvoudige of meervoudige, met name compoundmachines.

Ook hier zijn er criteria die per type stoommachine min of meer "gekoppeld" voorkomen. Zo zullen twintigste eeuwse trunkzuigerstoommachines bijna altijd snellopende enkelwerkende machines zijn, en zijn kruishoofdmachines altijd langzaamlopende en meestal dubbelwerkende machines.

Een aparte categorie binnen de stoommachines zijn de stoomturbines. Deze laten zich in hoofdzaak beschrijven door het expansieprincipe: als gelijkdrukmaschine (actie- of impulssysteem) of als overdrukturbine (reactiesysteem).

Het tweede type primaire krachtbron waarvoor hier een typologie opgesteld is, is de interne verbrandingsmaschine. Eigenlijk is hier sprake van vier verschillende soorten machines die gemeen hebben dat ze in staat zijn om direct chemische energie om te zetten in mechanische energie. Deze vier soorten kunnen ingedeeld worden in lage-drukmachines, midden-drukmachines, hoge-drukmachines en gasturbines.

De eerste drie typen hebben een overeenkomstig drijfwerk, een zogenaamd kruk-drijfstang mechaniek. Dit mechaniek kan, zoals bij stoommachines, liggend of staand zijn opgesteld en danwel met een kruishoofd, danwel met een trunkzuiger uitgevoerd zijn.

In grote lijnen kan gesteld worden dat de verschillen tussen de indeling van de (vroeg) verbrandingsmotoren gelegen is in de aard van de gebruikte brandstof:

- lage-drukmotoren, wanneer er sprake is van lichtere brandstoffen, zoals gas en benzine.
- midden-drukmotoren, wanneer er iets zwaardere brandstoffen als petroleum gebruikt worden, en
- hoge-drukmotoren, indien gasolie, diesel of nog zwaardere fracties in de motor tot verbranding komen.

Ook hier gaan verschillende kenmerken samen. benzine- en gasmotoren (dus lage-drukmotoren) zijn altijd mengselmotoren. De lucht en (gasvormige) brandstof worden vermengd voordat ze in de cilinder gelaten worden. In de cilinder wordt dit mengsel door een externe oorzaak (de vonk van een bougie) tot explosie gebracht. Hoge-drukmotoren werken volgens het principe van brandstofinspuiting: op het einde van de compressieslag wordt in de cilinder aan de hete samengeperste lucht vernevelde brandstof toegevoegd die hierdoor tot ontbranding komt en voor een druktoename boven de zuiger zorgt.

Middendruk machines houden het midden tussen de lage-druk en hoge-druk motoren wat betreft uitvoering en werkingsprincipe.

Het enkele (hoofd)criterium dat voor gasturbines gebruikt wordt, is de aard van het proces: open of gesloten.

De laatste beschreven en ingedeelde krachtbron was de electromotor. Dit is tevens de enige secundaire krachtbron die typologisch beschreven is. De belangrijkste indeling van dit type machine kan gegeven worden door ze in te delen in de categorieën:

- gelijkstroommachines en
- draaistroommachines.

Van de in deze samenvatting opgesomde hoofdingelingen is in bijlage 12 een schematische weergave opgenomen. Hiermee zou het mogelijk moeten zijn, om een eerste grove indeling per krachtbron op hoofdtypen te kunnen maken. Voor een meer gedetailleerde indeling binnen de typen kunnen de schema's in de bijlagen 2, 4, 6, 8, 10 en 11b voor respectievelijk de stoomketel, de zuigerstoommachine, de stoomturbine, interne verbrandings(zuiger)motor, de gasturbine en de electromachine geraadpleegd worden.

Bijlage 1.¹

Overzicht van in 1953 in gebruik zijnde stoomketels.

De tot 1996 onder het ministerie van sociale zaken vallende Dienst voor het Stoomwezen hanteerde in 1954 een indeling van ketels in twee aparte hoofdcategorieën waarvan de eerste uit twee indelingen bestaat: naar warmtebron (uitwendig, stookhuis, vuurkist en geheel uitwendig) en naar 'verdere overdracht van warmte met behulp van...'.
De tweede hoofdcategorie is die der waterpijpketels waarbij de doorstroming van het (voeding)water als verdere indelingscriterium gehanteerd werd.

In de opgave komen zij tot de volgende totalen van in gebruik zijnde ketels per 1 januari 1954:

warmtebron	verdere overdracht warmte via	aantal(%) ²
geheel uitwendig	autoclaaf (geheel dichte vaten)	854 (7)
	vlampijpen	233 (2)
stookhuizen	rookkanalen	3038 (24)
(of vuurgangen)	vlampijpen	2631 (21)
waterpijpen	waterpijpen	115 (1)
	vlam- en waterpijpen	457 (4)
vuurkisten	vlampijpen	1425 (11)
	waterpijpen	2185 (18)
geheel inwendig	elektrisch verwarmd	178 (1)
warmtebron	waterpijpen	aantal
[vuurhaard] ³	eenmalige doorstroming	28 (0)
[vuurhaard]	natuurlijke circulatie	1130 (9)
[vuurhaard]	gedwongen circulatie	136 (1)
	Totaal aantal ketels	12410

¹ Geheel overgenomen uit *Stoombedrijf en veiligheid* ('s Gravenhage 1955), 119-120.

² Procenten van het totaal, afgerond naar hele getallen.

³ Door mij toegevoegd kenmerk.

Bijlage 2: typologische indeling van stoomketels.

ketel benaming

datering

code

1 vat

- 1 grootwaterruim
- 2 kleinwaterruim
- 3 stoom/waterhouder
 - 1 staand
 - 1 ei-vormig
 - 2 cilinder
 - 3 rechthoekig
 - 2 liggend
 - 1 wagonvorm
 - 2 cilinder
 - 3 rechthoekig

2 warmteoverdracht (verwarming stoomvormer door gassen)

- 1 langs tank
- 2 door vlambuis
- 3 door vlampijp
- 4 langs waterpijp
 - 1 horizontaal/flauwhellende bundel
 - 2 verticaal/steilhellende bundel
 - 1 natuurlijke circulatie
 - 2 geforceerde circulatie

3 isolatie

- 1 externe isolatie (metselwerk "buiten" de ketel)
- 2 interne isolatie (warmte isolerende in de ketel)

4 vuur

- 1 ondervuur
- 2 stookbuis
- 3 vuurkist
- 4 vuurhaard
- 5 wervelbed

5 wind/ventilatie

- 1 natuurlijketrek
- 2 geforceerdetrek
 - 1 onderwind
 - 2 bovenwind

6 gasstroom

- 1 eentreks
- 2 tweetreks
- 3 drietreks
- 4 meentreks

7 brandstof

- 1 kolen
- 2 gas
- 3 olie

8 extra warmtewisselaars

- 1 water: economiser
- 2 lucht: luchtverhitter
- 3 stoom: oververhitter
- 4 stoom: herverwarmers

9 capaciteit

- 1 bereik werkdruk
- 2 bereik werktemperatuur
- 3 bereik produktie stoom in b.v. kg/uur
- 4 verwarmend oppervlak

10 eventueel: fabrikant/doel

Bijlage 3: ingevuld schema voor stoomketels.

ketelnaam datering		Cornwall 1811-1950	Piedbouef 1850-1950	Yarrow 1896-1950	Velox 1936-1950
CODE					
1	1.1	X	X	-	-
	1.2	-	-	X	X
	1.3	1	2	3	0
	1.3.1	-	-	-	-
	1.3.1.1	-	-	-	-
	1.3.1.2	-	-	-	-
	1.3.1.3	-	-	-	-
	1.3.2	X	-	-	-
	1.3.2.1	-	-	-	-
	1.3.2.2	X	X	3	-
	1.3.2.3	-	-	-	-
2	2.1	X	X	-	-
	2.2	X	-	-	-
	2.3	-	-	-	-
	2.4	-	-	-	X
	2.4.1	-	-	-	-
	2.4.2	-	-	-	X
	2.4.2.1	-	-	X	-
	2.4.2.2	-	-	-	X
3	3.1	X	X	-	-
	3.2	-	-	X	X
4	4.1	-	X	-	-
	4.2	X	-	-	-
	4.3	-	-	-	-
	4.4	-	-	X	X
	4.5	-	-	-	X
	4.5	-	-	-	-
5	5.1	X	X	X	-
	5.2	-	-	X	X
	5.2.1	-	-	X	X
	5.2.2	-	-	X	X
6	6.1	X	-	X	-
	6.2	X	-	-	-
	6.3	X	-	-	-
	6.4	-	X(5)	-	X
	6.4	-	-	-	-
7	7.1	X	X	X	X
	7.2	-	-	X	X
	7.3	-	-	X	X
8	8.1	X	-	X	X
	8.2	-	-	X	X
	8.3	-	-	X	X
	8.4	-	-	-	X
9	9.1	7-18	18	120	8-55
	9.2	165-200	200	400?	170-300
	9.3	18-30	12-18	23-40	400-700
	9.4	15-80	100-300	350-1750	?
10		Stork		Werkspoor	

Bijlage 4: typologische indeling voor zuigerstoommachines.

machinebenaming
datering

Code

- 1 **drijfwerk**
 - 1 aandrijfmechaniek
 - 1 directe; krukasloze aandrijving
 - 2 balans
 - 3 krukas (aantal krukken op as)
 - 1 kruishoofd
 - 1 liggend
 - 2 staand
 - 2 trunkzuiger
 - 1 staand
 - 2 liggend
 - 2 stoomcilinders
 - 1 aantal
 - 2 ligging
 - 1 tandem
 - 2 naast elkaar
 - 3 werking
 - 1 parallel
 - 2 serie
- 2 **stoomstroming in de machine**
 - 1 wisselstroomstoommachine
 - 1 enkelwerkend
 - 2 dubbelwerkend
 - 2 gelijkstroomstoommachine
- 3 **stoomwerking in proces**
 - 1 atmosferische machines
 - 2 overdrukmachines
 - 1 gelijkdruk machines of volledruk machine
 - 2 tegendruk machine
 - 3 expansiemachine
 - 1 enkelvoudige cilinder
 - 2 expansie over twee of meer cilinders (meervoudig)
 - 1 compound
 - 2 triple
 - 3 quadruple
 - 4 vijf of meer
- 3 aftapmachine
- 4 **stoomverdeling**
 - 1 kranen
 - 2 schuiven
 - 3 kleppen
- 5 **prestaties van de machine**
 - 1 vermogen
 - 2 toerental
 - 3 werkdrukken
 - 4 afmetingen

Bijlage 5: ingevuld schema voor zuigerstoommachines.

Machinenaam datering	Jaffa ong. 1950	Schmidt/ASM ⁴ ong. 1950	Fairbarn ong. 1830
Code			
1.			
1.1.			
1.1.1.	-	-	-
1.1.2.	-	-	X
1.1.3.	X	X	X
1.1.3.1.	X	X	-
1.1.3.1.1.	X	-	-
1.1.3.1.2.	-	X	-
1.1.3.2.	-	-	-
1.1.3.2.1.	-	-	-
1.1.3.2.2.	-	-	-
1.2.			
1.2.1.	1	4	1
1.2.2.			-
1.2.2.1.	-	-	-
1.2.2.2.	-	X	-
1.2.3.			
1.2.3.1.	-	2 MD	-
1.2.3.2.	-	HD/MD/LD	-
2.			
2.1.	-	X	X
2.1.1.	-	HD/1eMD	-
2.1.2.	-	2eMD/LD	X
2.2.	X	-	-
3.			
3.1.	-	-	-
3.2.	X	X	X
3.2.1.	-	-	-
3.2.2.	X	-	-
3.2.3.	-	X	X
3.2.3.1.	-	-	X
3.2.3.2.	-	-	-
3.2.3.2.1.	-	-	-
3.2.3.2.2.	-	X	-
3.2.3.2.3.	-	-	-
3.2.3.2.4.	-	-	-
3.3.	-		-
4.			
4.1.	-	-	-
4.2.	X	zuiger	D-schuif
4.3.	-	-	-
5.			
5.1.		150epk	45PK
5.2.		220	
5.3.		50bar/425C	
5.4.			

⁴ scheepsmachine

Bijlage 6: typologische indeling voor stoomturbines.

1 expansiesysteem

- 1.1 gelijkdrukstelsysteem (actie- of impulssysteem)
- 1.2 overdrukturbine (reactieturbine)

2 aantal trappen

- 2.1 enkele trappen
- 2.2 meerdere trappen

3 stromingsrichting van de stoom

- 3.1 t.o.v. de rotoras
 - 3.1.1 axiaal
 - 3.1.2 radiaal
 - 3.1.3 tangentiaal
- 3.2 in het turbinehuis
 - 3.2.1 enkelstroom
 - 3.2.2 dubbelstroom
 - 3.2.3 meerhuizige turbines
 - 3.2.4 re-entry turbine

4 stoomtraject

- 4.1 tegendrukturbine
- 4.2 condensatieturbine
- 4.3 aftapmachine

5 prestaties

- 5.1 vermogen
- 5.2 toerental
- 5.3 stoomverbruik

Bijlage 7: ingevuld schema voor stoomturbines.

Turbinenaam datering	STAL-Werkspoor ong 1935	Parsons aftap plm 1930	Curtis plm 1920
Code			
1			
1.1	-	-	X
1.2	X	X	-
2			
2.1	-	-	-
2.2	X	X	X
3			
3.1			
3.1.1	X	X	X
3.1.2	X	-	-
3.1.3	-	X	-
3.2			
3.2.1	-	X	X
3.2.2	X	-	-
3.2.3	-	-	-
3.2.4	-	-	-
4			
4.1	-	-	X
4.2	X	X	-
4.3	-	X	-
5			
5.1		5MW	
5.2		3000	
5.3			

Bijlage 8: typologische indeling voor zuigermotoren.

motornaam, type en datering

A Constructie

- 1 drijfwerk
 - 1 kruishoofd
 - 2 trunk
- 2 ligging machine
 - 1 horizontaal
 - 2 vertikaal
- 3 ligging cilinders onderling
 - 1 lijn
 - 2 V-motor
 - 3 ster
 - 4 boxer
 - 5 opposedpiston
- 4 spoelsysteem
 - 1 kleppen
 - 2 poorten

B Werking

- 1 verbranding
 - 1 mengsel van lucht en brandstof zonder overdruk
 - 2 onder druk toevoeren van:
 - 1 brandstof (drukverstuiving)
 - 2 lucht [en brandstof] (luchtverstuiving)
- 2 werking zuigers
 - 1 enkel
 - 2 dubbel
- 3 arbeidsproces
 - 1 tweetakt
 - 2 viertakt
- 4 verbrandingsverloop
 - 1 explosie
 - 2 gelijkdrukmotor
- 5 drukvulling
 - 1 zelfaanzuigend
 - 2 onderzijde zuiger
 - 3 luchtpomp
 - 4 turbo drukvulling
- 6 ontstekingsoorzaak
 - 1 elektrisch
 - 2 warmte accumulatie
 - 3 compressie
- 7 eindcompressiedruk
 - 1 lage druk ≤ 3 atmosfeer)
 - 2 middendruk (>3 7 atmosfeer)
 - 3 hoge druk (>30 atmosfeer)
- 8 Afmetingen/prestaties
 - 1 slag
 - 2 boring
 - 3 aantal cilinders
 - 4 toerental
 - 5 vermogen per cilinder

Bijlage 9: ingevuld schema voor zuigermotoren.

motornaam: Thomassen		Kromhout	Werkspoor	Brons
type : HD inspuut		2tkk benz	A-frame	HD
datering : ong 1940		1902-1905	1903-1922	19??
Code				
A.1				
A.1.1	-	-	-	-
A.1.2	X	X	X	X
A.2				
A.2.1	X	-	-	-
A.2.2	-	X	X	X
A.3				
A.3.1.	-	-	X	-
A.3.2	-	-	-	-
A.3.3	-	-	-	-
A.3.4	-	-	-	-
A.3.5	-	-	-	-
A.4				
A.4.1	I/U	U	I/U	I/U
A.4.2	-	I	-	-
B.1				
B.1.1	-	X	-	-
B.1.2	-	-	-	-
B.1.2.1	X	-	-	-
B.1.2.2	-	-	X	X
B.2				
B.2.1	X	X	X	X
B.2.2	-	-	-	-
B.3				
B.3.1	-	X	-	-
B.3.2	X	-	X	X
B.4				
B.4.1	X	X	-	-
B.4.2	-	-	X	X
B.5				
B.5.1	X	X	X	X
B.5.2	-	X	-	-
B.5.3	-	-	-	-
B.5.4	-	-	-	-
B.6				
B.6.1	-	X	-	-
B.6.2	-	-	-	-
B.6.3	X	-	X	X
B.7				
B.7.1	-	X	-	-
B.7.2	-	-	-	-
B.7.3	X	-	X	X
B.8				
slag (mm)				
boring (mm)				
cilinders	1-3	1	2	1
toerental	200-340	-	-	-
vermogen/c	25-100	4	-	-

Bijlage 10: typologische indeling voor gasturbines.

1 kringloop

- 1 open
- 2 gesloten
- 3 semi-open

2 configuratie

- 1 enkele rotoras
- 2 twee of meer rotorassen

Bijlage 11a: primaire aandrijfmiddelen voor elektrische generatoren.

aandrijving van generatoren

- 1 stoommachine
- 2 stoomturbine
- 3 verbrandingsmotor
- 4 gasturbine

Bijlage 11b: typologische indeling voor elektromotoren.

1 constructie (zie tabel E1 op pagina E12)

2 elektrische werking

1 Gelijkstroommotoren

- 1 seriemotor
- 2 shuntmotor
- 3 compoundmotor

2 Draaistroommotor (drie-fase wisselstroommotor)

- 1 rotorbekrachtiging
 - 1 inductie
 - 2 conductie

2 rotoruitvoering

- 1 kortsluitankermotor
- 2 sleeppringankermotor
- 3 commutatormotor

3 diverse

- 1 toerental
- 2 vermogen
- 3 fabrikant

Bijlage 12: globaal overzicht hoofdindeling krachtbronnen.

stoomkracht

stoomketel

- liggend of staand

- vlampijp of waterpijp

- grootwaterruim of kleinwaterruim

stoommachine

- zuigerstoommachine

 - liggend of staand

 - kruishoofd of trunkzuiger

 - langzaamlopende of snellopende machine

 - enkelvoudige of meervoudige expansie

stoomturbine

- gelijkdruk of overdrukturbine

interne verbrandingsmachine

motor

- liggend of staand

- kruishoofd of trunkzuiger

- lage-druk, midden-druk of hoge-druk

- of: gas-, petroleum of dieselmotor

gasturbine

- open of gesloten kringloop

elektrische machine

- gelijkstroom

- draaistroom

Verantwoording van gebruikte afbeeldingen

- 1 R.L. Hills, *Power from steam. A history of the stationary steam engine* (Cambridge 1989), 32.
- 2 Hills, *Power from steam*, 38.
- 3 *Krachtwerktuigen. Stoom, handleiding voor het stoombedrijf* (4^e druk, Deventer 1941), 97.
- 4 *Werkspoor 1827-1952. Gedenkboek ter gelegenheid van het honderd vijf en twintig jarig bestaan op 9 februari 1952* (Amsterdam z.j. [1952]), 97.
- 5 *Werkspoor 1827-1952*, 99.
- 6 F.J. Drover, *Coal and oil fired boilers* (London 1924), 137.
- 7 Hills, *Power from steam*, 251.
- 8a *Stoom*, 126.
- 8b *ibidem*.
- 8c *idem*, 127.
- 8d *ibidem*.
- 9 *Werkspoor 1827-1952*, 99.
- 10 *Stoom*, 333.
- 11 *idem*, 364.
- 12 *idem*, 335.
- 13 E.F. Scholl, *De gids voor machinisten, bij poldergemalen, op fabrieken, locomotieven en stoombooten, tevens geschikt voor fabrikanten, ingenieurs en studeerenden*. (5^e druk, bewerkt, vermeerderd en vertaald door N.C.H. Verdam naar de 11e Duitse uitgave, Leiden 1896), 412.
- 14 *Stoom*, 397.
- 15 *idem*, 404.
- 16 *idem*, 429.
- 17 *Krachtwerktuigen. Oliemotoren, handleiding voor verbrandingsmotoren* (5^e druk, Deventer 1943), 105.
- 18 Goldbeck, G., *Gebändigte Kraft. Die Geschichte der Erfindung des Otto-motors* (München 1965), plaat IX.
- 19 *idem*, plaat X.
- 20 H.A. Romeyn, *Hedendaagsche motoren voor gas, benzine, petroleum en spiritus. Elementair leerboek bewerkt naar het Duitsch van professor Vater* (2^e verbeterde druk, Leiden 1914), 75.
- 21 *Oliemotoren*, 60.

- 22 idem, 179.
- 23 J.C. Westermann, *Kagen, clippers, werven en motoren* (Amsterdam 1942), 300.
- 24 Oliemotoren, 16.
- 25 Stoom, 350.
- 26 P. van Cappelle, *De electriciteit. Hare voortbrening en hare toepassing in de industrie en het maatschappelijk verkeer* (zesde herziene en veel vermeerderde druk door J.M.G. Scheffer, Leiden z.j.[1908]), 304.
- 27 *De electriciteit*, 303.
- 28 idem, 310.
- 29 A. ten Bosch N.Jzn., *De hoofdbegrippen over electriciteit en het gebruik van electrische toestellen, uiteengezet ten behoeve van den gebruiker* (4^e druk, Deventer 1913), 38.
- 30 *Krachtwerktuigen. Electrotechniek, handleiding voor het electrische bedrijf* (5^e druk, Deventer 1947), 127.
- 31 *Electrotechniek*, 127.
- 32 *De electriciteit*, 604.
- 33 *De electriciteit*, 611.

Voorpagina:

Een compound balans-stoommachine, zoals deze in gebruik waren in het midden van de negentiende eeuw. uit: Scholl, *De gids voor machinisten*, 420.

Gebruikte literatuur

Boer, M.G. de, *Honderd jaar machineindustrie op Oostenburg Amsterdam 1827-1927* (Amsterdam 1927).

Boer, Th. en P. Boer, 'Stroomopwekking en motoren, groep VI: electrotechniek', in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Transport en electrotechniek deel E* (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1948]) 763-837.

Boks, D.J. en L.H. van der Deyl, 'Stoomketels, groep II: krachtwerktuigen, ondergroep B' in J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie deel M* (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1950]), 170-217.

Bosch N.Jzn., A. ten, *De hoofdbegrippen over electriciteit en het gebruik van elektrische toestellen, uiteengezet ten behoeve van den gebruiker* (4^e druk, Deventer 1913).

Brugmans, I.J., *Paardenkracht en mensenmacht; sociaal-economische geschiedenis van Nederland 1795-1940* ('s Gravenhage 1961).

Cappelle, P. van, *De electriciteit. Hare voortbrenging en hare toepassing in de industrie en het maatschappelijk verkeer* (zesde herziene en veel vermeerderde druk door J.M.G. Scheffer, Leiden z.j.[1908]).

Cummins jr., C.L., *Internal fire* (Lake Oswego, 1976).

Damsma, D, J.M.M. de Meere en L. Noordegraaf, 'Statistieken van de Nederlandse Nijverheid uit de eerste helft der 19e eeuw. Supplement', *Rijks Geschiedkundige Publicatiën, grote serie 168* ('s Gravenhage 1979).

Drover, F.J., *Coal and oil fired boilers* (London 1924), 99-179.

Duncan, J., *Steam and other engines* (herdruk, London 1950), 342-372.

Fremery, D.A. de, 'Constructie-details van gelijkstroomstoommachines', *De Ingenieur*, 38 (1918) No. 12, 807-817.

Goedkoop, J., 'De ontwikkeling van den Kromhout-motor van 1901 tot op heden', in: J.C. Westermann, *Kagen, clippers, werven en motoren* (Amsterdam 1942), 284-316.

Goldbeck, G., *Gebändigte Kraft. Die Geschichte der Erfindung des Otto-motors* (München 1965).

Griffiths, R.T., *Industrial retardation in the Netherlands 1830-1850*, (Den Haag 1979).

Guhrauer, F., 'De gasturbine, groep II: krachtwerktuigen, ondergroep F', in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie deel M* (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1950]), 325-329.

Harman, R., 'Gas turbines', in: M. Kutz, *Mechanical engineer's handbook* (New York 1986), 1984-1998.

Heintzenberg, Fr. , 'Die ersten Entwicklungsstufen des elektrischen Antriebs im 19. Jahrhundert', *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 30 (Berlin 1941), 33-45.

Hesselmans, A.N., 'Elektriciteit', *Geschiedenis van de techniek in Nederland. De wording van een moderne samenleving III* (Zutphen 1993), 135-161.

Hills, R.L., *Power from steam. A history of the stationary steam engine* (Cambridge 1989).

Hooff, G. van, 'De Nederlandse machinenijverheid 1825-1914, enkele hoofdlijnen', *Jaarboek voor de geschiedenis van bedrijf en techniek* 3 (Utrecht 1986), 159-182.

Hooff, W.H.P.M. van, *In het rijk van de Nederlandse vulcanus. De Nederlandse machinenijverheid 1825-1914; een historische bedrijfstakverkenning* (Amsterdam 1990).

Jong, J.A. de, 'Stoomturbines, groep II: krachtwerktuigen, ondergroep E' in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie deel M* (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1950]), 291-325.

Jonge, J.A. de, *De industrialisatie van Nederland tussen 1850 en 1914* (herdruk, Nijmegen 1976).

Krachtwerktuigen. Electrotechniek, handleiding voor het elektrische bedrijf (5^e druk, Deventer 1947).

Krachtwerktuigen. Oliemotoren, handleiding voor verbrandingsmotoren (5^e druk, Deventer 1943).

Krachtwerktuigen. Stoom, handleiding voor het stoombedrijf (4^e druk, Deventer 1941).

Lintsen, H.W., 'Van windbemaling naar stoombemaling; innoveren in Nederland in de negentiende eeuw', *Jaarboek voor de geschiedenis van bedrijf en techniek* 2 (Utrecht 1985), 48-63.

Lintsen, H.W., 'Stoom als symbool', *Geschiedenis van de techniek in Nederland. De wording van een moderne samenleving 1800-1890*, IV (Zutphen 1993), 105-150.

Lintsen, H., G. van Hooff en G. Verbong, 'Werktuigbouw in Nederland in de Negentiende eeuw: een techniek zonder beroepsgemeenschap', *Jaarboek voor de geschiedenis van bedrijf en techniek* 8 (Amsterdam 1991), 81-100.

Lorenz, H., 'Die Entwicklung der Maschinentheorie im 18. und 19. Jahrhundert', *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 29 (Berlin 1940), 1-14.

Machinefabriek Gebr. Stork en Co, *Tachtig jaar Stork* (Hengelo 1948).

Mahr, O., 'Zeittafel zur Geschichte der Elektrotechnik', *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 30 (Berlin 1941), 46-56.

Matschoss, C., *Geschichte der Dampfmaschine. Ihre Kulturelle Bedeutung, technische Entwicklung und ihre grossen Männer* (Berlin 1901).

Matschoss, C., *Die Entwicklung der Dampfmaschine twee delen* (facsimile uitgave Düsseldorf 1987).

Meier Mattern, H.M. en C. Sokoloff, 'Zuigerstoomwerktuigen, groep II: krachtwerktuigen, ondergroep C', in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie* deel M (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1950]), 217-272.

Meyier jr., J.E. de, *De technische vraagbaak voor Nederland en Koloniën* (2^e druk, Deventer 1917), 782-827.

Miller, R. von, 'Der Stromverbrauch im Wandel der Zeiten', *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 30 (Berlin 1941), 25-32.

Muysken, J., 'Eenige mededeelingen over het ontstaan en de ontwikkeling der machine-industrie in Nederland', *De Ingenieur* 48 (1928) No. 11, W99-W104.

Nooren, M. en A. Jansen, 'Stoom voor allen', *Den Haag energiek, hoofdstukken uit de geschiedenis van de energievoorziening in Den Haag* ('s Gravenhage 1981), 268-296.

Noorlander, C., *Oliemotoren* (5^e druk, Deventer 1962).

Noort, J.W.P.P. van den, 'Het begin van het Rotterdamse gemeentelijk electriciteitsbedrijf (1895)', *Jaarboek voor de geschiedenis van bedrijf en techniek* 1 (Utrecht 1984), 288-310.

Ouden, A. den, *Een door een zuigerstoommachine aangedreven generator installatie in een looierij te Oisterwijk* (Eindhoven z.j.).

Ouden, A. den, *De ontwikkeling van mechanische drijfkracht voor het fabrieksbedrijf* (2^e herziene druk, Eindhoven 1987).

Pipijn, G., *Leerboek der werktuigkunde, stoomketels en stoommachines, met practisch onderricht over het vervaardigen en behandelen der grote stoomtuigen, alsmede de volledige verklaring en afbeelding der nieuwere stoommachines* (Gent 1876).

Romeyn, H.A., *Hedendaagsche motoren voor gas, benzine, petroleum en spiritus. Elementair leerboek bewerkt naar het Duitsch van professor Vater* (2^e verbeterde druk, Leiden 1914).

Rosenthal, H., *Neuere Schiffsmaschinen. Hilfmaschinen und Apparate nebst den wichtigsten Klein-schiffsmotoren und Dampfturbinen. Atlass* (heruitgave, Berlin z.j. [1907])

Rosenthal, H., *Neuere Schiffsmaschinen. Hilfmaschinen und Apparate nebst den wichtigsten Klein-schiffsmotoren und Dampfturbinen. Text* (heruitgave, Berlin z.j. [1907])

Roy, A.W. de, *100 jaar verbrandingsmotor* (Delft 1960).

Schippers, H., W.H.P.M. van Hooff en M.S.C. Bakker, *'Machinebouw', Geschiedenis van de techniek in Nederland. De wording van een moderne samenleving 180-1890 IV* (Zutphen 1993), 37-65.

Scholl, E.F., *De gids voor machinisten, bij poldergemalen, op fabrieken, locomotieven en stoombooten, tevens geschikt voor fabrikanten, ingenieurs en studeerenden*. (5^e druk, bewerkt, vermeerderd en vertaald door N.C.H. Verdam naar de 11e Duitse uitgave, Leiden 1896).

Schult, H., *'Die Entwicklung des Dampfkraftwerkes', Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* 30 (Berlin 1941), 17-24.

Schwartze, Th., *Katechismus der Dampfkessel, Dampfmaschinen und anderer Waermemotoren* (7^e vermeerderde en verbeterde druk, Leipzig 1901), 171-194.

Stoombedrijf en veiligheid. Uitgegeven ter gelegenheid van het honderdjarig bestaan van de Dienstvoor het Stoomwezen. ('s-Gravenhage 1955)

Storer, J.D., *A simple history of the steam engine* (London 1969).

Stork, C.F., 'De Nederlandsche machinenijverheid', *Gedenkboek uitgegeven ter gelegenheid van het vijftigjarig bestaan van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs 1847-1897* ('s Gravenhage z.j. [1897]), 213-218.

Tonkes, G.J., 'Benzinemotoren: groep II krachtwerktuigen, ondergroep G' in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie deel M* (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1950]), 329-345.

Tonkes, G.J., 'Dieselmotoren: groep II krachtwerktuigen, ondergroep H', in: J.E. de Vries (red.), *De technische vraagbaak. Machines en mech. technologie deel M* (5^e gewijzigde druk, Deventer z.j. [1950]), 346-512.

Tijen, H.W. van, en C. Kapsenberg, *Scheepsolomotoren en gasturbines* (9^e druk, Deventer 1956).

Werkspoor 1827-1952. Gedenkboek ter gelegenheid van het honderd vijf en twintig jarig bestaan op 9 februari 1952 (Amsterdam z.j. [1952]).

Westermann, J.C., *Kagen, clippers, werven en motoren* (Amsterdam 1942).