

Panta rhei : een voordracht over de veranderingen in de constructie van overbrengingen

Citation for published version (APA):

Schlösser, W. M. J. (1963). *Panta rhei : een voordracht over de veranderingen in de constructie van overbrengingen*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1963

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

PANTA RHEI

EEN VOORDRACHT OVER DE VERANDERINGEN
IN DE CONSTRUCTIE VAN OVERBRENGINGEN

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN

HET AMBT VAN HOGLERAAR IN DE

AFDELING DER WERKTUIGBOUWKUNDE

AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL

TE EINDHOVEN

OP VRIJDAG 15 NOVEMBER 1963

DOOR

Dr. Ir. W.M.J. SCHLÖSSER

*Mijne Heren Curatoren,
Mijnheer de Secretaris van deze Technische Hogeschool,
Mijne Heren Hoogleraren,
Dames en Heren leden van de wetenschappelijke,
de technische en de administratieve staf,
Dames en Heren Studenten,
en voorts,
Gij allen die door Uw tegenwoordigheid blijk geeft van Uw belangstelling,*

Zeer geachte toehoorders,

Het water van een bergbeek boeit onze aandacht door de onstuimigheid van zijn voortgang en door de onweerstaanbaarheid waarmee het altijd wegen vindt, vele wegen, naar zijn onbekende doel. Beneden in het dal zullen de stromen en stroompjes hun zelfstandigheid verliezen, wanneer zij in een meer tot rust zijn gekomen. Daarna vloeit het water verder als een statige rivier.

Het historisch verloop van de verschillende wijzen waarop in werktuigen de energie wordt omgezet en overgedragen, vertoont grote gelijkenis met het zojuist geschetste natuurfenomeen.

Volgens sterk uiteenlopende methoden wordt in werktuigen energie getransformeerd en getransporteerd; nieuwe mogelijkheden ontstaan, komen tot ruime toepassing en worden soms met andere mogelijkheden gecombineerd. Aangekomen in een vergaarbekken van inzicht accentueren de verschillende methoden datgene wat zij gemeenschappelijk hebben.

En in één bedding geleid worden zij verder gedragen, de toekomst in.

In deze rede zou ik de inhoud van de *Leer der Aandrijvingen* willen toetsen aan het zojuist in beeldspraak weergegeven verloop van de ontwikkeling. Ik zou enkele stromen langs de helling van de tijd met U samen willen vervolgen. Daarbij lettend op het overeenkomstige

en op de verschillen en acht slaand op de markante punten aan de oever, om de oriëntatie te behouden. Tenslotte hoop ik U het uitzicht te tonen op het gebied waarin alle stromen zich hebben vereend. Mocht U daarbij nog ervaren dat er nevels blijven hangen, dan zal ik mij schuldig voelen, doch enigszins verontschuldigd door de spanne tijds.

De Leer der Aandrijvingen is het resultaat van de bestudering van de energiestroom in werktuigen. Deze energie ontspringt in de energiebron, bijvoorbeeld een verbrandingsmotor; stroomt vervolgens door de overbrenging, bij een automobiel meestal versnellingsbak genaamd; om tenslotte bij de last te belanden, in het gekozen voorbeeld de wielen met de daaraan verbonden massa van de gehele auto. De aandrijving wordt dus gevormd door de energiebron en de overbrenging.

Het doel van de Leer der Aandrijvingen is nu voldoende inzicht te geven voor een goede keuze van de juiste aandrijving en voor het optimaal construeren van de overbrenging.

Overbrengingen met tandwielen, riemen, kettingen, wrijvingswielen, drijfstangen en hefboomen brengen de energiestroom over met behulp van vaste stoffen. Dergelijke overbrengingen duidt men aan met de verzamelnaam van *mechanische overbrengingen*. Omstreeks het begin van onze jaartelling waren deze vormen van de mechanische overbrengingen reeds alle bekend (1). De werktuigen uit die tijd hadden wat wij thans noemen een geringe krachtdichtheid.

Een bezwaar waren de ruime spelingen in de verbindingen van de onderdelen. Daardoor traden hevige stoten op wanneer de draairichting werd omgekeerd of wanneer de last gedurende korte tijd vooruit ijldde op de aandrijving. Maar juist dan bleek hout uitstekend geschikt te zijn voor de bouw van primitieve werktuigen. Het is elastisch en ondervangt de hoge spanningen van een stotende belasting. Bovendien was hout meestal overvloedig beschikbaar en de bewerking ervan kon met eenvoudig metalen gereedschap geschieden. Gedurende tientallen eeuwen wordt hout dan ook voor de bouw van werktuigen gebruikt.

Ten tijde van de Griekse en Romeinse beschaving is de mens of het dier de meest gebruikte, maar zwakke energiebron. Een opstand van de slaven kan de energievoorziening ernstig in gevaar brengen. Ondanks in dit opzicht belangrijke gebeurtenissen, zoals de slavenoorlog onder leiding van SPARTACUS, streefde men er nauwelijks naar andere

natuurkrachten te mobiliseren om de zware lasten van mens of dier af te wentelen. Die natuurkrachten behoorden volgens veler opvattingen tot het gebied van het bovennatuurlijke.

Geheel anders is de situatie in de 11e eeuw, wanneer de slavernij in Europa wordt afgeschaft. Op grote schaal gaat men dan wind- en waterenergie benutten. De eerste vloedgolf van arbeidsvermogen komt opzetten. Als WILLEM DE VEROVERAAR de economische waarden van het door hem veroverde eiland laat inventariseren, tellen de auteurs van het *Domesday Book* in het jaar 1086 niet minder dan 5624 watermolens in Groot-Brittannië. Een eeuw vroeger waren er minder dan 100. In de 11e eeuw moet daarom de gemiddelde aanbouwsnelheid één nieuwe watermolen per week zijn geweest, alleen al in het rijk van de laatste vorsten van het Huis Wessex.

Maar de constructeur van al deze nieuwe krachtbronnen beschikte nog over weinig meer inzichten dan zijn voorganger in de Oudheid. Hij had geen besef van de grootte der verliezen in de overbrenging. Zo wordt broeder JOHN THE CARPENTHER in 1295 verrast door het feit, dat zijn nieuwe paardemolen bij Dunstable vier paarden voor de aandrijving nodig heeft. Volgens zijn voorspelling zou één paard hiervoor voldoende zijn geweest (2).

In zijn werk *De re metallica* beschrijft de mijnbouwer GEORG BAUER, meer bekend als GEORGIUS AGRICOLA (1494-1555), vele uit hout geconstrueerde werktuigen. Een vergroting van de energiestroom blijkt dan te worden gerealiseerd door een vergroting van de afmetingen, niet door vergroting van de krachtdichtheid of door verhoging van de rotatiesnelheden.

De werktuigen worden groter en groter, naarmate de energiestroom in de werktuigen toeneemt. De sterkte van het hout als constructiemateriaal is uitputtend benut.

De Hollandse windmolens zijn meesterwerken uit deze constructieve school. Toch bereikt de nuttige energiestroom van de meest voorkomende polderwindmolen gemiddeld slechts een waarde van 15 kilowatt, een vermogen dat nu door de kleine Volkswagenmotor met gemak wordt geleverd (3).

SIMON STEVIN, de naamgever van onze *Werktuigkundige Studievereniging*, heeft zich o.a. toegelegd op het verbeteren van windmolens. Zijn werk als wiskundige wordt algemeen erkend. Ook zijn verhandelingen over de mechanica gelden als wetenschappelijk belangrijk. Zijn

gedachten over gecontroleerde inundatie legden de grondslag voor een verdedigingsstelsel tegen vijandelijke invallen. Minder bekend is zijn studie die gericht is op de verbetering van overbrengingen in windmolens. In dit werk zoekt hij naar de samenhang tussen de windkrachten op de molenwieken en de waterkrachten op de opvoerschoepen. De gedachten van Stevin († 1620) omvatten reeds een belangrijke deel van de probleemstelling in de Leer der Aandrijvingen. De overbrenging wordt door hem reeds centraal gesteld, als schakel tussen energiebron en last. Hij streefde naar verbetering van de overbrenging door een andere vormgeving van de onderdelen, hoewel hij daarbij geen afstand deed van hout als constructiemateriaal. En zo was het ook nog een eeuw later. JACOB LEUPOLD geeft in 1726 een overzicht van de toepasbaarheid van de verschillende houtsoorten in de werktuigbouw. De constructeur uit het begin van de 18e eeuw bepaalde de keuze van het materiaal aan de hand van een eeuw oude ervaring. Zo beveelt Leupold voor de fabricage van spullen en tandwielen een speciale soort eikenhout aan. Hier bespeurt men een merkwaardige overeenkomst met de wijze waarop thans een constructeur zijn keuze doet uit een groot aantal metalen.

De metalen beslagen aan de uiteinden van houten staven, daar waar de verdeling van de belasting meestal zeer ongunstig is, acht Leupold een belangrijke uitvinding. Zijn waarschuwing aan de constructeur om de werktuigen niet onder hun eigen gewicht te laten bezwijken, is veelzeggend over de situatie waarin het hout als constructiemateriaal geraakt is.

Op het einde van de 17e eeuw meent LODEWIJK XIV iets bijzonders te moeten maken van de fonteinen in de tuinen van het paleis te Versailles. Hij wilde méér water hoger laten spuiten dan in welke andere tuin ook. In technische bewoordingen: hij wenste een pompwerktuig te bouwen met een zeer grote energiestroom. De keuze viel op een plan van ARNOLD DE VILLE en van 1681 tot 1688 werd dit plan uitgevoerd. Vergroting van de energiestroom door het vergroten van de krachtdichtheid was uitgesloten, omdat hout als constructiemateriaal werd gebruikt. Vergroting van het pompwerktuig was eveneens onmogelijk, omdat het dan wellicht zou bezwijken onder het eigen gewicht. Als enig overblijvende mogelijkheid koos de constructeur een uitvoeringsvorm waarbij 221 pompen, aangedreven door 14 waterraderen, parallel werkten om het water op te voeren naar een vergaarbekken. Als de voltooide installatie in bedrijf wordt gesteld, bewegen 2108 houten staven heen en weer; zij bezitten een gezamen-

lijke lengte van 20 kilometer. Het nuttig vermogen bedraagt aanvankelijk 88 kilowatt, maar slinkt door slijtage tot 45 kilowatt; het totale rendement van de gehele installatie daalt daarbij van 10 procent tot 5 procent. Deze waterwerken hebben veel kritiek uitgelokt.

CLEMENT noemt ze in zijn *Histoire de Colbert et de son administration* een „triste et dernière caprice d'une volonté trop absolue". In zijn *Course complet d'économie* schrijft SAY in 1829: „un document de l'ignorance de cette époque". Thans staat Gij mij wellicht toe deze constructie te zien als het resultaat van een laatste krachtsinspanning van een constructieve school, die ten onder gaat in een nieuwe vloedgolf van energie. Hiermee zijn wij dan gekomen aan het begin van de 18e eeuw.

De opkomst van ijzer als constructiemateriaal opent de weg naar de vergroting van de krachtdichtheid. Deze weg werd eerst aarzelend gevolgd. De atmosferische stoommachine van THOMAS NEWCOMEN in 1712 heeft nog een gemengde bouwwijze in hout en ijzer, heeft nog een geringe krachtdichtheid en is groot van afmetingen. De dubbelwerkende stoommachine van JAMES WATT in 1782 heeft onderdelen van ijzer, heeft een grotere krachtdichtheid en is kleiner van afmetingen. Werden de houten werktuigen met toenemende energiestroom steeds groter, hier stellen wij een opmerkelijke omkering in de ontwikkeling vast. Per eenheid van arbeidsvermogen neemt het door het werktuig ingenomen volume voortaan af, steeds meer vermogen stroomt door relatief steeds minder materiaal. Het wordt mogelijk lichte energiebronnen van voldoende groot vermogen te construeren om schepen en voertuigen aan te drijven. Prompt rijdt TREVITHICK dan ook in 1804 met zijn stoomdiligence en vaart FULTON in 1807 per stoomschip op de Hudson.

De overbrengingen worden in deze zelfde tijd aanzienlijk verbeterd. EULER schrijft in 1760 zijn mathematische verhandeling over de vormgeving van tandwielen. In 1772 ontwerpt CHARLES VARLO het kogelager, een uitvinding die het rendement van overbrengingen aanzienlijk zal verbeteren door verlaging van de wrijving tussen onderling bewegende delen. BRUNEL verbetert in 1800 de riemschijf door toepassing van het convexe loopvlak. Hierdoor voorkomt men dat de riem ongewenst van de riemschijf loopt. Een belangrijke verbetering van de kettingoverbrenging komt in 1864 ter beschikking door het rollenkettingpatent van SLATER, welke vinding in 1880 nog door RENOLD wordt aangevuld. De as met vierkante doorsnede, een fossiel uit de tijd van houten werktuigen, wordt vervangen door de as

met ronde doorsnede. Op het einde van de 19e eeuw moeten DE LAVAL en PARSONS de tandwieloverbrenging verbeteren om het toepassingsgebied van de door hen ontwikkelde stoomturbines te vergroten.

De energiebronnen zoals de stoomturbines, de zuigerstoommachines en de zuigerverbrandingsmotoren bieden een steeds grotere energiestroom aan en de overbrenging moet daaraan zijn aangepast.

Wordt de krachtdichtheid van de energiestroom in een overbrenging verhoogd, dan gaat de onderlinge aanraking der machineonderdelen het knelpunt van de constructie vormen. In een ongunstige situatie treedt bij de overdracht van energie tussen twee machineonderdelen zelfs een warmteontwikkeling op, die lasverschijnselen tussen de materialen tot gevolg kan hebben.

Een ernstige beschadiging van de overbrenging is meestal het directe gevolg. De constructieve maatregelen om deze moeilijkheden te omzeilen zijn dan ook legio: zelfinstelbaarheid in de buurt van het gevaarlijke contactpunt, nauwkeurige fabricage van de voorgeschreven afmetingen en vorm van de onderdelen, beheersen van de elastische vormveranderingen, toepassen van conforme onderdelen, de juiste combinatie van materialen in het contactpunt of zelfs de snelle verwisselbaarheid van de beschadigde onderdelen door nieuwe.

Ongemerkt is tijdens mijn beschouwing de historische tijdschaal steeds sneller gaan verstrijken en zijn wij reeds midden in de problematiek van het moderne constructieve denken beland.

Een sprongsgewijze verhoging van de krachtdichtheid bij een bepaald type van mechanische overbrenging komt meestal tot stand door een fundamentele verandering in de materiaalkeuze. Wij zagen reeds de gevolgen van de overgang van hout naar ijzer als constructiemateriaal. Nog zeer recent onderging de riemoverbrenging een grote verhoging in haar krachtdichtheid. De samenvoeging van dunne staaldraden met kunststoffen tot een riem van geringe dikte opende de weg naar mogelijkheden, welke voor riemen uit leer onbereikbaar waren.

Hoe past nu de ontwikkeling van de smeertechniek in dit betoog? Bij houten werktuigen ontbrak de smering aanvankelijk geheel. De slijtage werd door een timmerman gerepareerd, als de spelingen al te ruim werden. De warmtestromen uit de verliezen waren trouwens gering, omdat de totale energiestroom door het werktuig maar klein was; smering was daarom nog niet noodzakelijk.

Wanneer men in latere eeuwen in houten werktuigen plantaardige olie en dierlijk vet gebruikt, dan is dat niet zozeer om het rendement te verhogen dan wel om de slijtage tegen te gaan.

Bij de overbrenging met metalen onderdelen werd daarentegen de smering een zaak van het allergrootste belang. Sedert het midden van de vorige eeuw beschikt men daartoe over smeermiddelen van minerale oorsprong. Met behulp van dit smeermiddel brengt de constructeur in en om het contactpunt van machineonderdelen een vloeistoffilm aan. In deze vloeistoffilm heerst over een veld van enige uitgestrektheid een hoge druk. Aan dit drukveld kunnen krachten worden ontleend om onderling contact van de machineonderdelen te voorkomen. Door spreiding van de contactkracht voorkomt de vloeistoffilm een extreem hoge waarde van de krachtdichtheid tussen deze onderdelen, welke hoge waarde bij ontbreken van de vloeistoffilm tot plaatselijke plastische vervorming en tot lasverschijnselen zou leiden. De mechanische overbrenging wordt daardoor op een zeer succesvolle wijze door een hydraulische overbrenging ondersteund en beschermd bij het streven naar hogere krachtdichtheden van de constructie.

Aldus bezien wordt de wijze waarop de druk in de vloeistoffilm tot stand komt, minder belangrijk. Bij glijlagers gebruikt men voor het opwekken van deze druk de viscositeit van een vloeistof; REYNOLDS schrijft hierover zijn theorie in 1886. In 1905 ontwerpt MICHELL zijn axiaal lager, waarbij hij op klassieke wijze deze grondslag benut. Een andere mogelijkheid biedt de dichtheid van de vloeistof en de daaruit voortkomende traagheidsverschijnselen. Tussen onderdelen met een ritmisch wisselende belasting kan men, op ogenblikken van lage belasting, een vloeistoffilm opbouwen. Bij toenemen van de belasting wordt deze vloeistoffilm gedeeltelijk dan weer weggeperst, echter niet zonder dat hoge drukken in de film ontstaan. De smering berust dan op het buffereffect van de vloeistof. Het krukdrifstangmechanisme kan, dank zij deze wijze van smering, met hoge krachtdichtheden worden belast. De geringe samendrukbaarheid van een vloeistof maakt tenslotte de opbouw van het drukveld door middel van een verdringerpomp op eenvoudige wijze mogelijk.

Bij tandwieloverbrengingen kan men een micro-hydraulische overbrenging vaststellen tussen de flanken van twee samenwerkende tanden. Dit is ook het geval tussen de wrijvingswielen van een wrijvingsoverbrenging. Droge wrijving heeft bij deze overbrenging een

zeer korte levensduur tot gevolg. Overvloedige smering verlaagt echter de wrijvingscoëfficiënt drastisch en bijgevolg ook de krachtdichtheid. Ondanks alle inspanningen van vele constructeurs is deze overbrenging daarom tot nu toe alleen maar geschikt voor kleine energiestromen. Zelfs een verhoging van de toelaatbare wrijvingscoëfficiënt in de orde van 10^3 zal nauwelijks in staat zijn om de achterstand van de wrijvingsoverbrenging op te heffen. Het opwekken van snelheidsgradiënten en hoge wrijvingscoëfficiënten in niet-newtonse vloeistoffen van bijzondere moleculaire constructie opent hier een boeiend terrein voor de onderzoeker. Het zwaartepunt van het onderzoek verschuift dan echter merkbaar van de mechanische overbrenging in de richting van de micro-hydraulische overbrenging.

Op dit punt gekomen zou ik de stroom van de mechanische overbrengingen willen verlaten. De rol die de vloeistoffen gaan spelen, krijgt enig perspectief. Laten wij daarom zoeken naar de oorsprong en het wezen van overbrengingen, waarbij gassen en vloeistoffen als drager van energie worden benut.

Reeds in 50 v. Chr. beschrijft HERO VAN ALEXANDRIE de *pneumatische overbrenging*. Het duurt echter tot de eerste helft van de 19e eeuw voordat deze overbrenging tot toepassing komt voor het transporteren van energiestromen van enige betekenis. Bij deze overbrenging stroomt de energie letterlijk door leidingen van de energiebron naar de last. Moet de energiestroom om een hoek worden geleid, dan kan dit op eenvoudige wijze door een bocht in de leiding te buigen. Deze elegante oplossing had vele voordelen ten opzichte van constructies met trekstangen en tuimelaars of met kettingen en snaren om leidwiel. Bovendien opende zich de aantrekkelijke mogelijkheid om bij werktuigen die niet voortdurend in bedrijf waren, de energie in een drukvat te accumuleren. Daarnaast bleek het ook zeer eenvoudig de energiestroom vanaf de bron te splitsen en naar vele lasten te leiden. Door de grote elasticiteit van de leidingen der pneumatische overbrenging ondergaat deze laatste geen storende invloed meer van de vervormingen van dat deel van het werktuig, dat tussen de energiebron en de last ligt. Tot nu toe ongekende mogelijkheden komen door deze voordelen binnen het bereik van de constructeur.

Begrijpelijk is, dat de inherent grote veiligheid van de pneumatische overbrenging met betrekking tot gasontploffingen, de introductie in het ondergrondse mijnbedrijf bevordert. Zo wordt in 1845 bij Chalonnès in Frankrijk een kolenmijn van een pneumatisch leidingnet voorzien.

In 1862 worden zelfs kolenwinningswerktuigen met pneumatische overbrengingen in bedrijf genomen.

De meest economische werkdruk voor pneumatische overbrengingen ligt bij 6 tot 8 kgf. cm⁻². Deze krachtdichtheid is gering en het rendement van de overbrenging is laag. Om deze redenen kan de pneumatische overbrenging zich op den duur niet handhaven voor het transporteren van energiestromen van enige betekenis.

Beter is het pneumatisch systeem geschikt voor regelkringen van laag energieniveau of voor automatisering met geringe investering. Met betrekking tot deze onderwerpen mag bij modern technisch onderwijs de pneumatische energie niet onbesproken blijven.

Interessant is te vermelden, dat Parijs een netwerk voor de distributie van pneumatische energie exploiteert en uitbreidt. De toepassing van z.g. „lowcost automation” wordt daardoor zeer aantrekkelijk. De meeste aansluitingen dienen nu nog voor het opvoeren van het bier naar de tapkasten van de bistro's. Ik meen hierin eveneens een voorbeeld van goedkope automatisering te mogen zien.

Waarschijnlijk lag de grootste aantrekkelijkheid van de pneumatische overbrenging in de mogelijkheid tot het transporteren van energie over grote afstanden en in de eenvoud van het verdeelsysteem. In dit opzicht was de elektrische energiestroom echter een formidabele tegenstander. Op het einde van de 19e eeuw komt de elektrische energiedistributie tot grote ontwikkeling. In 1877 houdt SIEMENS een voordracht over de mogelijkheden van het transporteren van gelijkstroom en van wisselstroom. Omstreeks 1882 dringt de elektrische energievoorziening zelfs in kolenmijnen door.

Door de grote vlucht welke de elektrische energievoorziening heeft genomen, gaat men de elektromotor meer zien als een energiebron dan als het motorische deel van een overbrenging.

Nadat de pneumatische overbrenging dit gevecht verloren had, vormden het lage rendement en de geringe krachtdichtheid de belemmeringen om een „come back” op grote schaal mogelijk te maken. De mechanische overbrenging met grote krachtdichtheid kreeg haar plaats tussen de, nu tot energiebron geworden, elektromotor en de last. Deze plaats blijft de pneumatische overbrenging tot op heden nog ontzegd, als het gaat om het overbrengen van vermogens van enige betekenis.

Bij de tot nu toe besproken overbrengingen werden vaste stoffen en gassen als dragers van de energiestroom benut. Bij de *hydraulische overbrengingen* wordt hiertoe een vloeistof gebruikt. Degenen onder U die weten waarheen mijn belangstelling dikwijls uitgaat, menen wellicht dat het voor mij moeilijk zal zijn om bij de beschouwing van dit onderwerp objectief te blijven. Toch waag ik het dit onderwerp aan de orde te stellen.

Ergens schrijft DE SAINT-EXUPERY: „Waarom zou ik het opnemen vóór dat wat is, tegen datgene wat komt; vóór dat wat groeit, tegen datgene wat blijft?” Laat deze uitspraak mij een schild zijn.

Gelijktijdig met de pneumatische overbrenging komt in het midden van de 19e eeuw ook de hydraulische tot toepassing. De geringe samen-drukbaarheid van de vloeistoffen geeft aan deze laatste overbrenging een veel hoger rendement, terwijl de krachtdichtheid een veelvoud is van de krachtdichtheid bij de pneumatische overbrenging. Voor het transporteren en het verdelen van energie was het hydraulisch systeem zeer geschikt. Omstreeks 1875 gaat men daarom over tot de aanleg van hydraulische leidingnetten in steden zoals Hull en Londen. De voordelen van de letterlijk stromende energie waren onmiskenbaar. Maar tegen de stormloop van de elektrische energie blijkt aan het einde van de 19e eeuw geen andere vorm van energie bestand. Evenals de pneumatische verdwijnen ook de hydraulische energiecentrales spoedig weer van het toneel.

Tussen de inmiddels tot energiebron gepromoveerde elektromotor en de last was niet uitsluitend plaats voor mechanische overbrengingen. De hydraulische overbrenging, die in micro-uitvoering uitstekende diensten aan de mechanische verleende, kwam in de jaren tussen 1930 en 1940 opnieuw ten tonele. In de daarvóór liggende jaren had FÖTTINGER de dichtheid van de vloeistof benut om een overbrenging te construeren, waarin veranderingen in de kinetische energie de voor-naamste rol speelden. In de jaren dertig vervolmaakt THOMA de overbrenging, waarbij veranderingen in de vloeistofdruk overheersen. Hij hanteert de drukvelden in vloeistoffilms dermate goed doordacht, dat de onderdelen van de overbrenging niet meer door mechanische krachten in de juiste onderlinge stand hoeven te worden gehouden. Het punt is bereikt waarop de machineonderdelen door hydraulische drukvelden in de ruimte worden gefixeerd. De krachtdichtheid van de hydraulische overbrenging neemt dan in sterke mate toe. Als de lekstromen door de spleten tussen onderdelen, bij het toenemen van de

vloeistofdruk ontoelaatbaar aangroeien, is het wéér een drukveld dat de doortocht van de lekspleet kan doen afnemen. De tegenkoppeling van de vloeistofdruk helpt nu bij de handhaving van de hoge rendementen van de overbrenging.

Dit laatste idee werd in 1902 reeds door COLBOURNE gepatenteerd. THOMA paste het toe bij plunjerpompen en ROTH & LAUCK bij tandwielpompen. Op deze wijze werd de naoorlogse doorbraak van de hydraulische overbrenging voorbereid.

Hoe de toepassing van energiestromen met grote kracht dichtheid de vormgeving van werktuigen beïnvloedt, is in het bestek van deze voordracht moeilijk te omschrijven. Een korte toelichting acht ik echter gewenst. Degene die met enige constructieve fantasie begaafd is, geraakt opgewonden als hij de proeven van PARRY bestudeert (4). Deze onderzoeker ontleedde de hydraulische overbrenging in het voortbewegingsmechanisme van wormen en springspinnen. Parry toont aan, dat bij deze levende wezens door spieren druk in een vloeistof wordt opgewekt en dat deze vloeistof de energie naar de voortbewegingsorganen geleidt. Bij insecten werden daarbij drukken van 8 kgf. cm^{-2} gemeten. Door de alzijdige voortplanting van de druk in een vloeistof kunnen door de Natuur bij de ledematen van insecten zeer ingewikkelde vormen worden toegepast. Hierdoor kan het insect in zijn vorm optimaal worden aangepast aan de eisen die de voortbeweging in „moeilijk begaanbaar” terrein stelt. Deze aandrijving biedt mogelijkheden voor de constructie van voertuigen waarvoor geen wegen noodzakelijk zijn. Ook de constructeur van meer alledaagse werktuigen weet echter de grotere vrijheid bij de vormgeving naar juiste waarde te schatten.

Hoezeer de constructeur deze vrijheid waardeert, blijkt uit de waarde van de jaarlijkse produktie van hydraulische componenten in West-Duitsland.

Voor 1963 zal zij vermoedelijk f 450.000.000,- bedragen. De waarde van de produktie van mechanische overbrengingen bedraagt in dezelfde tijd naar schatting f 2.100.000.000,-. De totale West-Europese produktie van hydraulische overbrengingen zal over 1963 een waarde van ongeveer f 1.000.000.000,- hebben.

In 1959 had een betoog over het wezen van de hydraulische overbrenging tevens de vorm van een pleidooi voor het bestaansrecht van deze overbrenging (5).

Destijds werd nog gebouwd aan een gebouw, waarover de meningen nogal verdeeld waren. Nu twijfelt, behoudens misschien enkele historisch al te belaste personen, niemand meer aan het bestaansrecht van dit gebouw. De fundamenten zijn gelegd, de eerste verdiepingen zijn bewoond en het staat wel vast dat de aanbouw van nog vele nieuwe verdiepingen zal volgen.

Mag ik U nu, aan het slot van deze voordracht, uitnodigen voor een korte rondgang in het reeds bewoonde gedeelte?

De omzetting van mechanische energie in hydraulische heeft plaats in mechanische pompen. De werkdruk van deze werktuigen ligt thans tussen 100 en 200 kgf. cm^{-2} . De huidige ontwikkeling is echter gericht op werkdrukken tussen 200 en 400 kgf. cm^{-2} . Om dergelijke werkdrukken mogelijk te maken, zullen de nu nog dikwijls toegepaste wentellagers moeten worden vervangen door hydraulische drukvelden.

Toepassing van de gasturbine als energiebron zal de behoefte doen ontstaan aan mechanische pompen, die geschikt zijn voor zeer hoge toerentallen. Tot nu toe heeft de wormpomp nog de beste kansen om aan de dan te stellen eisen te voldoen.

Het steeds grotere aanbod van elektrische energie doet voor hydraulische overbrengingen de directe omzetting van elektrische energie in hydraulische actueel worden. De hierbij te gebruiken elektrische pompen zullen misschien vloeibare metalen zoals rubidium, natrium, kwik, lithium of kalium verpompen. Enkele van deze vloeibare metalen zijn reeds met goed resultaat toegepast om hydraulische drukvelden in glijlagers te doen ontstaan.

De versterking van zwakke elektrische regelsignalen in hydraulische energiestromen van groot vermogen zal dan eveneens fundamenteel anders dan thans geschieden.

De ontwikkeling van de verbrandingsmotor ontkomt niet aan een beïnvloeding door de hydraulische overbrenging. De roterende verbrandingsmotor, waarvan de Wankelmotor een voorbeeld is, biedt de mogelijkheid tot een zinvolle combinatie met een mechanische pomp. In de slotfase van deze ontwikkeling zal een roterende verbrandingsmotor ter beschikking zijn, zonder roterende as voor de afgifte van mechanische energie, doch met twee vloeistofkanalen voor het aanzuigen en afvoeren van vloeistof van een hydraulische energiestroom. Dit project is reeds de papieren fase gepasseerd.

Tegenover het voordeel van de in hydraulische overbrengingen op eenvoudige wijze tot stand te brengen verhoging van de krachtdichtheid, staat de toenemende geluidshinder als nadeel. Daarom heeft de bestudering van drukveranderingen in de vloeistof grote belangstelling. Het elimineren van deze drukveranderingen levert dan een geluidsarme hydraulische overbrenging van het gelijkstroomtype.

Ook de hydraulische wisselstroomoverbrenging is met succes tot toepassing gekomen. Met behulp van deze overbrenging kunnen metalen stangenstelsels worden vervangen, welke oscilleren tot frequenties van b.v. 30 Hertz. Belangrijk is hierbij, dat voor de versnelling van een vloeistofzuil een veel geringere krachtdichtheid nodig is dan voor dezelfde versnelling van een stalen staaf van gelijke afmetingen. De stijfheid van de vloeistofzuil kan daarbij, door een eenvoudige constructieve kunstgreep, gelijk zijn aan de stijfheid van de stalen staaf.

Verhoging van de frequentie van de opgedrukte pulsatie maakt het tenslotte mogelijk om hydraulische energie met behulp van drukgolven door een stilstaande vloeistofzuil te transporteren. De voor de besturing benodigde informatie zou dan, met een andere frequentie, langs dezelfde vloeistofzuil kunnen worden geleid. Hier hebben wij dan echter een verdieping in het symbolische gebouw bereikt, welke nog volop in aanbouw is.

Geachte toehoorders, ik hoop dat ik er in geslaagd ben U de gevolgen van het streven naar grotere krachtdichtheid in de constructie van overbrengingen te tonen. Onmiskenbaar is de belangrijke rol die hierbij vloeistoffen vervullen in micro- en macro-hydraulische overbrengingen. Misschien heb ik juist deze overbrengingen in mijn beschouwing, volgens Uw kritische mening, al te centraal gesteld. Is het echter bij de beschouwing van een patroon niet dikwijls zo, dat door een kleine verandering van het standpunt van de waarnemer de onderlinge ligging der markante punten verschuift en dat daardoor een eenvoudige ritmische samenhang tevoorschijn komt? Juist het ontdekken van deze samenhang voert tot inzicht. Als dit inzicht groeit, zullen vele ervaringen integreerbaar worden, vele mislukkingen begrijpelijk en het essentiële zal verrassend zijn door zijn eenvoud (6).

De verschillende stromen van de vormen der overbrengingen gaan punten van overeenkomst vertonen. De analogie van de op de voorgrond tredende begrippen wordt treffend (7). Soms weet men niet

meer precies in welke stroombedding een bepaalde ontwikkeling zich afspeelt. Soms biedt een combinatie van verschillende soorten van overbrengingen de optimale oplossing voor een aandrijfprobleem. Zijn dit de voortekenen van het feit dat wij een vergaarbekken naderen, waaruit de stroom van de Leer der Aandrijvingen als een statige rivier zal voortkomen? Hoe het ook zij, bij het doen gelden van elk inzicht zal het ogenblik komen, dat men weer het gevoel heeft een schepnet met te wijde mazen te hanteren. Dit is dan het altijd terugkerende moment waarop óf een intuïtief aanvoelen van de juiste constructieve oplossing redding moet brengen óf het deemoedig inzicht over zijn onkunde aanzet tot nieuw onderzoek.

Aan *Hare Majesteit de Koningin* moge ik thans mijn eerbiedige dank betuigen voor mijn benoeming tot hoogleraar aan de Technische Hogeschool.

Mijne Heren Curatoren,

Ik ben U zeer erkentelijk voor het vertrouwen, dat U in mij gesteld hebt door mij voor deze benoeming te willen voordragen en ik verzeker U, dat ik mijn beste krachten zal geven aan de vervulling van de mij toevertrouwde taak.

Mijne Heren Hoogleraren,

In Uw kring ben ik na een jaar geen nieuweling meer. Van velen van U mocht ik reeds oprechte blijken van vriendschap ondervinden. Het is voor mij een groot voorrecht om met U allen samen te mogen werken aan onze gemeenschappelijke taak.

Mijne Heren leden van de Afdeling der Werktuigbouwkunde,

In het afgelopen academische jaar werd de levensblijheid van mijn gezin en van mijzelf in sterke mate verhoogd door de warme, hartelijke vriendschap waarmee ik in Uw kring werd opgenomen. Hiervoor zeg ik U dank. Door Uw aller steun en medewerking meen ik de mij opgedragen taak te kunnen vervullen.

Waarde Schmid,

Nadat ik door mijn leermeester DRESDEN was onderwezen in de constructie van mechanische pompen, ontving ik van U de eerste aansporing om mij verder te verdiepen in de hydraulische overbrengingen. Gezien het tijdstip, wij schreven toen naar ik meen 1950, getuigde dit advies van grote visie. Ik wil U thans niet alleen bedanken voor deze goede raadgeving, doch ook voor de grote voldoening, welke ik mocht putten uit het avontuur van mijn ontdekkingsreizen door een vakgebied in wording.

Waarde Boon,

Op Uw persoonlijke uitnodiging ben ik in 1956 uit de industrie teruggekeerd naar de Technische Hogeschool, om te werken aan de grondslagen van de hydraulische overbrenging. Aan Uw bescherming is het te danken, dat alle offers niet tevergeefs zijn gebracht. Vandaag zou ik U de resultaten van mijn werk, van de tussen 1956 en 1963 gelegen jaren, willen aanbieden als een eerbetoon van een leerling aan zijn meester.

Geachte medewerkers,

Sommigen van U zijn mij gevolgd van Delft naar Eindhoven. Deze blijk van trouw en toewijding heeft het delegeren van een deel van mijn taak aan U aanzienlijk vergemakkelijkt. Zonder deze toewijding, zou ook de continuïteit van het in 1956 begonnen werk ernstig in gevaar zijn gebracht. Ik sta waarschijnlijk niet alleen, als ik gevoelens van dankbaarheid jegens U tot uitdrukking breng.

Bij mijn nieuwe medewerkers heb ik reeds mogen constateren dat zij spoedig begrepen, dat een goed advies door mij méér op prijs werd gesteld dan een afwachtende houding; een uitgewerkt voorstel tot actie méér dan een opsomming van excuses om actieloos te blijven. Ik wens U veel voldoening van Uw, in zelfstandigheid verricht, werk.

Dames en Heren studenten,

Verwacht U van mij nu geen betoog meer over de technisch-educatieve waarde van de bestudering van de aandrijvingen van werktuigen of over het boeiende van het construeren. Of constructeurs alleen maar

geboren worden of dat het construeren ook kan worden geleerd, weet ik niet. Wel weet ik dat constructeurs, die een belangrijke rol spelen, naast hun grote technische kennis minstens beschikken over: fantasie, belangstelling en bezieling. Bij technische studenten neemt de technische kennis meestal toe. Soms gaan daarentegen de fantasie, de belangstelling en de bezieling verloren. De aanleg tot constructeur komt daardoor niet tot ontwikkeling of, erger nog, de student verlaat voortijdig de Technische Hogeschool. Het is daarom een welgemeende raad als ik U zeg de genoemde drie eigenschappen, mocht U ze bezitten, zorgvuldig te bewaken. Misschien genieten wij dan samen nog dikwijls van inzicht in wijdse technische perspectieven.

Hoe belangrijk de bezieling, de inspiratie daarbij is zou ik willen benadrukken met een variant op een Chinees gezegde, door LIN YUTANG opgeschreven in zijn *The Importance of Living* :

„Inspiration holds up the bottom of the world,
while genius paints its roof”.

Dames en Heren, ik dank U voor Uw aandacht.

Literatuurlijst

- (1) WESTCOTT, and
H. P. SPRATT, *Synopsis of historical events in mechanical and electrical engineering including energy conversion, transmission and storage, atomic energy, pumping, blowing, and compressing machinery, explosives and ordnance.* Published for the Science Museum by Her Majesty's Stationery Office, 1960.
- (2) FORBES, R. J. and
E. J. DIJKSTERHUIS, *A history of science and technology*, Pelican Book A 498 and A 499, 1963.
- (3) WESTENDORP, F., *Inleiding tot de Werktuigbouwkunde*, Servire, Den Haag, 1949.
- (4) PARRY, D. A., *Spider Hydraulics*, Endeavour, July 1960 No. 75, p. 156.
- (5) SCHLÖSSER, W. M. J., *Hydraulische Werktuigen in de Techniek*, Openbare Les, 23 oktober 1959, T.H. Delft, Uitgeverij Waltman, Delft.
- (6) WHYTE, L. L., *The next development in man*, Mentor Book MD 327, The New American Library of World Literature Inc., New York, 1961.
- (7) SCHLÖSSER, W. M. J. en
W. F. T. C. OLDERAAN, *Een analogontheorie van de aandrijvingen van de roterende beweging*, Schip en Werf, 28 (1961), No. 13, blz. 389-395.
De Ingenieur, 73 (1961), No. 26, blz. W 99-105
Hydraulic Power Transmission, 1962, No. 8
Oelhydrauliek und Pneumatik, 1961, No. 12
Antriebstechnik, 1963, No. 1.