

# Het historisch verband tussen voortstuwcr en machine

door Prof. Ir. G. AERTSSEN

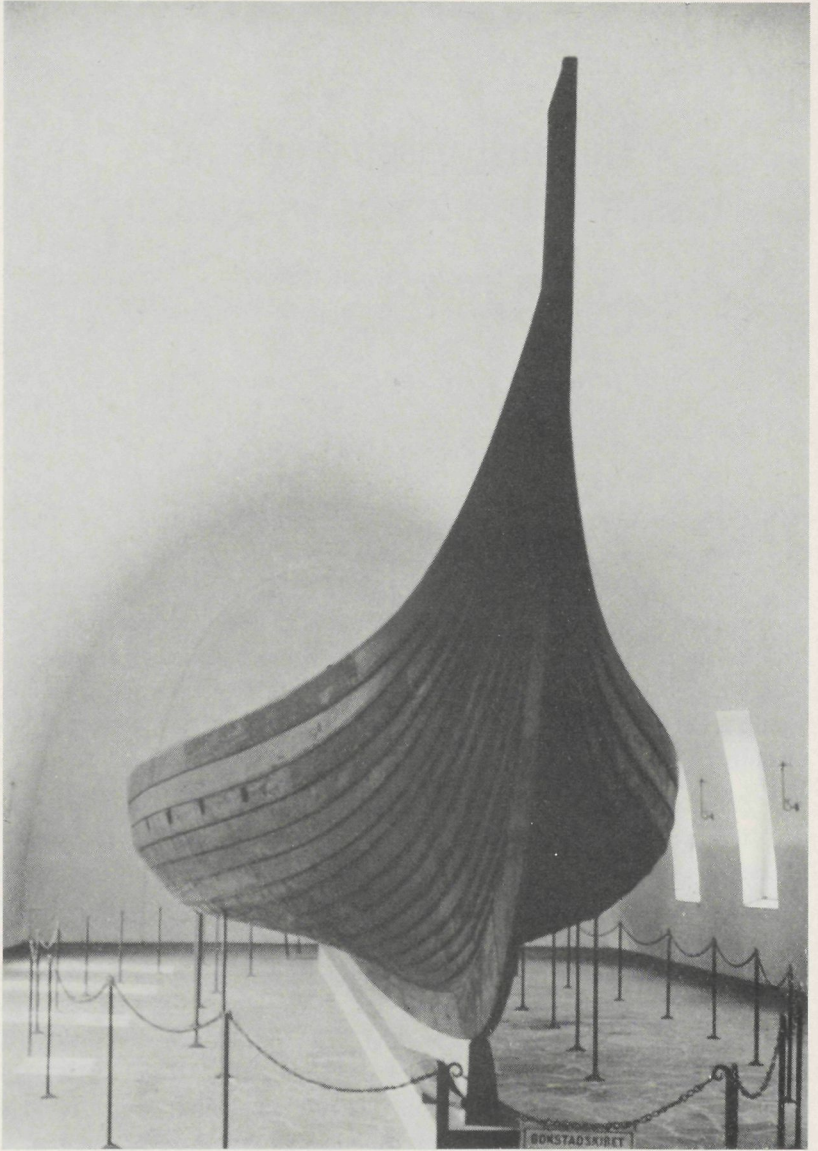
Gewoon Hoogleraar bij de Universiteit te Gent

*Voordracht gehouden op 15 maart 1966*

TROTS het toenemend wegen- en luchtverkeer, blijft de waterweg, over zee en over de binnenwateren, het bij uitstek economische transportmiddel voor massagoederen. En steeds is het schip groter en sneller geworden, dus steeds heeft de mens moeten zoeken naar sterkere en meer rentabele machines. Dat de voortstuwcr zich gaandeweg heeft moeten aanpassen aan deze grotere machines ligt voor de hand. Vandaar het onafwendbaar historisch verband tussen voortstuwcr en machine.

Zeilen en roeien zijn gekend sedert de Oudheid. Maar het zijn de Vikings die deze voortstuwingsmiddelen een behoorlijk rendement hebben weten te geven. Hun drakkar met de vierkante zeilen is een perfekt schip. Door een gepaste verhouding te geven aan lengte en deplacement, door de boordplanken de stroomlijnen te laten volgen (Fig. 1) zijn zij de eerste geweest « long ships » te bouwen, schepen die snelheid kunnen houden in zeegang, schepen die de Noord-Atlantische Oceaan konden oversteken. Niet slechts waren de Vikings hydrodynamici, maar met hun dwarse spanten zijn zij de eerste moderne scheepsbouwers. Deze koene zeelui echter hadden niet veel begrip voor zeewaardigheid, want een dek kenden hun schepen niet.

Ook het schoepenwiel werd in de Oudheid voor voortstuwcr van schepen gebruikt en de Romeinen hadden raderschepen aangedreven door een ossenmolen. Dit voortstuwingsmiddel heeft zich weten aan te passen aan de machines die te voorschijn kwamen bij aanvang van de vorige eeuw en zijraderschip en sternwheeler met oscillerende



*Fig. 1. Gokstad Ship, Vikings Museum, Oslo*

schoepen komen nog veel voor op rivieren met geringe diepgang (Fig. 2).

Het schoepenwiel echter draait traag, 10 à 40 t/m, is dus aange-  
wezen op de trage volumineuze stoommachine, vaak met oscillerende  
cilinders. Het vervaardigen van snellere stoommachines en in het bij-  
zonder de keuze van de stoomturbine en de verbrandingsmotor als  
voortstuwingsmachine hebben het gebruik van de schroef, die veel  
lichter is dan het schoepenwiel, algemeen gemaakt in de tweede helft  
der XIX<sup>e</sup> eeuw.

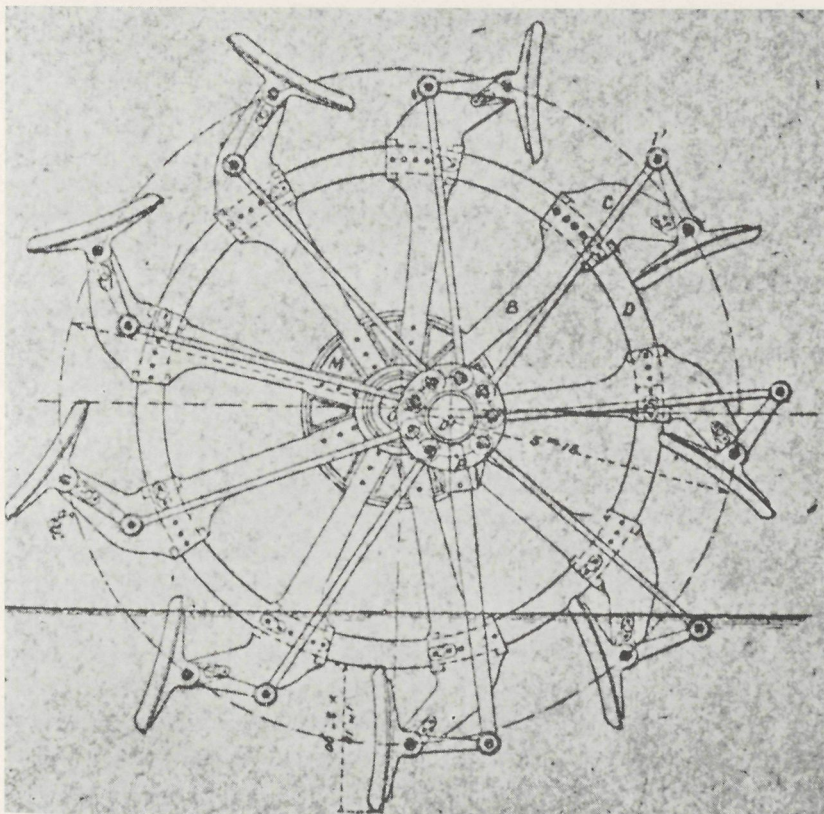


Fig 2 (1). Wielvoortstuwcr met oscillerende schoepen

(1) Cliché J. Boulvin : Cours de Mécanique appliquée aux Machines, 6<sup>o</sup> Volume  
(2<sup>e</sup> Partie).

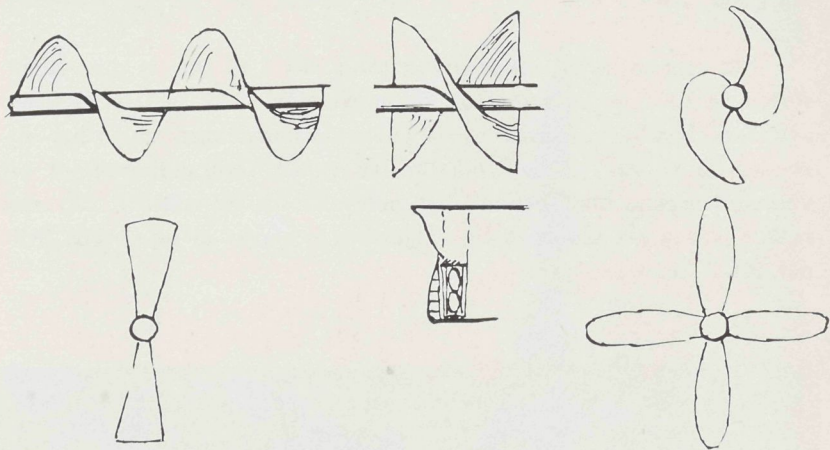


Fig. 3. Ontwikkeling der Scheepsschroef

De geschiedenis van de schroef van de Engelse landbouwer Smith is gekend. Smith nam in 1836 brevet voor een éénbladschroef met dubbele spoed (fig. 3 boven links). Bij het proeflopen brak een spoed en de beschadigde schroef deed het schip sneller lopen. Dit toeval gaf aanleiding tot het ontdekken van de scheepsschroef.

Primitieve scheepsschroeven zijn nog Fig. 3 boven midden en rechts. Fig. 3 onder links stelt de tweebladige schroef voor van het zeilschip van stoomvoortstuwing voorzien, maar waarvan de bladen, als het schip onder zeil vaart, vertikaal worden geplaatst, of nog in een raam in het achterschip worden gehesen (Fig. 3 onder midden). Fig. 3 onder rechts toont eindelijk de moderne vierbladige schroef.

Toch is het schoepenwiel als voortstuwder van zeeschepen gebruikt gebleven tot bij aanvang dezer eeuw en het is opvallend dat men op de mailboten Oostende-Dover plots is overgegaan van de zware langzaam lopende zuigerstoommachines met schoepenwielen naar de lichtere snelle turbines met schroeven. Aan te stippen valt dat, behalve de zware onderhoudskosten, de schoepenwielen in de zijden van het schip geplaatst het nadeel hadden in een ruwe zee bij het rollen van het schip boven water te komen en daardoor de machine op hol te brengen.

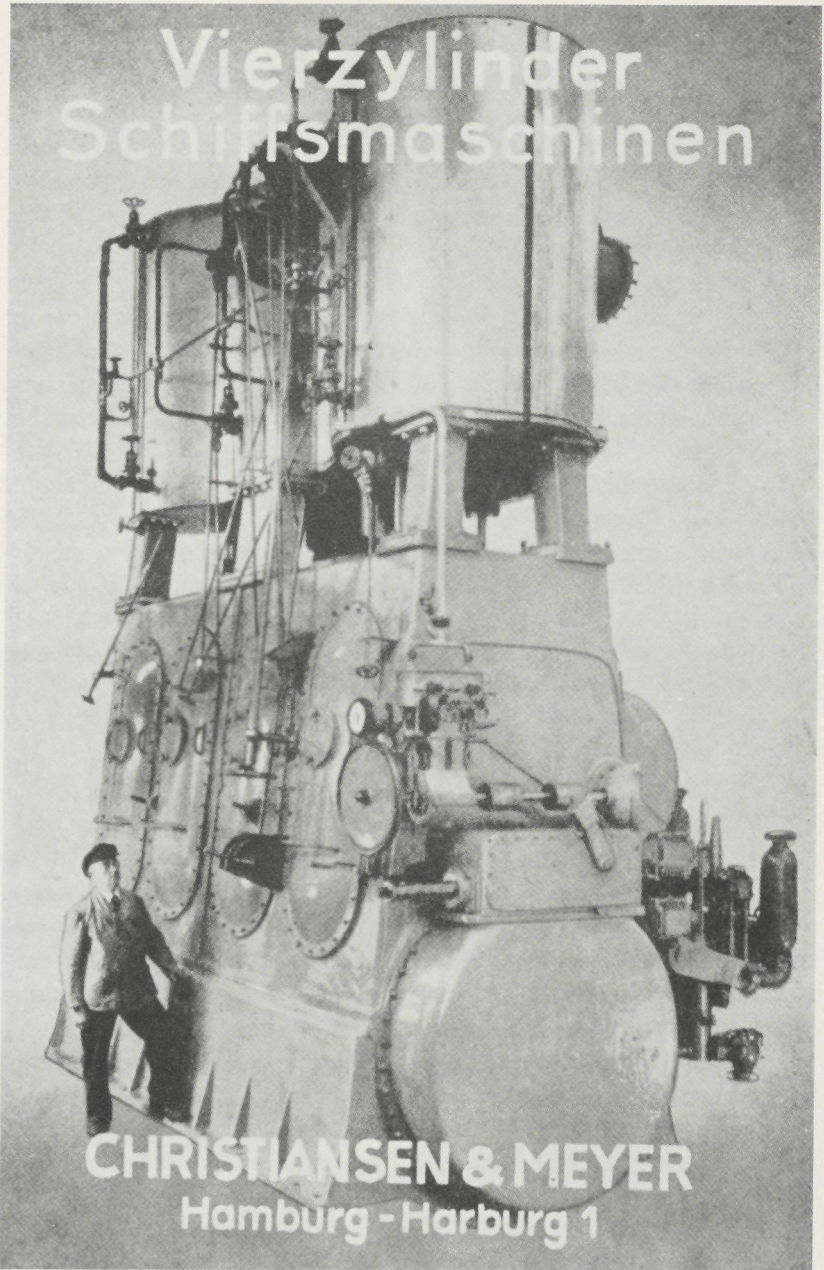
Parallel met de voortstuwder heeft de machine zich steeds ontwikkeld in de richting van een geringer gewicht per eenheid van vermogen, Kg. per pk. en een geringer brandstofverbruik, gr. per pk-uur

terwijl het streven van uitvinders en constructeurs tegelijkertijd volledige bedrijfszekerheid beoogde.

Meerdere namen dienen gekoppeld aan de uitvinding van de stoommachine. Denis Papin, oud-leerling van Huygens, bouwt in 1707 een stoomketel voorzien van veiligheidsklep en gebruikt zelfs de stoom om een pomp aan te drijven. Op weg naar Londen waar van hem werd verwacht dat hij een stoommachine op een schip zou monteren, werd hij te Cassel op de Fulde door schippers gemolesteerd. Newcomen, een eenvoudige smid, heeft voor de uitvinding van Papin een volwaardige industriële toepassing: hij bouwt een stoompomp die op het gepast ogenblik komt, want vele Engelse mijnen zijn ver uitgeput. Maar nu daagt James Watt op die van de atmosferische machine van Newcomen de dubbelwerkende stoommachine gaat maken met schuivenkast.

Met Fulton zien we op de Seine in 1803 de eerste stoomboot. Maar Fulton slaagt er niet in Napoleon onder de arm te nemen. Hij keert terug naar Amerika, zijn geboorteland, waar hij de eerste stoombootdienst inricht op de Hudson. De eerste locomotief van Stephenson komt in 1815 en de schaar van Stephenson toegepast op de stoommachine van James Watt maakt nu de bouw mogelijk van de rationele omkeerbare stoommachine.

In 1818 vertrekt de « Savannah » uit Savannah en bereikt Liverpool na 26 dagen vaart, waarvan 18 onder stoom. De « Sirius » maakt in 1838 de overtocht Londen-New York op 18 1/2 dagen en dit nu uitsluitend op stoom, al zijn masten, zeilen enz. in de ketel gegaan. Dan ontwerpt Brunel de « Great Britain », het eerste ijzeren schip met schroef en in 1854 wordt de kiel gelegd van de « Great Eastern », een curieus mengsel van wiel- en schroefvoortstuwing. Weinig verbeteringen werden rond die tijd gebracht aan de stoommachine, eenvoudige zuigermachine met enkelvoudige expansie en injectiecondensator. Wel werden reeds rond 1834 compoundmachines vervaardigd bij Feyenoord door Roentgen, maar het duurde tot in de zestiger jaren vooraleer de compoundmachine met oppervlakcondensator en 4 at. stoomdruk werkelijk ingang vond in de koopvaardij. Hiermede werd dan het kolenverbruik teruggebracht van 1800 tot 1100 g. per ipk-uur terwijl het specifiek gewicht van de machine daalde van 400 tot 250 Kg. per ipk. Hierin zit dan ook de invloed van het vervangen van het schoepenwiel door de schroef want het specifiek gewicht gaat niet alleen over de machine, maar over de volledige inrichting schroef inbegrepen. Een verdere verbetering bracht de triple-expansie machine



*Fig. 4. Viercylinder-stoommachine Christiaensen & Meyer*

omtrent 1880 toen door het opvoeren van de stoomdruk op 12 at., het kolenverbruik in de Schotse ketels daalde tot 800 en 700 g. en het specifiek gewicht werd teruggebracht op 230 Kg. per ipk.

Tijdens de periode tussen de twee oorlogen werd de stoomdruk nog verder opgedreven tot 25 at., oververhitting en kunstmatige trek werden toegepast en het toevoegen aan de triple-expansie machine van een exhaustturbine liet toe het kolenverbruik omlaag te drukken tot 400 g. per ipk-uur. Het specifiek gewicht van de machineinstallatie daalde tot 200 Kg. per ipk. voor de Lentz- en voor de Christiansen & Meyer machine (Fig. 4).

De meest markante van deze verbeteringen in de stoominstallatie situeren zich in de tweede helft van de vorige eeuw. Het wekt dan ook geen verwondering dat, waar in het midden van de vorige eeuw slechts 10 % van de schepen op stoom vaarden, bij aanvang dezer eeuw nog slechts 10 % van de schepen uitsluitend zeilvoortstuwing hadden. Toch zien we tot bij de eeuwwisseling de meeste schepen toegerust met een hulpzeilvoortstuwing. Zelfs in 1877 leven we nog in de Trans. R.I.N.A. : « Many owners are directing their attention most closely to having an accurate entry kept in the log book of the number of hours their vessels are under canvas and the number and description of the sails set, the Chief Engineer, in addition to the Captain, having to report on this ». Het is dan ook niet te verwonderen dat de cargo « Benledi », gebouwd in 1871, nog een volwaardige vierkante zeilinrichting heeft (Fig. 5). De « Benledi » heeft een deadweight van 2230 ton en is 50 m. lang, haar snelheid van 9 1/4 knoop wordt bereikt met een compound machine van 870 ipk.

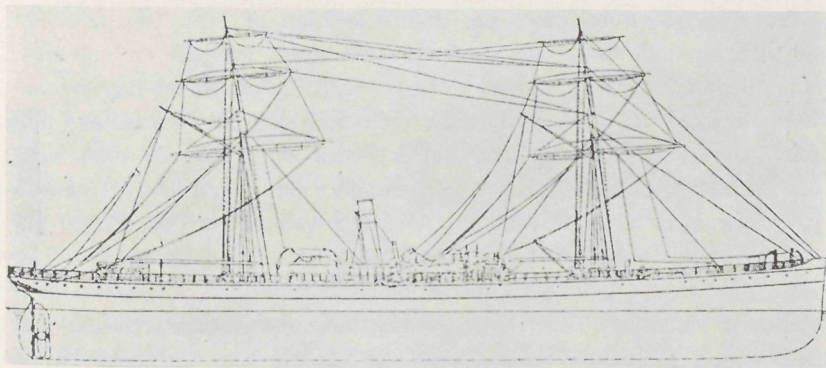
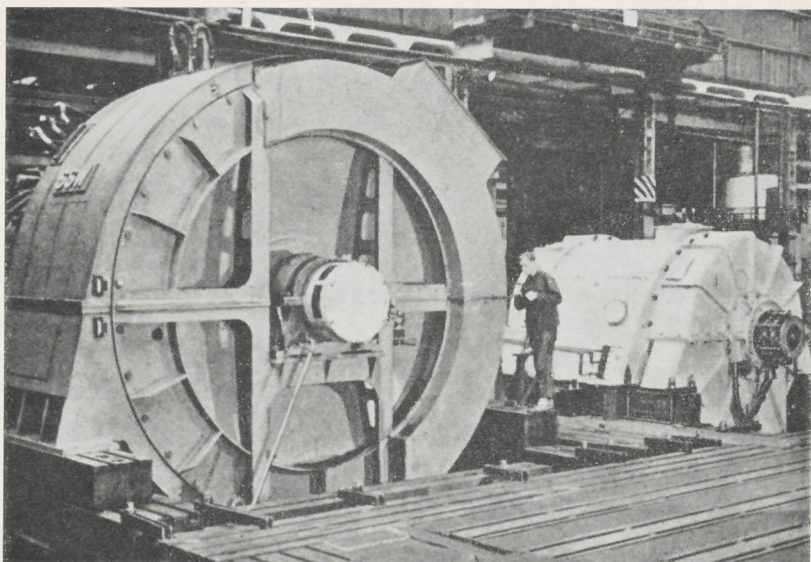


Fig. 5. Flush-decker BENLEDI, stoom- resp. zeilschip



*Fig. 6. Turbo-eletrische Voortstuwingsgroep op Proefstand*

Een verdere verbetering van de stoominrichting — samen met betere arbeidsvoorwaarden — werd bereikt toen bij aanvang dezer eeuw pogingen werden gedaan kolen door olie als brandstof te vervangen. De eerste oliebranders wekten zorgen en in 1914 was slechts 3 per cent van de totale wereldtonnemaat voorzien van branders. In 1958 gebruikte nog slechts 13 per cent van deze tonnemaat kolen.

Maar nog een andere transformatie voltrok zich bij de eeuwwisseling toen zeer grote transatlanters werden gebouwd en de zeer grote zuigerstoommachines die daarin werden geplaatst de aandacht op zich trokken door hun buitengewoon groot gewicht en volumen. Naar lichtere stoominstallaties werd gezocht. Op de Naval Review van 1897 verscheen de « Turbinia » die reeds in 1894 met Parsons-turbines was toegerust en een snelheid bereikte van 34 knoop. In 1904 werd dan de eerste turbine-transatlantier, de « Virginian », gebouwd en een paar jaar later volgen de grote Cunarders van 230 m. en 65.000 pk, met 25 kn., de vierschroefschepen « Mauretania » en « Lusitania ». Het ware niet meer doenbaar geweest deze schepen van zuigerstoommachines te voorzien. De grootste zuigerstoommachines waren die van de « Kaiser Wilhelm II », circa 20.000 pk. De vier turbines van de Cunarders werden direct aan de schroef gekoppeld die omwille van

een nog aanvaardbaar rendement op 180 t/m liep. Dit leidde tot een zeer lange rotor voor de turbine en reeds in 1909 werd de « Vespasian » toegerust met een turbine met enkelvoudige tandwieloverbrenging. Het vervaardigen van goede tandwielen na de eerste wereldoorlog is aanleiding geweest dat in de toekomst een dubbele tandwieloverbrenging het vermogen van de turbine naar de schroef voerde.

De stoomturbine met de waterpijpketels is zo de klassieke machine geworden voor de grote transatlantiekers en de snelle kanaalschepen. De « Princesse Elisabeth » van de dienst Oostende-Dover was het eerste turbineschip van het vasteland.

Stoomdruk en overhitting werden verder in de loop dezer eeuw opgedreven en voor een druk van 50 at. en een overhitting van 450° C wordt een olieverbruik gemeten, voortstuwing alleen, van 210 g. per pk-uur. Het gewicht van de machineinrichting daalt tot 70 Kg. per pk. Het hoogtepunt van de ontwikkeling van de stoomturbine werd bereikt toen, zoals op sommige pakketboten, het vermogen elektrisch naar de schroef werd overgebracht (Fig. 6).

Intussen werd gezocht naar een machine met veel hoger thermisch rendement. Reeds in het midden der vorige eeuw wanneer men de compoundzuigermachines met oppervlak-condensors ging bouwen, dachten uitvinders aan een thermische machine waar direct de verbrandingswarmte in arbeid zou worden omgezet. De schroef die nu goed gekend was bleek daartoe de geschikte voortstuwer.

Lenoir, een Belg die naar Parijs was uitgeweken, en Fransman werd genaturaliseerd, bouwt in 1860 een gasmotor waarvan de uitvoering zeer goed is verzorgd en sterk gelijkt op een stoommachine: hij is tweetakt-dubbelwerkend, heeft een schuivenverdeling en de Watt-regulator. Met een klos van Ruhmkorff verwekt hij de ontploffing (Fig. 7).

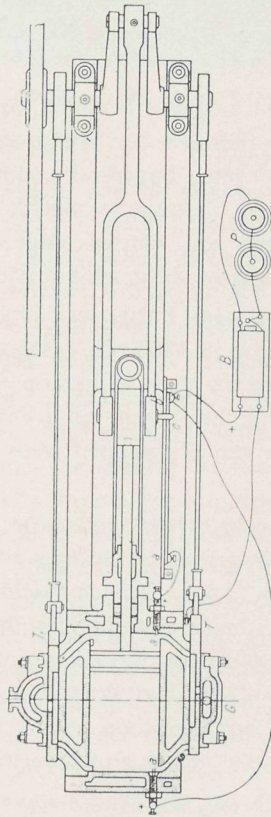
Het rendement van deze motor echter kon niet anders dan gering zijn want er was geen compressie en de expansie was onvolledig voor een toelaat die zowat 50 % was. De gemiddelde druk was niet hoger dan 2 at. Het zou ook Lenoir geweest zijn die de eerste motorboot bouwde in 1865. Deze motorboot, die op petroleum vaarde, verdween echter in de oorlog van 1870. Dat deze motor geen succes oogstte, vond zijn oorzaak in het buitengewoon hoge verbruik dat circa 700 g. per pk moest zijn en verder in het grote specifiek gewicht.

Het was rond die tijd dat een Franse spoorwegingenieur, Beau de Rochas, het middel aan de hand deed, om volledige inlaat en volledige

expansie te verkrijgen. In zijn Mémoire van 1862 waarin hij zijn vier-takcyclus beschrijft onderstreept hij dat het rendement van de cyclus verhoogt met de graad van compressie, en dat de compressie begrensd wordt door het gevaar voor ontploffing. Beau de Rochas, die alleen de gasmotor in het oog had, denkt nochtans reeds aan de dieselmotor waar hij in overweging neemt de zelfontbranding te gebruiken voor de normale werking van de motor.

Beau de Rochas was een denker, geen mechaniker, en voor het verwezenlijken van zijn cyclus zullen we moeten wachten tot in 1876, toen Otto de succesvolle viertakmotor bouwde.

Het is een feit dat zich herhaaldelijk voordeed in de geschiedenis van de techniek. En als we bedenken dat op dit ogenblik de scheepvaart in het teken staat van de motor, dan moeten we een gemeen-



*Fig. 7. Eerste Gasmotor van Lenoir (cliché Prof. M. Serruys)*

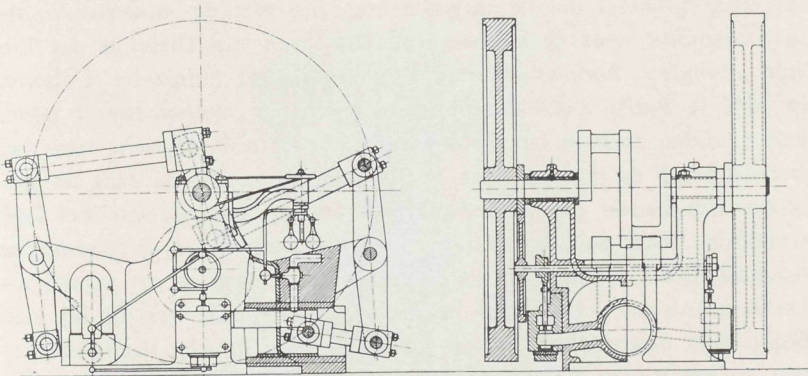


Fig. 8. Eerste Benzinemotor van Forest voor VOLAPUK  
(Cliché Prof. M. Serruys)

schappelijke hulde brengen aan pioniers als Lenoir, Beau de Rochas, Otto, Forest en Diesel.

Omtrent 1880 zien we dan uitvinders die hun motor op boten plaatsen, Brayton in Amerika in 1877, in Duitsland Daimler in 1886 en Benz in 1887. Van Forest weten we dat hij in 1887 een benzine-motor bouwt die hij opstelt in een boot, de « Volapuk » (Fig. 8). Deze motor heeft tegengestelde zuigers die een as drijven met twee krukken. Forest zou inderdaad de eerste zijn geweest om een motor te bouwen met tegengestelde zuigers, idee dat we veel later zullen terugvinden in de tweetakt-Junkers motor. De ontploffing wordt teweeggebracht door een vonk.

Het is ook Forest die in 1888 de eerste compoundmotor bouwt die zal bestemd zijn voor het yacht « Jolie-Brise » (Fig. 9). Deze motor is een vijfcyliermotor bestaande uit twee groepen van viertakt-cylinders waartussen een tweetakt-dubbelwerkende cylinder is opgesteld. Een jaar later bouwt Forest de eerste viercylinder viertakt motor voor het yacht « Ellen » en hetzelfde jaar voor de Franse militaire marine de eerste motor met zes cylindere viertakt.

Al deze machines zijn ontploffingsmotoren die uitsluitend voor het voortstuwten dienen van kleine vaartuigen.

Bij aanvang dezer eeuw wordt een poging ondernomen om gas te produceren uit steenkool met gasgeneratoren en dan voor de voortstuwning echte gasmotoren te gebruiken. Het bleef bij enkele exemplaren. Het verbruik is nochtans gering, 400 g. per pk-uur.

Het is Diesel die de uitvinder zal zijn van de moderne voortstuwingsmotor voor de koopvaardij. Het leven van Diesel is dat van vele uitvinders, hoopvol, glorievol, maar dikwerf rampzalig. Geboren in 1858 te Parijs van Duitse ouders, bracht hij, amper twaalf jaren, vele avonden door in het Conservatoire des Arts et Métiers, waar hij werkelijk van de motoren niet weg te jagen was. Er was daar de gasmotor van Lenoir die in onbruik was geraakt omwille van het lage rendement. Ook staarde de jongen heelder uren naar de thermische machine van Carnot. Zijn vader verkocht zo goed en zo kwaad als het kon lederen voorwerpen in een volkrijke buurt, terwijl hij zich bezig hield met wijsbegeerte en spiritisme. Zijn moeder deed vertalingen uit het Engels. In dit milieu moest Diesel reeds vroeg drie talen vlot spreken en zeker was hij niet verwend daar hij tussen de schooluren boodschappen moest doen voor zijn vader. In 1870 breekt de oorlog uit. De Duitsers moeten Parijs verlaten en de familie Diesel wijkt uit naar Engeland. Rudolf vervangt het Conservatoire des Arts

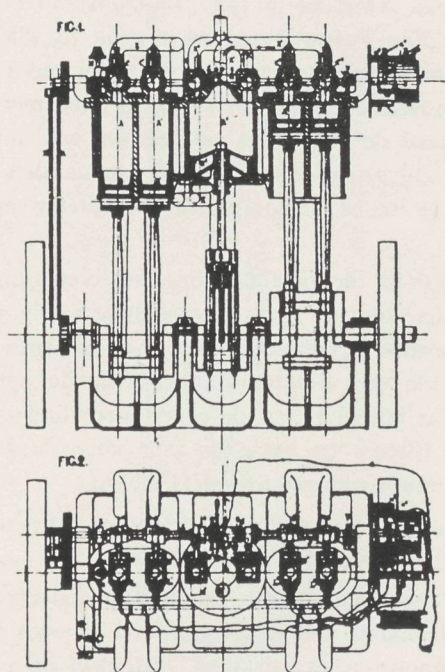
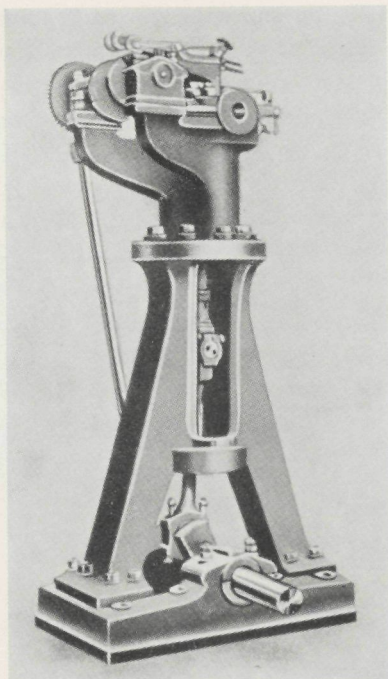


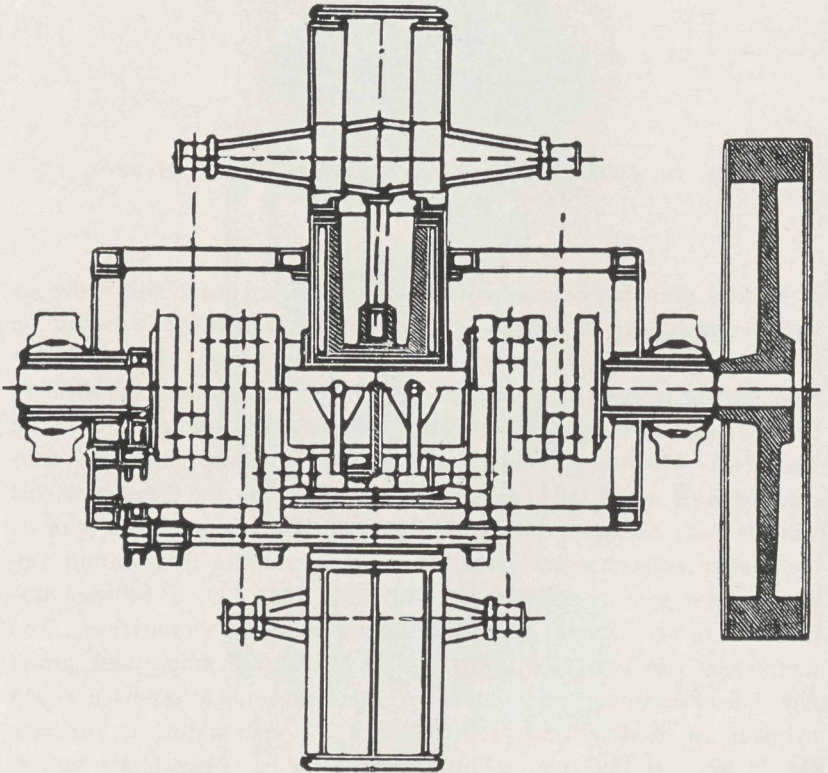
Fig. 9. Eerste Compoundmotor van Forest voor JOLIE-BRISE



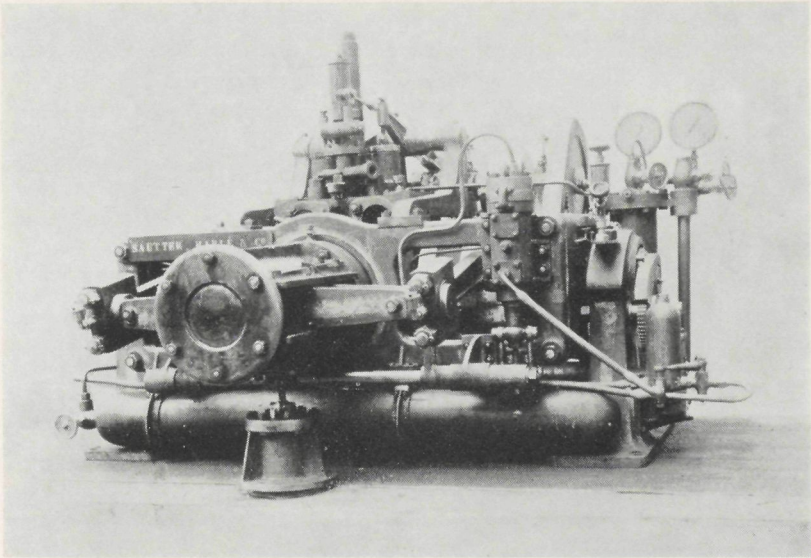
*Fig. 10. 1902 : Eerste Belgische Industriële Dieselmotor van Carels*

et Métiers door het Science Museum van Londen waar zijn vader de weetgierigheid van de jongen voor al wat werktuigkunde is begint op te merken. De ouders nemen dan de grote beslissing : Rudolf wordt naar familie in Augsburg gezonden die hem een academische vorming bezorgt. Op 18-jarige leeftijd vangt Rudolf zijn studies aan in de Technische Hochschule dezer stad en het is vermoedelijk zijn leermeester Karl van Linde, de geniale uitvinder van de ijsmachine, die hem de ware betekenis deed inzien van de cyclus van Carnot. Van de toenmalige zuigerstoommachine waar het verval van temperatuur van warmtebron naar condensor niet veel meer dan  $200^{\circ}$  C bedroeg was niet veel te verwachten. Het rendement van deze stoominrichting kon niet hoger zijn dan 15 %. Het temperatuurverval moest veel groter zijn. Diesel droomde er van lucht op hoge druk samen te persen in een cilinder en in deze hete lucht stofkool tot verbranding te brengen. Op 28 februari 1892 neemt Diesel zijn patent en volgend jaar schrijft hij een werk over theorie en bouw van rationele thermische machines.

Hij neemt Friedrich Krupp onder de arm en bekomt de nodige financiële hulp om een researchlaboratorium op te richten te Augsburg. Na tegenslagen met zijn stookmotor onderneemt hij proeven met petroleum als brandstof en het resultaat is schitterend. Door de verbrandingslucht samen te persen tot circa 500° C slaagt Diesel er in verstoven petroleum te verbranden en het drijvend koppel te bekomen. Aanvankelijk wenste Diesel de cyclus van Carnot te verwezenlijken begrepen tussen twee isothermen en twee isobaten. Na zijn eerste ontgoochelingen met de stookmotor ging hij spoedig over tot de geleidelijke verbranding waarbij naar een constante druk tijdens het verbrandingsproces wordt gestreefd (Gleichdruckverfahren). Vijf jaar na het neerleggen van zijn patent, in 1897, draaide de eerste eencylinder met een vermogen van 18 pk. Volgend jaar slaagde Diesel met een



*Fig. 11 a. 1903 : Eerste Franse Scheepsdiesel van Sauter-Harlé*



*Fig. 11 (°). b. 1903 : Eerste Franse Scheepsdieselmotor van van Sautter-Harlé (Cliché Serruys)*

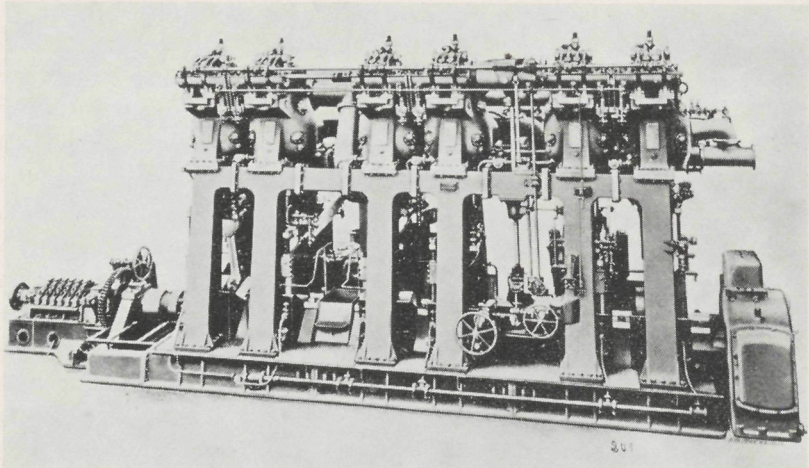
motor van 25 pk., die op de tentoonstelling van München de bewondering uitlokte van talrijke industriëlen.

Terwijl de stoommachine amper 15 % gaf, de benzinemotor iets meer, 18 %, bereikte Diesel met zijn motor een rendement van ruim 30 %, en zulks met een vloeibare brandstof die, wat manipulatie betreft, heel wat voordeliger was dan stofkool.

Inmiddels overigens werd door Diesel aan vreemde constructeurs licencie verleend voor het bouwen van zijn motor. In België was het de firma Carels die in 1902 een industriële motor bouwde van 80 pk. (fig. 10), in Frankrijk de firma Sautter-Harlé. Deze laatste firma bouwde een motor van 25 pk. op 360 toeren per minuut, met twee tegengestelde zuigers (Fig. 11a, b) die met succes zou worden beproefd op de lichter « Petit Pierre » in 1903 in bijzijn van Diesel. Hetzelfde jaar werd door de firma Sautter-Harlé een gebalanceerde motor van 120 pk. op 400 toeren per minuut gebouwd voor een duikboot van de Franse

---

(2) Clichés 7, 8, 9 en 11 van Prof. M. Serruys : « Contribution Française à l'Évolution Technique des Moteur à Combustion Interne », Centenaire de la Société des Ingénieurs Civils de France.



*Fig. 12. 1913 : Scheepsdieselmotor van Carels voor de Britse Admiralty*

marine, duikboot Z, die vermoedelijk de eerste dieselmotor is die op een duikboot werd geïnstalleerd, terwijl de 25 pk. motor van de « Petit Pierre » vermoedelijk de eerste dieselmotor is voor een oppervlakteschip. Hoezeer gestreefd werd naar de ideale cyclus moge blijken uit de poging van Clerget die in 1901 te Bar-le-Duc een dieselmotor deed werken met een mengsel van lucht, petroleum en methylnitraat, wat hem een diagram gaf met vrijwel de cyclus van Beau de Rochas en een rendement hoger dan dat van de Diesel-cyclus van 1897. De maximumdruk echter was 90 at. en deze te hoge druk was oorzaak dat de proeven met deze motor niet werden voortgezet. De firma Carels te Gent ontving opdracht vóór de eerste oorlog een dieselmotor van 1400 pk. te bouwen voor de Admiralty (Fig. 12).

De dieselmotor vond moeilijk ingang in de koopvaardij vóór de eerste wereldoorlog. Het specifiek gewicht van de ontploffingsmotor was gering, maar het gewicht per pk. van de dieselmotor (gehele machineinrichting) was niet veel kleiner dan dat van een stoominstallatie, 200 Kg. per pk. Het olieverbbruik per pk. en per uur echter was niet meer dan 200 g. tegenover 700 g. kolen voor een grote triple-expansiemachine. Dit betekent slechts een derde van het gewicht brandstof t.o.v. een stoominrichting en een enorme besparing aan machinepersoneel. Als men bedenkt dat een grote transatlantier 208 m. lang met een snelheid van 23 knoop uit het begin dezer eeuw twee zuigerstoommachines had samen 40.000 ipk., dat er 12 dubbele en 7 enkele

Schotse ketels waren, die een leger van stokers vergden, dan vraagt men zich af hoe het mogelijk was dat de reders in die jaren zo weinig belangstelling toonden voor de dieselmotor.

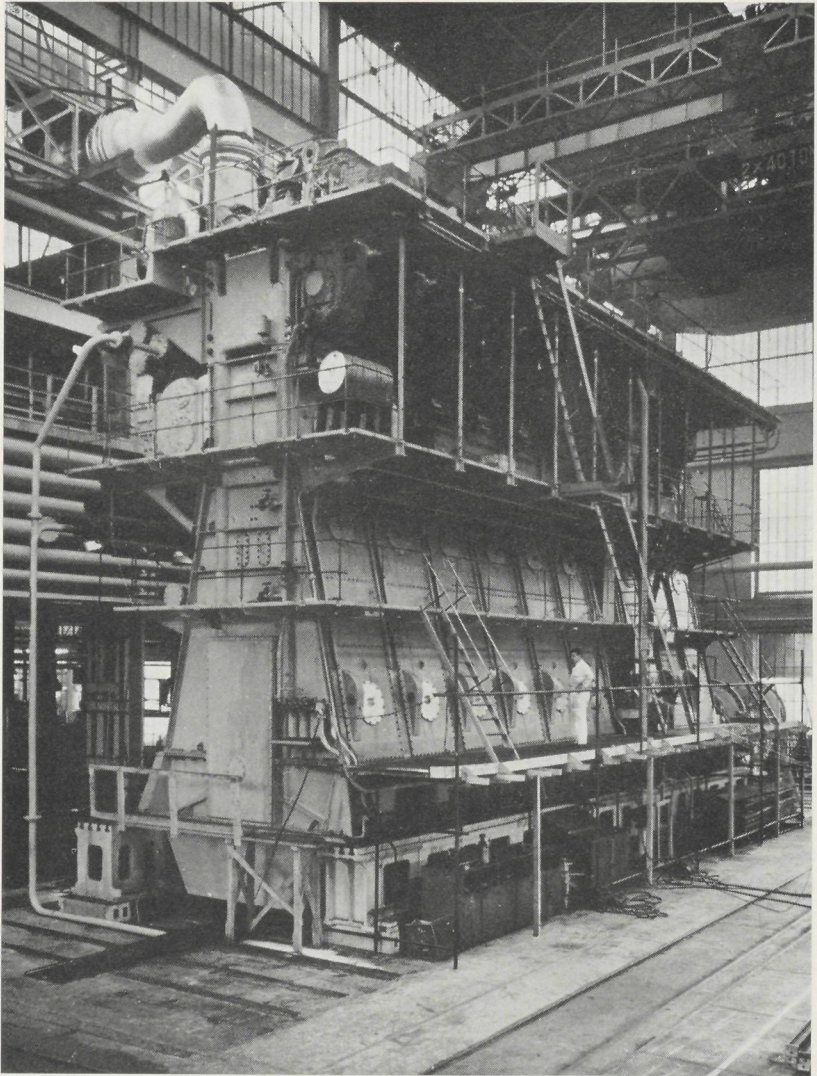
Diesel kende dan ook al die jaren tussen 1892 en de eerste wereldoorlog meer tegenslag dan succes. Hij verdween deerniswekkend op een sombere nacht van 1913 toen hij de Noordzee overstak vanuit België naar Engeland.

Weinig schepen werden vóór de eerste wereldoorlog met een dieselmotor toegerust. Het eerste motorschip in de koopvaardij was de tanker « Vulcanus » van 1200 ton in 1910. Maar uit die heroïsche periode kennen we voornamelijk de « Selandia » in 1912, uitgerust met twee achtcilindermotoren viertakt enkelwerkend, totaal vermogen 2100 pk. en de « Fordonian » die op de Clyde werd uitgerust met een Carelsmotor tweetakt van 1500 pk.

Het is voornamelijk na de eerste wereldoorlog dat de toepassing van de dieselmotor uitbreiding gaat nemen en dan wel in de eerste plaats op drijvend havenmaterieel, als sleepboten, ferries, baggervaartuigen, peilboten, betonningsvaartuigen, drijvende kranen en graanzuigers, waar het verdwijnen van de stoomketel zo bijzonder lozend zal zijn. De grondige transformatie begon reeds omtrent 1925 toen de drukverstuiving de zoveel zorgen wekkende luchtverstuiving op de dieselmotor ging vervangen. Het is de haven van Antwerpen die in dit opzicht toonaangevend zal zijn. A.C. Hardy schrijft in 1939: « One has only to make a cursory visit to ports like Antwerp to see the internal combustion engine vigorously and intelligently applied to tugs, barges, ferries, dredgers and the like ». Het is ook de tijd van de eerste diesel- en dieselectrische havensleepboten, de dieselveerboten op de Schelde, de eerste motormailboot « Prince Baudouin ».

Tijdens de twintiger jaren werd er naar gestreefd meer vermogen uit de viertaktmotor te halen met hem dubbelwerkend te maken en de dubbelschroefschepen « Britannic » in 1930 en « Georgic » in 1932, toegerust met tiencylinder dubbelwerkende motoren met een totaalvermogen van 20.000 pk. sluiten de reeks van deze reuzenviertaktmotoren.

Meer aangewezen voor de voortstuwing is de tweetaktmotor en deze werd dan ook sedert de jongste wereldoorlog courant aangewend voor de voortstuwing van onze nieuwe schepen. Maar ook hier zijn weer twee periodes te onderscheiden, de eerste gaande tot ongeveer 1955, waar de grote vermogens worden bereikt met weer dubbelwerkende motoren te kiezen — deze werden toegepast op de eerste Lu-



*Fig. 13. Dieselmotor van Tanker REINE FABIOLA op Proefstand Cockerill-Ougrée*

boten van de Compagnie Maritime Belge — en een tweede periode die inzet met de « Lufira » waar het opvoeren van het vermogen wordt bereikt door drukvulling en waar dan wijselijk werd teruggegaan naar de enkelwerkende motor.

Zo wordt heden ruim 2000 pk. verkregen met één cilinder en motoren van 20.000 pk. en meer zijn nu bij machte met één schroef de voortstuwing te verzekeren van de grootste vrachtschepen. Amper tien jaar geleden was men verplicht een tanker van 30.000 ton en 16 knoop toe te rusten met een turbine. Nu kan één enkele dieselmotor van 25.000 pk. de schroef aandrijven van een 100.000 ton tanker. Alleen nog voor de transatlanters van meer dan 30 kn is aanwending geboden van de turbine met haar vrijwel onbeperkte vermogens.

De drukvulling heeft ook het verbruik van de dieselmotor doen vallen van 200 op 160 gr. per pk-uur. Waar vroeger dieselolie of zelfs gasolie werden ingenomen wordt nu goedkope zware ketelolie gebunkerd. Op het vlak van het brandstofverbruik is de dieselmotor ongeëvenaard. Denken we aan de warmte die uit de uitlaatgassen wordt bespaard met een electro-groep te drijven dan komen we tot een thermisch rendement dat 40 % ruim overschrijdt. Fig. 13 toont de voortstuwingmotor van 19.000 pk. op de proefstand bij Cockerill-Ougrée en gebouwd voor de 57.000 ton tanker « Reine Fabiola ».

Verder heeft de motor met drukvulling een geringer specifiek gewicht, 70 Kg. per pk. voor de volledige propulsie is niet ongewoon en voor de snellopende motoren zoals op mailboten courant gebruikt wordt het specifiek gewicht neergehaald tot 50 Kg. per pk.

Er bestaat wel een lichtere uitvoering en die is de gasturbine. Het is opvallend dat, hoe lang en hoe volhardend ook aan de verwezenlijking van deze machine is gewerkt, het gebruik er van toch niet op de schepen is doorgedrongen, althans niet in de koopvaardij. Zij wordt meer in de militaire marine gebruikt, waar zij het voordeel biedt van zeer gering specifiek gewicht, slechts 30 Kg. per pk. De gasturbine blijft nochtans duur, en wat erger is, ze houdt het niet lang uit. De eerste belangrijke verwezenlijking is die van Metropolitan Vickers die in 1947 een gasturbine plaatste in een gunboat. Het brandstofverbruik van de gasturbine kan op dit ogenblik worden geschat op 240 g. per pk-uur. Zuiniger evenwel is de vrije zuigerturbine met een verbruik van 200 g. per pk-uur, die in enkele exemplaren in de koopvaardij voorkomt.

Het thermisch rendement van meer dan 40 % van de moderne dieselmotor dient te worden vergeleken met het rendement, 8 à 10 %, van de zuigerstoommachine in de helft van vorige eeuw: het is dus met vijf vermenigvuldigd door het gebruik van de dieselmotor.

Niet slechts werd gestreefd naar zuinige machines, ook dient het vermogen dat door de machine wordt beschikbaar gesteld zo goed

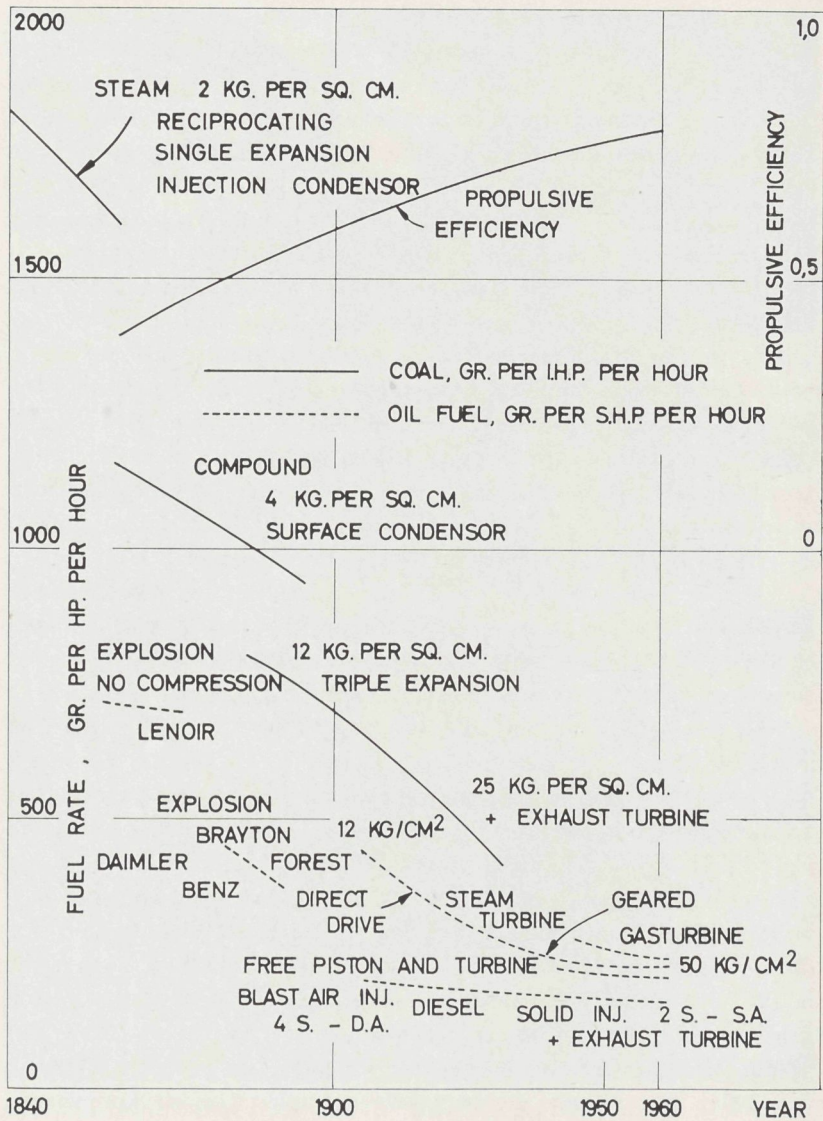


Fig. 14. Brandstofverbruik van Voortstuwmachines

mogelijk voor de voortstuwing worden aangewend. Nuttig werk werd in dat opzicht geleverd door de modeltanks waar modellen van schepen, 3 tot 6 m. lang, worden gesleept en zelfs voortgestuwd door kleine schroefjes, met het oog op het zoeken naar goede scheepsvormen en

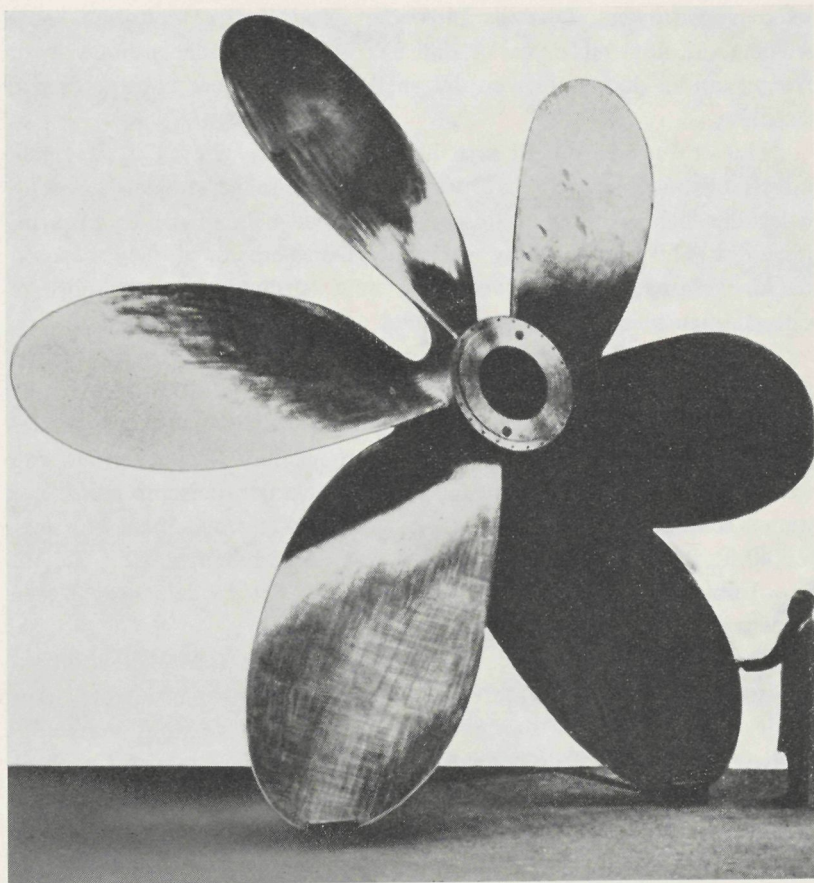
betere voortstuwers. Dit was bijzonder noodzakelijk toen, een eeuw geleden, van hout naar ijzer en dan naar staal in de scheepsbouw werd overgegaan en door opdrijven der snelheid naar betere vormen diende gezocht.

Het is Froude die in zijn hofje te Torquay in 1870 de eerste modeltank bouwde en in 1872 werd het eerste scheepsmodel beproefd. Sedertdien hebben vrijwel alle landen met een belangrijke koopvaardij dergelijke tanks in werking gebracht. De snelheid bij een bepaald machinevermogen wordt verhoogd niet slechts door behoorlijke scheepslijnen maar ook door een goed voortstuwingsrendement, d.i. de verhouding van het sleepvermogen of vermogen uit het produkt vaartweerstand en snelheid tot het vermogen overgebracht door de machine naar de schroef. Dat goede voortstuwingsrendement nu wordt verkregen door een gepast tracé van de schroef en door goede vormen van het achterschip. Een eeuw geleden had een enkelschroefschip met dikke houten schroef — en roerstevan een voortstuwingsrendement van amper 40 %, omtrent de eeuwwisseling was dat rendement 60 % en uit de « Lubumbashi »-proeven is gebleken dat het rendement van een modern goed gelijnd vrachtschip naar 80 % gaat.

Dat betekent dat in het tijdsinterval van een eeuw het voortstuwingsrendement verdubbelde. Waar we reeds vaststelden dat over datzelfde tijdsinterval het thermisch rendement met 5 werd vermenigvuldigd komen we tot de conclusie dat heden uit de brandstof voor de impulsie 10 maal meer wordt gewonnen dan honderd jaar geleden.

Het diagram (Fig. 14) geeft een overzicht van de spectaculaire vermindering die het brandstofverbruik onderging over een eeuw. De volle lijnen hebben betrekking op kolen, de streeplijnen slaan op vloeibare brandstof. De verbetering is minder afgetekend voor het voortstuwingsrendement waar moeilijkheden worden ondervonden bij het verwerken door de schroef van steeds grotere vermogens.

Snelle pakketboten hebben meerdere schroeven, voor vrachtschepen tracht men steeds het volle vermogen op één schroef over te brengen. Zulks gaat niet zonder moeilijkheden, nu, bij het bouwen van steeds grotere en snellere vrachtschepen, dat vermogen tot 20.000 en 25.000 pk. stijgt. De belasting op de bladen wordt dan groot, cavitatiegevaar bestaat en ten einde de belasting per eenheid van oppervlakte binnen perken te houden, gaat men over van 3 en 4 naar 5 bladen en laatst werd op de scheepswerf Boel een bulkcarrier van 66.000 ton te water gelaten met een vermogen van 22.500 pk. dat door een zesbladige schroef wordt verwerkt. Waar we zo gewoon zijn aan de vierbladige



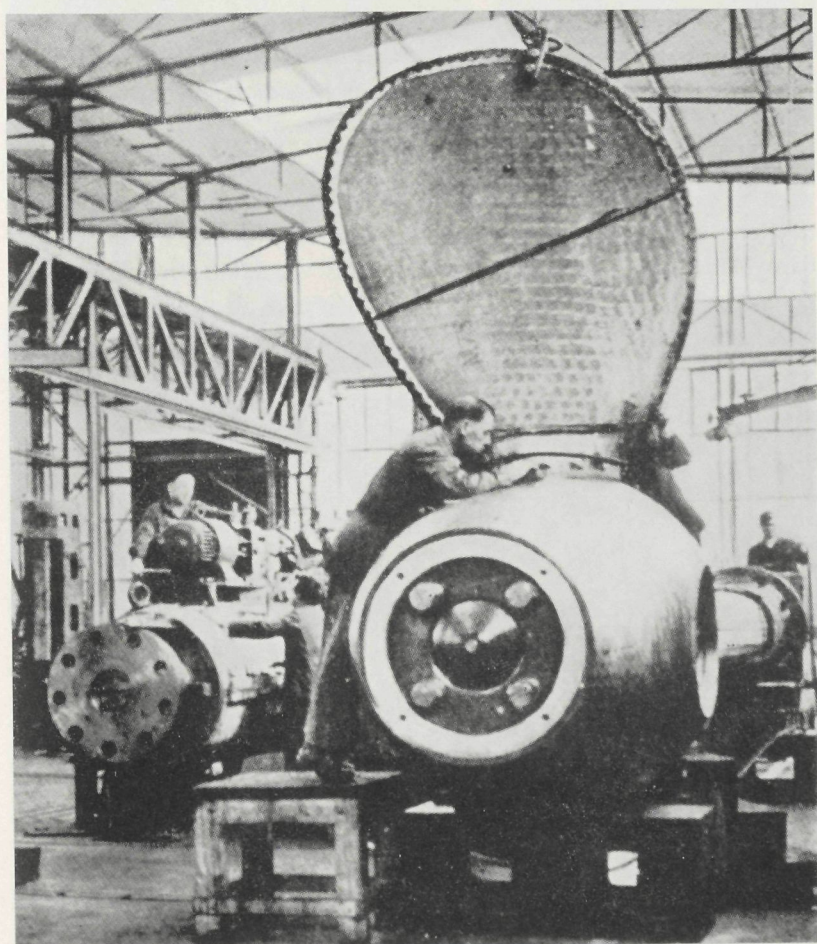
*Fig. 15. Zesbladige Stone-schroef voor 95.000 ton tanker*

schroef doet deze zesbladige schroef wel vreemd aan. Om de bladen dun te houden met het oog op een goed voortstuwingsrendement moet de schroef van bijzonder goed brons worden vervaardigd. Fig. 15 stelt de zesbladige Stone-schroef voor van een 95.000 ton tanker.

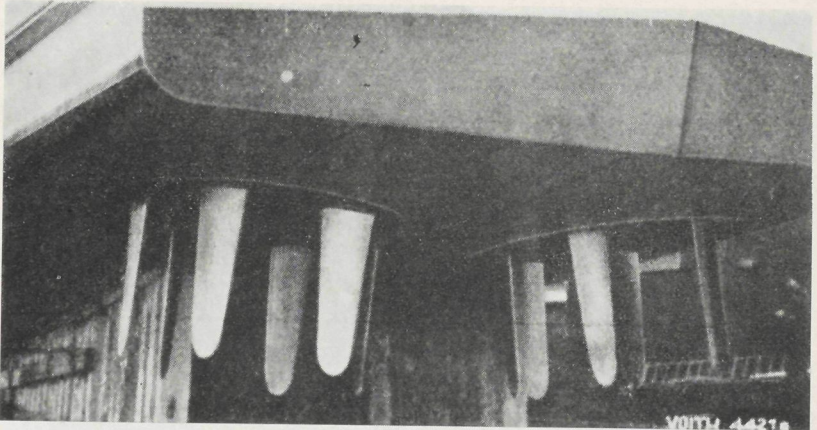
Het opnemen door de schroef van deze grote vermogens heeft de scheepsbouwer bovendien voor problemen van trillingen geplaatst. Toen tankers werden gebouwd van 30.000 ton — en dat is slechts 10 jaar geleden — werden moeilijkheden ondervonden met trillingen in het achterschip. De trillingen verminderden als de vierbladige schroef door een vijfbladige schroef werd vervangen. Maar de vijfbladige schroef gaf een kleiner voortstuwingsrendement dan de vierbladige

schroef en bovendien gaf ze aanleiding tot horizontale impulsen die slijtage bij de doorgang in de schroefaskoker voor gevolg hadden. Het weren van trillingen bij de volgende grote tankers en ertsschepen werd dan ook gezocht, niet in het gebruik van een vijfbladige schroef, maar in betere vormgeving van het schroefraam en grotere vrijslag van de schroef in het achterschip.

De schroef van Smith en Bushnell is zo gebleken, zonder al te grote wijzigingen, de voortstuwing te kunnen verzorgen van de grootste schepen en bij al deze schepen wordt van vooruit op achteruit gema-

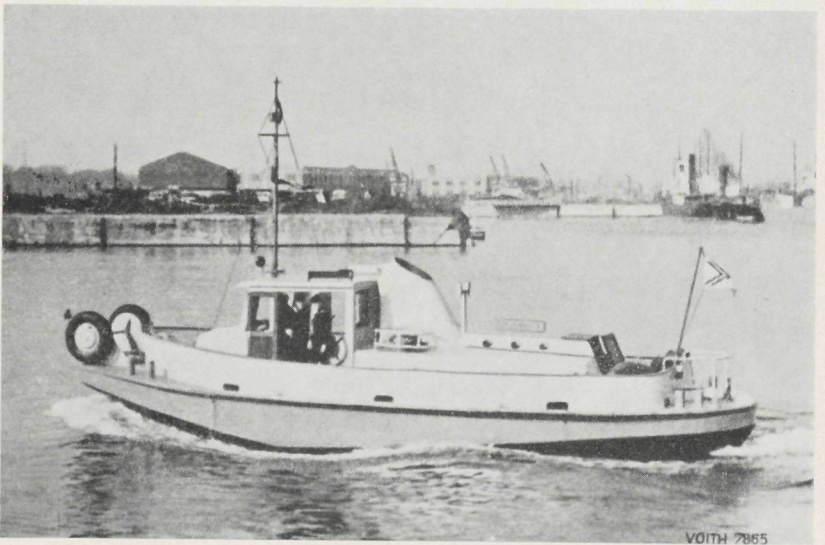


*Fig. 16. Escher-Wijs verstelbare propeller voor zeegaand schip*



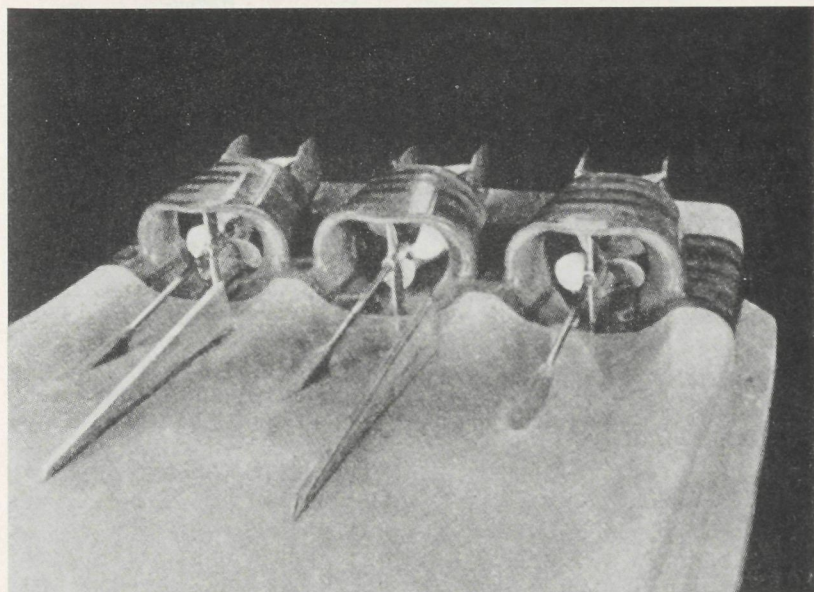
*Fig. 17. Voith-Schneider voortstuwer voor binnenvaarttuig*

neuvreerd door de draairichting van de machine om te keren. Wel werden de laatste jaren kleine vaartuigen als ferries, sleepboten en trawlers, die veel manoeuvreren, van schroeven voorzien met verstelbare bladen. Fig. 16 stelt de Escher Wijs verstelbare propeller voor, bestemd voor een zeegaand schip. De machine is dan niet omkeerbaar, en het is gewoon door de bladen van de schroef te verstellen dat van



*Fig. 18. Voith-Schneider haventrekker*

vooruit op achteruit wordt gemanoeuvreerd. Een concurrent voor deze schroef met verstelbare bladen is de Voith-Schneider propeller (Fig. 17). Deze is afgeleid van het wiel met oscillerende schoepen, maar de as van dit wiel i.p.v. horizontaal, staat nu verticaal en wordt vanaf de machine door conische tandwielen in beweging gebracht. In de volksmond is de Voith-Schneider propeller dan ook de « mixer » geworden. De Voith-Schneider propeller bevindt zich onder het vlak van het schip en wordt, evenals de schroef met verstelbare bladen, door een machine aangedreven die niet omkeerbaar is. Gebrek aan stabiliteit van gewone schroefsleepboten, die af en en toe kapseiden bij het manoeuvreren aan de sluis van grote transatlanters, heeft de laatste jaren een zekere faam gegeven aan de « haventrekker » waar de voorlijke ligging van de V-S propeller er voor zorg draagt dat het sleeptouw altijd de richting behoudt van het langsvlak van symmetrie van deze trekker en omtrekken van de sleepboot onmogelijk maakt (Fig. 18). Parallel met de V-S propeller ontwikkelde zich voor sleepboten de Kortstraalbuis, een ring waarin de schroef draait, en die de trekkracht vergroot (Fig. 19).



*Fig. 19. Wageningen model van 1.000 pk sleepboot met Kortstraalbuis*  
(Cliché Prof. A. Lederer, Les Nouvelles Unités Fluviales au Congo Belge,  
R.U.M. 9° S, T VII N° 1)

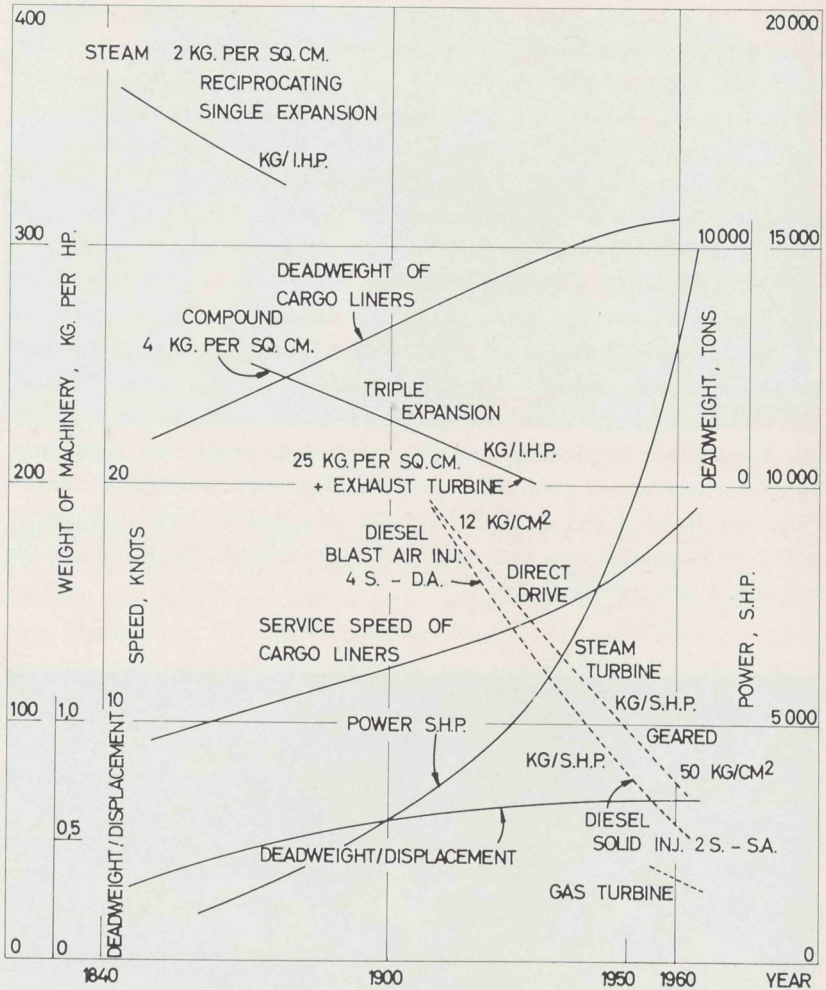


Fig. 20. Eenheidsgewicht van Voortstuwingsinstallaties

Het dient te worden onderstreept hoezeer, in de laatste jaren, werd gestreefd met het oog op een economische exploitatie van schepen, maar een steeds betere uitrusting voor snel laden en lossen en naar steeds lichtere machines ten einde een zo groot mogelijk percentage van het totale gewicht van het schip vrij te houden voor de koopwaar.

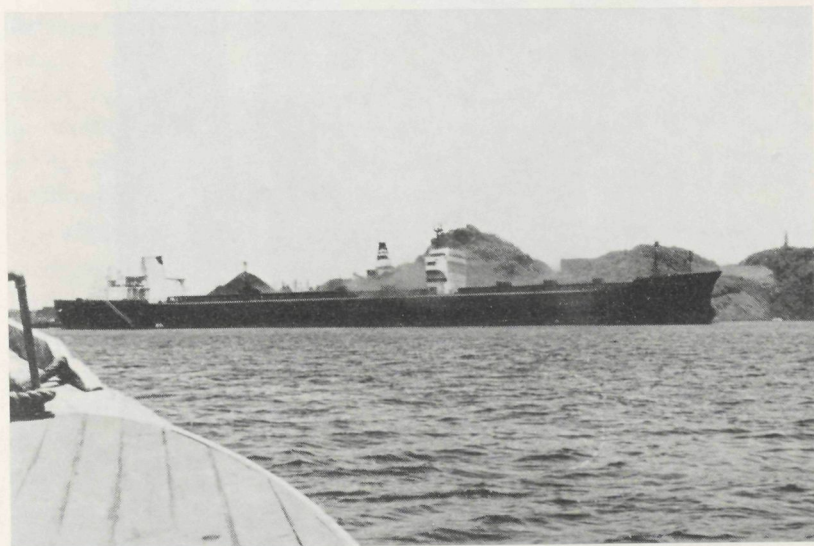
Het diagram (Fig. 20) maakt duidelijk hoezeer in de loop van een eeuw de verhouding draagvermogen tot deplacement is toegenomen

tengevolge van het feit dat het specifieke gewicht, Kg. per pk, van de machine is afgenomen en bovendien deze machine ook veel minder verbruikt, dus minder brandstof dient gebunkerd. De volle lijn slaat op machines die kolen, de streeplijn op machines die vloeibare brandstof verbruiken.

Er is echter een factor die in tegengestelde zin werkt, n.l. de snelheid. Deze is ook sterk opgelopen in de loop van een eeuw en dit is dan de reden waarom het vermogen zo spectaculair de hoogte ingaat.

Het draagvermogen van het vrachtschip een eeuw geleden was ruim 2.000 à 3.000 ton, het gewone schip voor general cargo is nu ook niet groter dan circa 11.000 ton. Daar ligt niet de moeilijkheid. Maar dat vrachtschip van 11.000 ton draagvermogen vraagt voor een dienst-snelheid van 16 knoop een vermogen van 8.000 pk., voor een dienst-snelheid van 19 1/2 knoop een vermogen van 16.000 pk., voor een snelheid van 22 knoop 32.000 pk. Met andere woorden, voor iedere 3 1/2 knoop die aan de snelheid toegevoegd wordt, verdubbelt het vermogen, althans tussen 16 en 22 knoop.

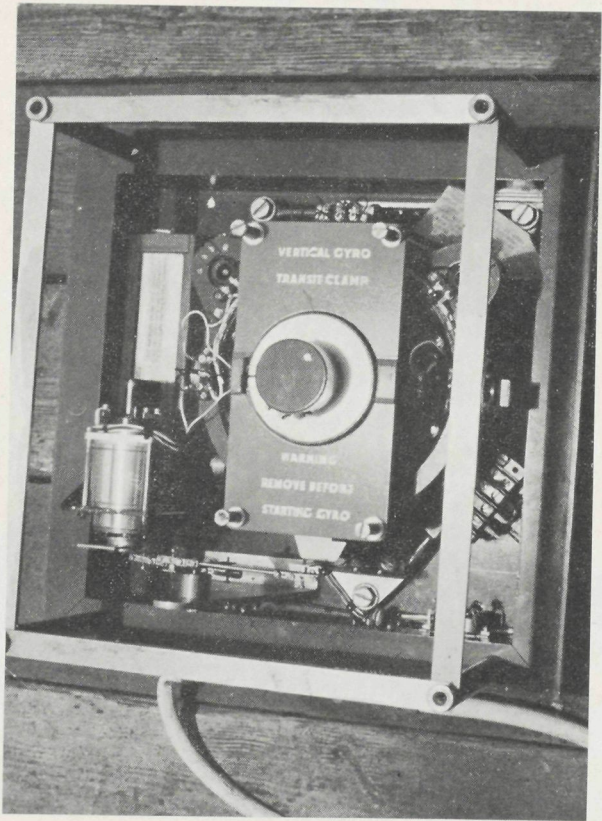
De snelheid is dus zeer duur en inderdaad hebben de meeste vrachtschepen die over de Atlantische Oceaan varen een dienst-snelheid niet hoger dan 16 knoop. Er is nog een omstandigheid die de reders er toe aanspoort niet te veel vermogen in hun schepen te stop-



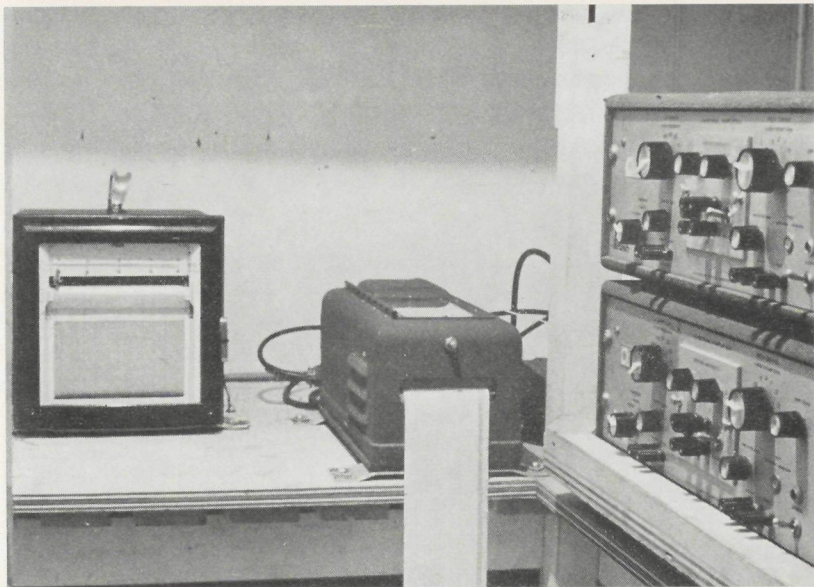
*Fig. 21. Motor-ertsschip MINERAL SERAING*

pen, n.l. het feit dat in een ruwe zee een schip snelheid moet verminderen. Het is gekend dat een geladen 10.000 tons vrachtschip in een vooraankomende zee Beaufort 6 niet meer dan 13 à 14 knoop kan lopen zonder te veel water aan dek te nemen. Juiste inlichtingen des-aangaande echter zijn schaars en organismen voor research, zoals Ceberena in België, hebben zich tot taak gesteld dergelijke inlichtingen — samen met nog andere inlichtingen over dienstprestaties — in te winnen door metingen uit te voeren aan boord van schepen.

Daartoe is heel wat apparatuur nodig want niet slechts moet de staat van de zee goed worden beschreven, ook moeten al de reacties van de zee op het schip, zowel op bewegingen als op koppel en toeren, stuwkracht en snelheid worden waargenomen.



*Fig. 22. Een der twee gyros voor registreren van stampen en rollen*



*Fig. 23. Registreer-apparatuur voor snelheid (links) en voor spanningen en acceleraties (rechts)*

Volgende foto's tonen de instrumenten zoals die aan boord van het ertsschip « Mineral Seraing » (Fig. 21) werden geplaatst. De golfhoogte kan worden gemeten door middel van de shipborne wave recorder van het National Institute of Oceanography. Deze golfhoogte, die wordt bepaald uit de opnamen van accelerometer en drukcellen die in iedere zijde van het schip worden geplaatst, wordt direct opgeschreven door een instrument in een meetkabine opgesteld.

Windsnelheid en windrichting worden aangegeven door een anemometer.

Als reacties op het schip zijn er eerst de bewegingen. Voor stampen en rollen zijn er gyros (Fig. 22) die hun impulsen zenden naar registreerapparaten en statistische tellers. Bovendien zullen accelerometers in het midden van het schip toelaten de verticale beweging of het dompen van het schip te bepalen. Deze accelerometers geven een record op een Brush dynamic recording instrument (Fig. 23). Links van het Brush instrument is een registreerapparaat gemonteerd voor de snelheid van het schip die door middel van een pitot log wordt aangegeven. Een torsiometer laat toe het koppel dat op de schroef

wordt uitgeoefend op te meten en, in combinatie met de toeren, het vermogen van de machine. Koppel en toeren worden opgeschreven met Minicomp-instrumenten.

De stuwdruk die door de schroef wordt medegedeeld aan het schip en de vaartweerstand moet overwinnen wordt opgemeten door middel van een stuwdrukmeter.

Verder zijn nog aan boord accelerometers opgesteld die toelaten de acceleraties in voor- en achterschip op te meten, drukcellen die de stoten aangeven die op het voorschip voorkomen bij het ontmoeten van een golf, en rekstrookjes die, in het hoofddek midscheeps geplaatst, de spanningen aangeven die door de golf worden in het leven geroepen. Al deze impulsen worden door het Brush instrument opgeschreven.

De opmetingen met deze instrumenten aan boord uitgevoerd gaven Ceberena de gelegenheid de invloed van het slechte weer, ook de invloed van de bevuling van het schip op de snelheid te bepalen. Een van de bijzonderste resultaten van dit onderzoek is wel het bepalen van de hoogste snelheid die het schip kan ontwikkelen in een ruwe zee zonder schade te ondergaan vanwege overslaande golven, stoten op het voorschip (slams) of op hol slaan van de machine. Het is dus nodig criteria te leggen, nl. hoeveel slams aanvaardbaar zijn, waarbij dan als slams alleen die stoten worden aangerekend die een spanningspiek in het hoofddek van  $0,6 \text{ Kg/mm}^2$  in het leven roepen, verder hoe dikwijls per honderd stamposcillaties het koppel een vermindering van meer dan 25 % ondergaat, hetgeen dan als criterium voor het op hol slaan van de machine kan worden aanvaard. Het opnemen van zeeën kan moeilijk anders dan door visuele waarneming worden vastgelegd.

Daar nu bepaalde criteria niet simultaan tot dezelfde hoogste snelheid leiden, verder daar de criteria helemaal niet vastliggen, kan meestal voor een bepaald schip slechts een zone van hoogste snelheden, niet precies een hoogste snelheid worden vastgelegd.

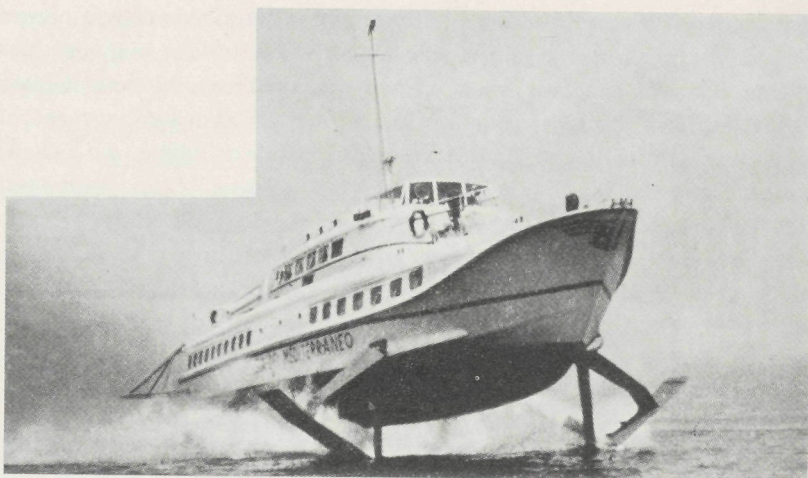
Het is in de loop van de laatste jaren een van de bijzonderste zorgen geweest van Ceberena op dit terrein voor verschillende types van schepen inlichtingen te verzamelen.

De accelerometers voor, achter en in het midden geplaatst, geven informatie betreffende het rollen, het stampen en het dompen, bewegingen met kleine frequentie. Daar zij echter ook de hoog-frekuensi acceleraties geven, laten zij toe te oordelen of de trillingen teweeggebracht door schroef of machines aanvaardbaar zijn. Vroeger werd vaak hiervoor de amplitude gemeten, heden wordt algemeen aangenomen

dat het de acceleratie is die als criterium voor het aanvaardbare niveau van de trillingen moet gelden. En dan is het criterium nog niet hetzelfde voor een machinekamer en bewoonde lokalen. In deze lokalen wordt meestal een acceleratie van  $0,5 \text{ m/sec}^2$  als aanvaardbaar geacht voor verticale trillingen, terwijl voor horizontale trillingen die onaangename zijn  $0,4 \text{ m/sec}^2$  als grens wordt aangegeven. Zulks geldt voor het gewone bereik van de trillingen verwekt door de schroef en de trage machines. Voor de hogere frequenties, trillingen verwekt b.v. door snellopende compressoren, mogen grotere acceleraties worden aanvaard. Ook voor de grote transatlanters zullen scherpere eisen worden gesteld dan voor passagiersschepen die korte overvaarten doen, en voor vrachtschepen zal men ook meer toegevend zijn. Het is opvallend dat dezelfde personen zeer streng trillingen aan boord van een passagiersschip zullen beoordelen en de spoorwegmaatschappij trillingen met een hoger niveau niet euvel zullen duiden. U kan schrijven, zelfs tekenen aan boord van schepen die niet de beste reputatie hebben wat trillingen betreft, U kan nooit in een trein behoorlijk een briefje schrijven.

Het ware drama echter van het moderne schip is wel het steil oplopen van het vermogen in functie van de snelheid. Het is een gekend feit dat de vaartweerstand hoofdzakelijk bestaat uit een wrijvingsweerstand en een golfweerstand. De wrijvingsweerstand die het gevolg is van de wrijving uitgeoefend door het water dat langs de huid van het schip stroomt, loopt op met het kwadraat van de snelheid, terwijl de golfweerstand die voortspruit uit het feit dat het schip aan de waterspiegel golven verwekt, toeneemt ongeveer met de vierde macht van de snelheid. Voor de meeste vrachtschepen, voor snelheden tussen 14 en 16 knoop, bedraagt dan de golfweerstand slechts een derde van de totale weerstand en daarom overtreft de admiraliteitscoëfficiënt dezer schepen 400. Bij snelle schepen als mailboten waar de golfweerstand groter is dan de wrijvingsweerstand, bedraagt bij een snelheid van 24 knoop de admiraliteitscoëfficiënt niet meer dan 200 en dan trots het feit dat deze schepen zeer goed zijn geprofileerd.

De toestand is nog erger voor kleine schepen met zeer grote snelheden als raceboten waaraan, vanaf het ogenblik dat het Froude-getal boven 1 ligt, speciale vormen worden gegeven die afwijken van de gewone vormen van de deplacementsboot. De boot wordt dan bij deze grote snelheden boven het water getild en de golfweerstand die gewoon het gevolg is van het doorklieven van twee media, water en lucht, vermindert.



*Fig. 24. Draagvleugelboot*

Men is op die weg nog verder gegaan en bij de draagvleugelboten (Fig. 24), waarvan reeds meerdere exemplaren in de vaart zijn in wateren die niet te ruw zijn, komt bij normale snelheid de hele boot boven water, gedragen door de vleugels. Voor boten van 50 m. lang en snelheden boven de 40 knoop ligt het Froude-getal hier boven 1. Een draagvleugelboot van 40 ton vergt voor een snelheid van 35 knoop circa 2.000 pk.

De constante zorg het contact met het water te verbreken heeft voor zeer snelle boten het schip geheel uit het water doen tillen en het laten dragen op een luchtkussen. Dat is dan de Hovercraft (Fig. 25) aangewezen voor snelheden van 70 tot 100 knoop, waarvoor bij zeer grote snelheden de verhouding vermogen tot gewicht kleiner blijkt te zijn dan voor de deplacementsboot.

Dit is dan de tendens voor de kleine, zeer snelle schepen. En wat dan voor de vrachtschepen? Voor een 11.000 tonner is reeds 32.000 pk. nodig om het schip een snelheid van 22 knoop te geven en dergelijk schip bestaat. Men kan niet steeds, voor iedere 3 1/2 knoop die bij de snelheid komt, het vermogen blijven verdubbelen. De « Triton » is de nucleaire duikboot die, in navolging van Magellaan, de wereld is rondgevaren, maar dan onder water. Onder water heeft de boot een deplacement van 7.750 ton, drijvend is het deplacement 6.000 ton, het verschil is de ballast 1.750 ton. Met een vermogen van 18.000 pk. loopt deze duikboot onder water 23 knoop. Onze mailboten met hun 3500

ton displacement lopen 24 knoop met een vermogen van 15.000 pk. Beide types van schepen hebben ongeveer dezelfde lengte: de « Triton » met zijn 136 m lengte is ongeveer 20 m langer dan onze mailboot. De voortstuwingskwaliteit voor beide types is dus niet zo zeer verschillend.

De vraag stelt zich dan of niet in de toekomst massagoederen als ertsen en petroleum onder water met nucleaire schepen zullen worden vervoerd. Gaat de snelheid naar de 30 knoop dan zijn vermogens nodig boven 50.000 pk. en een atoompropulsie kan dan wellicht worden verantwoord. Er zijn echter problemen: een onderzee-ertsschip zou, in de nabijheid van de loshaven gekomen, zijn lading moeten overslaan in een gewoon oppervlakteschip. Voor grote snelheden blijft de vaartweerstand belangrijk en naar middelen wordt gezocht om deze te verminderen door afscheiding van de grenslaag, met druklucht b.v. Naast deze moeilijkheden zijn er echter voordelen bij het onder water varen: het water is rustig, reeds op een diepte van minder dan 100 m., de duikboot kan onder het ijs varen, wat voor een ertsschip dat in de winter zijn lading in Canada gaat halen een zeker belang kan hebben. En verder zijn er de voordelen in oorlogsomstandigheden.



Fig. 25. Luchtkussenboot

Er is echter een schaduwzijde aan het tafereel. Het mag worden ontkend dat de atoompropulsie in een stadium van praktische uitvoering zou zijn getreden. Bovendien moet worden gerekend met de moeilijkheden van aanwerving van varend personeel. Deze moeilijkheden zijn van aard de automatie aan boord van schepen, die een vermindering aan bemanning met zich medebrengt, in de hand te werken. Het weinig aantrekkelijk perspectief weken onder water door te brengen zonder land of zelfs lucht te zien zal zeker niet van aard zijn de reeds nu bestaande aanmonsteringsmoeilijkheden op te lossen. Verder is het overladen van de lading van duikboot in oppervlakteschip, eenmaal in het zicht van de loshaven gekomen, een schadepost. Trots al de voordelen die het vervoer onder water zou medebrengen zal deze wijze van verkeer wel niet voor morgen zijn.