

Enkele bewegingen en krachten in de mechanica

Citation for published version (APA):

Esmeijer, W. L. (1959). *Enkele bewegingen en krachten in de mechanica*. Planeta.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1959

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.

**Enkele bewegingen en krachten
in de mechanica**

ir. W. L. Esmeijer

Enkele bewegingen en krachten in de mechanica

Rede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt
van gewoon hoogleraar in de technische mechanica
aan de technische hogeschool te Eindhoven
op dinsdag 14 april 1959
door

ir. W. L. Esmeijer

*Mijne heren curatoren,
Mijne heren leden van de senaat en adviseurs,
Dames en heren leden van de wetenschappelijke, technische
en administratieve staf,
Dames en heren studenten,
en voorts gij allen die deze bijeenkomst met uw tegenwoordigheid vereert,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

De talrijke onderwerpen waarmede Simon Stevin zijn geest heeft bezig gehouden variëren van „Wisconstighe Ghedachtenissen” tot „Nieuwe Maniere van Sterctebou” en „Spiegeling der Singconst”. Temidden hiervan nemen de exacte vakken een grote plaats in. Indien het hem gegeven zou zijn om in deze tijd, ruim 300 jaren na zijn dood, een kijkje te nemen in de wereld van de wetenschap, dan zou hij ongetwijfeld het land van de mechanica met zijn bezoek vereren. Als pionier heeft hij immers gebieden hiervan verkend en bewerkt en wel op zodanige wijze dat *hij* er met zekere voldoening op kan terug zien en ieder van ons met de grootste bewondering en eerbied.

Bij een bezoek zoals ik suggereerde, zal het hem opvallen dat er tegenwoordig in mechanicaland een groot aantal borden is geplaatst, die er min of meer uitzien als wegwijzers. Hij zal opschriften lezen zoals: klassieke mechanica, relativiteitsmechanica, analytische, fysische, theoretische, toegepaste mechanica en nog vele anderen. Wellicht valt zijn blik ook op „technische mechanica”, een naam die eerst kort geleden officiële sanctie heeft gekregen bij het hoger onderwijs in Nederland.

Ongetwijfeld zal Stevin, gezien zijn „Uytspraak van de Weerdicheyt der Duytsche Tael”, in ronde nederlandse woorden van leer trekken tegen het in zijn ogen onverkwikkelijke gebruik van de vele vreemde woorden, maar deze filippica laat ons toch betrekkelijk onberoerd.

Wanneer hij zich op de hoogte stelt van de betekenis der borden dan ontdekt hij al spoedig dat er typische verschillen zijn. Sommige wijzen naar landstreken waar de grondwetten van elkaar verschillen, bijvoorbeeld klassieke en relativiteitsmechanica; andere geven het gereedschap aan waarmede

bij voorkeur wordt gewerkt en weer andere wijzen naar de onderwerpen die in het brandpunt van de belangstelling staan. Indien wij de uitzonderlijke figuur voor ogen houden die Stevin was, uitblinkende zowel in theoretische bespiegelingen als in het oplossen van concrete praktische problemen, dan ligt het voor de hand om te vermoeden dat hij ons zal vragen waartoe deze detaillering nodig is.

Nadenkende over een antwoord dat wij hem wellicht moeten geven, komen wij tot de conclusie dat de veelheid van namen samenhangt met een noodzakelijk kwaad, namelijk dat van specialisatie. De vooruitgang van de wetenschap heeft een zodanige vaart dat ieder die iets meer wil dan het gadeslaan van de ontwikkeling, gedwongen is zich te beperken tot een klein aantal objecten waarmee hij zich intensief moet bezig houden; specialisatie is dan onvermijdelijk.

Ook de grote Stevin zou in deze tijd niet aan dit lot zijn ontkomen, ofschoon hij terecht wordt beschouwd als een van de meest universele en productieve corypheeën die op het gebied van wetenschap en techniek zijn werkzaam geweest. Het is ondenkbaar dat hij, zelfs met zijn uitzonderlijke gaven, in deze eeuw zowel grondlegend werk zou kunnen doen in de vakken mechanica en numerieke wiskunde, als baanbrekend werk in de praktische sector van de civiele en militaire bouwkunde en daartussen door nog een aantal kleinere werkzaamheden zou kunnen verrichten zoals hij dat vroeger ook heeft gedaan, bijvoorbeeld het construeren van een voertuig dat destijds evenveel opzien baarde als nu de nieuwe D.A.F.-automobiel.

Stevin zal op zijn tocht bemerken dat zijn nagedachtenis door verschillende groeperingen in hoge ere wordt gehouden onder anderen door het feit dat een wis- en natuurkundig tijdschrift, een laboratorium in Delft, een sluizencomplex in de afsluitdijk, bovendien een werktuigbouwkundige studievereniging in Eindhoven zijn naam dragen.

Interessant zullen zijn ervaringen zijn wanneer hij de beoefening van de natuurwetenschappen in de 16e eeuw gaat vergelijken met die in de 20e eeuw. Thans trachten de onderzoekers, na waarneming en experiment, een abstract systeem te ontwikkelen waarmee de verschijnselen quantitatief kunnen worden beschreven; gevolgtrekkingen die uit het systeem kunnen worden afgeleid gaat men verifiëren door wederom experimenten uit te voeren; eventuele discrepanties geven aanleiding tot een verbeterde interpretatie van de proef of een herziening van de theorie.

Deze natuurwetenschappelijke methode die eerst recht in de 17e en 18e eeuw tot ontwikkeling is gekomen en nu vanzelfsprekend lijkt, werd in de 16e eeuw door een enkeling gehanteerd. Stevin behoort tot die voortrekkers

en hij zou, in tegenstelling tot vele andere onderzoekers van zijn generatie, thans nauwelijks iets aan zijn denkgewoonten behoeven te veranderen. Het grote verschil in zijn wijze van werken en die in onze tijd is veeleer een gevolg van de enorme groei van de wetenschappen. Prestaties die vroeger door één man konden worden verricht, bijvoorbeeld gelijktijdig exploreren van nieuwe gebieden en realiseren van nieuwe constructies, kunnen nu slechts door een groep van mensen worden geleverd. De noodzakelijkheid om een zekere koppeling te krijgen tussen extreme standpunten in zo'n groep heeft het aanzien gegeven aan een aantal afzonderlijke vakgebieden. Voor één ervan, de „technische mechanica”, vraag ik thans enige ogenblikken Uw aandacht.

Het zal sommigen van U zijn opgevallen dat de uit Delft bekende namen „theoretische mechanica” en „toegepaste mechanica” geen plaats hebben gevonden in het programma van onze hogeschool. Alvorens dit nader toe te lichten wil ik vaststellen dat dit niet een gevolg is van het feit dat de namen een misleidende aanduiding geven van het bestreken gebied; sinds Shakespeare weten wij allen dat hetgeen wij een roos plegen te noemen met elke andere naam even zoet zou geuren.

Wat de genoemde vakken, althans in Delftse trant, scheidt is het al dan niet aanvaarden van de idealisatie van het onvervormbare lichaam; wat hen bindt zijn de analoge wetenschappelijke methoden om te komen tot oplossingen van mechanica problemen die liggen in het vlak van de ingenieurswetenschappen. Velen, onder anderen de bij uitstek deskundigen van Irtson en Biezeno, hebben reeds lang betoogd dat het bindende element essentieel is en het scheidende element volkomen irrelevant. Deze overwegingen hebben de opstellers van het programma van onze hogeschool er toe gebracht met een oude Nederlandse traditie te breken en de beide gebieden samen te voegen tot een „technische mechanica” zoals dit ook op een aantal plaatsen in het buitenland het geval is.

Het geven van een definitie van „technische mechanica” is een moeilijke zaak. Een goede definitie eist namelijk, hetzij het formeren van een woordenreeks die onder alle omstandigheden in de plaats kan worden gezet van het te definiëren begrip, hetzij het aangeven van een aantal voorwaarden waaraan het te definiëren begrip en geen ander voldoet.

In de zin van een directe definitie kan ik zeggen: de technische mechanica is de leer van bewegingen en krachten voor zover deze van belang is voor de techniek. U ziet wel in dat hiermede nog niet veel klaarheid is gekomen. Ik kan ook trachten een implicite definitie te geven op de volgende wijze:

de technische mechanica is gegrondvest deels op axioma's der klassieke mechanica, deels op een niet afgesloten serie experimenten die betrekking hebben op de vervorming van vaste lichamen; toepassing van wiskundige en fysieke hulpmiddelen kan leiden, hetzij tot het ontwikkelen van algemene gezichtspunten waaruit praktisch bruikbare methoden voortvloeien, hetzij tot een aanvaardbare oplossing van een concreet probleem uit de techniek. Ook deze definitie is niet volkomen bevredigend. Ik zou hem daarom willen verduidelijken door een beeld. De werktuigkundige die van de technische mechanica zijn vak maakt behoort tot het corps van reizende ambassadeurs in het land van mathematen en fysici, met dien verstande echter dat hij zich veel bevindt in de kring van zijn broeders, de andere werktuigkundigen, om daar actief mee te helpen bij het werk. Het beeld geef ik graag voor beter; het behoort tot de vele waarvan Greshoff ongeveer zegt: niet waar en niet onwaar, niets anders dan een vluchtige gedachte, een pluisje van de paardebloem op de wind.

Er zijn voor ons dus twee belangrijke aspecten: de behoeften van de werktuigbouwkunde en de mogelijkheden van de wis- en natuurkunde. Het is welbekend dat de beoefenaren van de moderne werktuigbouwkunde steeds dringender de noodzaak voelen economisch te construeren en te fabriceren. Dit heeft onder andere belangrijke consequenties voor de technische mechanica, immers de constructeurs en bedrijfsleiders moeten de resultaten van deze tak van wetenschap meer intensief gaan gebruiken. Sommige eenvoudige sterkteberekeningen bijvoorbeeld, die vroeger slechts konden worden gehandhaafd dank zij het invoeren van aanzienlijke coëfficiënten, eufemistisch veiligheidsfactoren genaamd, worden geleidelijk vervangen door een nauwkeuriger analyse, die de constructie goedkoper, de veiligheidsfactoren kleiner, de veiligheid daarentegen groter maakt.

Spanningsconcentraties, plastische deformaties, mechanische trillingen en vermoeiing, zie hier een klein aantal van de mechanica onderwerpen uit ons gebied die elke constructeur tegenwoordig in zijn beschouwingen moet betrekken.

Men mene niet dat deze gezichtspunten als een soort „new look” in de mode zijn gekomen. De aangeduide ontwikkeling is reeds vele jaren aan de gang, gestimuleerd en geleid door hen die door de huidige ingenieurs als hun leermeesters worden beschouwd. Men mene ook niet dat wij gekomen zijn aan het einde van de ontwikkeling. Wanneer wij bijvoorbeeld kijken naar de zuivere, de toegepaste en vooral de numerieke wiskunde, de meettechniek met zijn electronische hulpmiddelen, de materiaalkunde, dan zien wij in al deze gebieden grote activiteit met verbluffende resultaten.

Het is zonder twijfel dat de werktuigbouwkunde hiervan rijkelijk zal kunnen profiteren.

Er is een aantal sectoren waarin de werktuigkundigen alle krachten moeten inspannen om de geboden mogelijkheden te benutten; er zijn ook onderwerpen waarbij de theoretische behandeling, mathematisch zowel als fysisch, sterk achter is bij de behoefte. Het is mijn bedoeling om uit beide categoriën enige actuele punten onder Uw aandacht te brengen.

In de wiskunde zal men steeds met bijzondere zorg zoeken naar een taal die het beste past bij het probleem dat men onder handen heeft. Uit ervaring weet men dat niet alleen de efficiëntie door een goede keus wordt bevorderd maar dat slagen of falen er soms mede samenhangen. Voor de mechanica gelden soortgelijke overwegingen; passende mathematische methoden met bijbehorende notatie kunnen een grote rol spelen.

Nu is er sinds een aantal jaren enige discussie gaande over de waarde van de tensorrekening als hulpmiddel voor de mechanica. Deze tak van wiskunde is in zekere zin te beschouwen als een uitbreiding van de vectorrekening. Een tensor kan, evenals dit bij een vector het geval is, in een coördinatenstelsel worden voorgesteld door een aantal functies, componenten van de tensor genaamd. Een definitie van het begrip tensor komt tot stand wanneer men volgens bepaalde transformatieregels de samenhang vastlegt tussen genoemde componenten en componenten in een ander coördinatenstelsel. Men heeft voor deze grootheden een algebra ontwikkeld en met behulp van symbolen die in 1869 door Christoffel in de wiskunde zijn ingevoerd, een differentiaalrekening die aan het einde van de vorige eeuw zelfs de naam kreeg van „absolute differentiaalrekening”.

Zowel de spanningstoestand als de vervormingstoestand in een punt van een lichaam zijn te beschrijven met behulp van tensoren. Hoewel dit inzicht reeds lang bestaat, de naam van het vak is hier zelfs op terug te voeren, heeft de ontwikkeling van deze tak van wiskunde nauwelijks invloeden ondervonden van de mechanica van vervormbare lichamen. Wanneer men op dit gebied de tensoranalyse gaat toepassen dan blijkt, mits men enigszins geoefend is, dat vele relaties gemakkelijk en in compacte vorm kunnen worden afgeleid, in het bijzonder bij algemene kromlijnige coördinaten. Belangrijker is het dat karakteristieke elementen in de theorie, bijvoorbeeld invarianten, op meer natuurlijke wijze te voorschijn komen dan met de klassieke methode en tegen een bredere achtergrond. Te verwonderen is dit niet: de methode is namelijk pasklaar voor grootheden die in de mechanica fundamenteel zijn.

De rekenwijze komt de laatste jaren steeds meer in zwang; bij nieuwe

theoretische ontwikkelingen, bijvoorbeeld in het gebied van eindige verplaatsingen, plasticiteit en schalentheorie wordt hij met zeer gunstige ervaringen toegepast.

Het kernpunt van de discussie die ik hiervoor aanduidde handelt over de vraag of het lonend is om tijd te besteden aan het leren van de genoemde analyse. Ik ben geneigd om deze vraag bevestigend te beantwoorden, in ieder geval wanneer hij wordt gesteld met betrekking tot de opleiding van beoefenaren van de mechanica komende uit de nu studerende generatie, die van het begin af op de hogeschool wordt opgevoed met lineaire algebra en matrices. Voor hen zal het zeker winst betekenen wanneer zij dit gereedschap leren gebruiken.

Men wachte zich er evenwel voor, de methode te zien als een soort tovermiddel tegen alle kwalen; een in wezen gecompliceerde algemene theorie zoals die van eindige deformaties, kan niet voetstoots in zodanige vorm worden gebracht dat zij op gemakkelijke wijze allerlei concrete oplossingen geeft van praktische vraagstukken.

De beschouwing over dit onderwerp wil ik besluiten met op te merken dat discussies inzake het invoeren van een nieuwe rekenmethode soms worden vertroebeld door een feit dat Simon Stevin zo duidelijk heeft gesignaleerd in zijn werk „Vorstelicke Bouckhouding”. In een samenspraak met Prins Maurits geeft Stevin een aantal argumenten waaruit blijkt dat de boekhouding volgens koopmans gebruik veruit te prefereren is boven die volgens rentmeesters gebruik. Op een vraag van Maurits waarom de rentmeesters dan niet overgaan op de andere methode antwoordt Stevin dat het oordelen voor velen zeer moeilijk is om „dattet selden gebeurt ymand in beide manieren dadelick ervaren te wesen, overmits elck gemeenlick blyft by 't gene daer hij hem in syn joncheyt eerst toe begeeft”.

De beoefenaar van de technische mechanica zal zich vaak bezig houden met het ontwikkelen van methoden waarmede de constructeur kan komen tot numerieke resultaten.

Nu is er door de electronica een revolutionaire ontwikkeling gekomen op het gebied van de numerieke wiskunde met verdragende consequenties voor vele takken van wetenschap. Moderne rekeninstituten zijn verzezen met een staf van specialisten en een uitrusting die het mogelijk maakt om problemen aan te vatten die tot voor kort niet tot een praktisch of efficiënt bruikbare oplossing konden worden gebracht omdat de numerieke hulpmiddelen onvoldoende waren ontwikkeld. De mogelijkheden die voor de technische mechanica zijn ontstaan zullen alleen door een samenwerking van numerici en mechanici ten volle kunnen worden benut. In de vliegtuigbouwkunde is

men op deze weg het verst gevorderd. De statische en dynamische analyse van de daar gebruikte dunwandige constructies met verstijvers en uitsparingen is van een zodanig belang en is zo omvangrijk dat de meeste fabrieken eigen elektronische rekenmachines met bijbehorende staf tot hun beschikking hebben.

Om eventuele misverstanden te vermijden wil ik opmerken dat voor vele technische becijferingen de rekenlineaal een alleszins bruikbaar instrument is, in het bijzonder wanneer het gaat om incidentele vermenigvuldigingen en delingen. Maar in de moderne werktuigbouwkunde treden vaak berekeningen op met een structuur die er als het ware om vraagt om na te gaan in hoeverre het lonend is om van de nieuwe hulpmiddelen gebruik te maken. Ik denk bijvoorbeeld aan frequent voorkomende berekeningen van ingewikkelde statisch onbepaalde constructies of gecompliceerde trillende systemen.

Verschillende industrieën geven aan deze problemen ruime aandacht. Er zijn echter nog grote fabrieken waar gequalificeerde technici dagenlang achtereen hun rekenliniaal gebruiken voor werk waar op zijn minst een handrekenmachine economisch kan worden ingeschakeld en waar het hoogstwaarschijnlijk verantwoord is om verder te gaan. Wanneer een fabriek het creëren van een eigen afdeling voor deze problemen niet lonend acht, dan bestaat wellicht de mogelijkheid van samenwerking met een gespecialiseerd instituut.

In 1956 is in het „Journal of Applied Mechanics” een dergelijke samenwerking beschreven op het gebied van het berekenen van gecompliceerde pijpleidingsystemen. De methode is zo ver ontwikkeld dat men de rekenmachine slechts de meest elementaire fysische- en geometrische gegevens hoeft toe te voeren. Vrijwel alle technisch voorkomende complicaties kunnen in rekening worden gebracht zonder dat het programma hoeft te worden gewijzigd. Een dergelijke ver doorgevoerde automatisering heeft men kunnen bereiken door met behulp van matrices het probleem van het begin af aan te formuleren in een taal die voor de machine bijzonder geschikt is. Het laat zich aanzien dat deze wijze van handelen meer nog dan tot dusver kan worden toegepast in de werktuigbouwkunde.

De electronica die ik reeds heb genoemd bij de numerieke wiskunde, heeft ook onze meettechniek een grote injectie gegeven. Het is tegenwoordig zeer gebruikelijk om in een zogenaamde opnemer de te onderzoeken mechanische grootheid om te zetten in een elektrische. Deze wordt langs elektronische weg versterkt en vervolgens aangewezen door een wijzerinstrument of geregistreerd door een oscillograaf. In de laatste jaren is het

ook mogelijk geworden direct getallen te voorschijn te brengen die automatisch kunnen worden getypt of verder kunnen worden verwerkt in een rekenmachine.

Hoe staat nu de werktuigkundige tegenover deze ontwikkeling? Uitzonderingen daargelaten beschouw ik hem als klant van hen die zich specialiseren in het ontwikkelen van dit soort meetapparatuur. Het is gunstig wanneer de gebruiker de grondslagen beheerst waarop de verschillende onderdelen van het elektronisch gedeelte van de apparatuur berusten, het zal een deskundig gebruik alleen maar ten goede komen; maar het is niet beslist noodzakelijk dat hij precies weet hoe het allemaal in die zwarte kastjes in zijn werk gaat. Ik zou hier de retorische vraag willen aanhalen die in enigszins ander verband is gesteld door Heaviside. In de tijd dat het gebruik van de operatorenrekening riskant was omdat de grondslag van de methode nog niet voldoende was opgehelderd, betoogde hij dat de rekenwijze, ondanks alles, waard was om te worden toegepast. Hij zei „Shall I refuse my dinner because I do not fully understand the process of digestion?“, „moet ik mijn eten laten staan omdat ik de spijsvertering niet precies begrijp?“ Niét in een geval zoals dat van Heaviside maar wél in het geval van het toepassen van de elektronische meettechniek is mijn reactie op deze vraag: Eet maar volop, voor eenvoudige moeilijkheden hebben velen van ons wel wat cascara of norit bij de hand, in ernstiger gevallen zijn er bewaarde artsen die de spijsvertering weer in goede banen kunnen leiden.

Vanzelfsprekend moet elke gebruiker wel de kenmerkende gegevens van het apparaat kunnen hanteren, zoals gevoeligheid en frequentiekenmerk. Hij moet verder in staat zijn de gevolgen te beoordelen van een koppeling van de opnemer met het te onderzoeken object en de moeilijkheden kennen die kunnen optreden bij het bevestigen van de opnemer en bij het uitvoeren van de metingen. In een aantal gevallen zal hij zelf zijn opnemers aanpassen aan het speciale probleem dat hem bezig houdt.

Vele ingenieurs zullen als belanghebbenden op de hoogte willen blijven van wat er in de genoemde sector gaande is. Zo nodig en zo mogelijk zullen zij suggesties opperen ten aanzien van een ontwikkeling die voor hun vakgebied van nut is. Wanneer zij de beschikking hebben over kennis van de fundamentele fysische en electrotechnische achtergrond, zal een samenwerking met specialisten op dit gebied bijzonder vruchtbaar kunnen zijn.

Het onderwerp waar ik vervolgens uw aandacht voor vraag behoort tot de categorie waar de theoretische behandeling sterk achter is bij de behoefte. Wanneer een constructie een wisselende belasting ondervindt dan kunnen zich in het materiaal merkwaardige verschijnselen afspeelen die in de praktijk

nare gevolgen hebben. Wisselende spanningstoestanden met een amplitude veel kleiner dan de spanningstoestand die in het statische geval als gevaarlijk wordt gebrandmerkt, kunnen aanleiding geven tot microscheuren die langzaam aangroeien en uiteindelijk breuk van de constructie veroorzaken. Dit feit, dat van steeds groter belang wordt in de werktuigbouwkunde, heeft men de naam „vermoeiing” gegeven.

Ruim honderd jaar geleden werd de aandacht van de technische wereld op dit verschijnsel gevestigd doordat in een aantal landen onverklaarbare breuken optraden in assen van spoorwegrijtuigen. In 1843 wees de destijds 23-jarige Engelsman Rankine op het typische uiterlijk van het breukvlak en op het feit dat abrupte dikteveranderingen van de as een buitengewoon ongunstige invloed hebben. In de loop van de tijd zijn de opmerkingen van Rankine op vele manieren aangevuld maar ze zijn nog steeds richtinggevend bij het herkennen respectievelijk vermijden van vermoeiingsbreuken. De Duitser Wöhler bouwde voor het vermoeiingsonderzoek de eerste speciale machines; zijn principe van roterende buiging wordt nog steeds, zij het op beperkte schaal, toegepast. Hij voerde in de jaren 1852—1869 zijn klassiek geworden onderzoeken uit en stelde vast dat er voor wisselspanningen een grensamplitude bestaat die het materiaal onvermoeid kan verdragen.

Dit was slechts het begin; sneller lopende machines, lichtere constructies met hogere specifieke belastingen zijn de oorzaak dat wisselspanningen tegenwoordig steeds gevaarlijker worden. Het fundamentele mechanisme van de vermoeiingsbreuk is nog niet voldoende verklaard ondanks een lange reeks van jaren met intensief onderzoek van theoretische en experimentele fysici, chemici en ingenieurs. Er zijn vele speculaties en in de laatste jaren zelfs theoretisch-fysische ontwikkelingen, liggende op het gebied van kristalroosters, die een kleine hoop geven voor de toekomst.

De fundamentele onderzoeken zijn nog lang niet zover gevorderd dat zij de constructeur kunnen helpen bij dat belangrijke deel van zijn taak dat bestaat uit het onduidelijk vastleggen van de afmetingen van zijn constructie, het doen van een materiaalkeuze en het aangeven van een bewerkingsmethode. Hij moet zich behelpen met de resultaten van onderzoeken die veelal handelen over de invloed van één variabele op de vermoeiingseigenschappen. Het aantal publicaties over speciale aspecten op dit gebied bedraagt duizenden en het aantal dat per jaar het licht ziet neemt steeds meer toe.

Op deze wijze is een schat van incidentele gegevens verkregen waarvan ik ter illustratie een drietal bekende vermeld, die elk een ander karakter be-

zitten, namelijk: het feit dat het vervangen van een goedkope staalsoort door een veel duurere gelegeerde staalsoort vaak niet leidt tot belangrijke verhoging van de vermoeiingssterkte van de constructie, het feit dat shot-peening, beschieting van het oppervlak met kleine kogeltjes, een verhoging van de vermoeiingssterkte geeft en het feit dat een corroderende omgeving een desastreuze invloed heeft. Men begrijpe mij goed; er zijn natuurlijk wel theorieën ontwikkeld om deze effecten te verklaren; zij zijn echter niet voldoende bevredigend.

In de tijd voor 1940 hield men zich voornamelijk bezig met proeven bij constante wisselspanningsamplitude, aangeduid met de letter S. Bepaald werd het aantal wisselingen, aangeduid met de letter N, dat bij gegeven S moet worden uitgevoerd om breuk te veroorzaken. Een aantal proeven met verschillende S, uitgevoerd op zo goed mogelijk identieke objecten, levert een kromme in het S—N vlak, de bekende Wöhler-kromme. Door geschikte veranderingen van een parameter van het object verkrijgt men een schaar van S—N krommen waaruit men conclusies probeert te trekken.

Het onderzoek inzake de invloed van de geometrie der constructie heeft sinds lang, eigenlijk al sinds Rankine, grote aandacht gehad. Een bron van zorg is nog steeds het feit dat de zgn. dynamische kerffactoren andere waarden bezitten dan de statische kerffactoren. Het bepalen van spanningsconcentraties langs klassiek theoretische weg of met behulp van experimenteel statisch onderzoek geven onvoldoende uitsluitsel over het gedrag bij vermoeiing. Het beproeven van verkleinde modellen is niet volledig betrouwbaar gebleken; kerffactoren die op deze wijze zijn verkregen kunnen niet zonder meer worden overgedragen op grotere constructies.

Neemt men verder in aanmerking dat de belasting van een constructie in bedrijf vaak zo gecompliceerd van aard is dat men deze niet kan uitoefenen met standaardmachines, dan is het duidelijk dat men er naar streeft beproevingsinstallaties te bouwen waarbij het mogelijk is zeer verschillende constructies op ware grootte onder zo goed mogelijk geïmiteerde bedrijfsomstandigheden te onderzoeken.

Na de 2e wereldoorlog is nog een aantal aspecten de aandacht komen vragen. Enige onderzoekers, o.a. Weibull in Zweden en Freudenthal in Amerika wezen er op, dat de aanzienlijke spreiding die er bestaat bij meetresultaten van ogenschijnlijk identieke proeven het een eis maken statistische methoden toe te passen, zowel bij theoretische behandeling als bij de interpretatie van de experimenten. Er moeten relaties worden gevonden tussen de optredende spanning S, het aantal optredende wisselingen N en de waarschijnlijkheid P dat hierbij breuk optreedt. Volgens Freudenthal zou men

rationeler kunnen construeren wanneer de conventionele veiligheidscoëfficiënten worden vervangen door factoren die de waarschijnlijkheid van breuk aangeven.

Het tweede punt dat grote belangstelling heeft gekregen is de invloed van de veranderlijke wisselspanningsamplitude. De meest gebruikte beproevingsmethoden werken met een constante amplitude terwijl de belasting in de praktijk vaak een geheel ander karakter heeft. De automobiel en het vliegtuig zijn bekende voorbeelden van constructies die onder zeer uiteenlopende omstandigheden worden gebruikt en waarbij dit probleem een grote rol speelt. Men is er toe overgegaan het belasting-spectrum te bepalen onder gebruikscondities en de invloed hiervan na te gaan op het vermoeingsverschijnsel. Het zou bijzonder gunstig zijn indien de op klassieke wijze verkregen resultaten zouden kunnen worden verwerkt bij een prognose inzake het breukgevaar onder bedrijfsomstandigheden. In dit verband wijs ik op de met de engelse naam aangeduide theorie van „cumulative damage”, de zich ophopende inwendige beschadigingen van het materiaal. De grondidee komt in zijn eenvoudigste vorm hier op neer dat men aanneemt dat het materiaal bij elke spanningsvariatie een gedeelte verbruikt van zijn vermogen om wisselende belasting te verduren.

Miner opperde als eerste de volgende, aanvankelijk veelbelovende, hypothese. Wanneer bij een wisselspanningsamplitude S_1 breuk optreedt na N_1 wisselingen en wanneer in de praktijk deze spanningswisseling n_1 malen optreedt in combinatie met wisselspanningen S_1, S_2, S_3, \dots dan zal breuk ontstaan indien $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$. Helaas blijkt de hypothese niet volledig houdbaar te zijn zodat ook hier nog veel werk te doen blijft.

Onderzoekingen op het gebied van de vermoeing zijn zeer tijdrovend. Daar er nog geen afdoende methode gevonden is die gedurende het verloop van de proef een quantitative indicatie geeft over de door wisselende belasting reeds opgetreden structurele beschadigingen, moet men elk te onderzoeken object belasten tot scheurvorming optreedt, hetgeen schatten-derwijze 10^5 à 10^7 wisselingen vergt. Wanneer men verder bedenkt dat een enkele Wöhler-kromme, geldig dus voor één greep voor alle mogelijke parameters, 6 à 10 te onderzoeken objecten vraagt dan krijgt men een beeld van de omvang van het vermoeingsonderzoek.

Onderzoekingen op het onderhavige gebied zijn voor de ontwikkeling van vele takken van de moderne techniek een noodzakelijke voorwaarde, zowel uit menselijke als uit economische overwegingen. Reeds in 1849 zei de bekende locomotievenbouwer Stephenson in een vergadering, dat er bij

een spoorwegramp ten gevolge van een vermoeiingsbreuk overwogen is om de betreffende ingenieurs te vervolgen wegens dood door schuld. Enige recente voorbeelden van calamiteiten ten gevolge van vermoeiing zijn in de luchtvaart voorgekomen. De ongelukken met Comet-vliegtuigen van enige jaren geleden hadden hun oorzaak in het bezwijken van de drukcabine ten gevolge van vermoeiing van een onderdeel van de constructie.

Een bekend geval van vermoeiing is ook dat van de breuken die na de 2e wereldoorlog optraden in de schroefassen van vele Liberty schepen. Hier is het niet de menselijke, maar de geldelijke kant die het meest spreekt. Van genoemde schepen zijn er in de oorlog ruim 2600 gebouwd; zij hebben een grote bijdrage geleverd tot de geallieerde overwinning. Na afloop van de oorlog waren er nog ruim 2300 in de vaart. In enkele jaren tijds moesten er 600 schroefassen worden vernieuwd terwijl er 100 schroefasbreuken op zee voorkwamen die met verlies van de schroef gepaard gingen. Enig inzicht in de financiële consequenties krijgt men wanneer men bedenkt dat een dag extra oponthoud van een middelgroot vrachtschip in een haven een schade is van de orde van grootte van het jaarsalaris van een technicus en dat het bedrag gemoeid met berging en reparatie wanneer het schip op zee de schroef heeft verloren, soms van zodanige grootte is dat hiervan een geheel vermoeiingslaboratorium kan worden ingericht.

Archer beschrijft in de „Transactions of the Institute of Marine Engineers” van 1950 de leerzame geschiedenis van het uitgebreide onderzoek. De oorzaak kon in vele gevallen worden toegeschreven aan het feit dat de schroef bij het varen in ballast niet voldoende onder water kwam zodat bij enige zeeegang het toerental op regelmatige tijden zodanig opliep dat een veelvoud hiervan samenviel met de laagste eigenfrequentie van het systeem schroef—schroefas—machine. Torsietrillingen traden dan op, die wisselspanningen veroorzaakten van een gevaarlijke grootte. Nadat men heeft aanbevolen om het maximum toerental te verminderen evenals de tijd die verloopt tussen twee inspecties van de as, is het aantal breuken allengs verminderd. Thans zijn met de Libertyschepen ook hun moeilijkheden verdwenen.

Soortgelijke problemen blijven voor de constructeur echter steeds bestaan. Wil hij ze met succes het hoofd bieden dan zal het kritisch schiften, combineren en extrapoleren van incidentele informatie op het gebied van de vermoeiing, één van de kundigheden zijn die hij zich moet eigen maken. Ondanks het feit dat een groot aantal voorzorgen kan worden genomen en zeer veel contrôles kunnen worden uitgeoefend zullen tegenslagen bij uitgevoerde constructies zo nu en dan niet uitblijven. Het overwinnen hiervan zal veel tijd en energie kosten, maar zal ook veel voldoening schenken.

Zeer gewaardeerde toeboorders,

Aan Hare Majesteit de Koningin betuig ik mijn eerbiedige dank dat zij mij heeft willen benoemen tot hoogleraar in de technische mechanica aan deze hogeschool.

Mijne heren curatoren,

Voor uw voordracht die heeft geleid tot mijn benoeming ben ik U zeer erkentelijk. Met mijn beste krachten zal ik medewerken aan de opbouw van de hogeschool en aan de taak die hij heeft op het gebied van onderwijs en onderzoek.

Mijne heren leden van de senaat en adviseurs,

De vriendelijke wijze waarop U mij in uw midden hebt opgenomen heeft mij zeer getroffen. De contacten die ik in de afgelopen maanden met velen uwer reeds heb gehad doen bij mij de hoop leven op een prettige en intensieve samenwerking.

In de collegebeschrijvingen die zijn opgenomen in de gids van onze hogeschool kan men lezen dat de studenten onder andere onderwijs krijgen in „Grondslagen en toepassingen van het verbinden van onderdelen in de werktuigbouw”. Met vrijwel dezelfde woorden kan het onderwerp worden beschreven waarmede gij, *waarde Schmid*, ons regelmatig confronteert. Ons doel is dan het vinden van een gebalanceerde opleiding tot werktuigkundig ingenieur. De manier waarop gij meer dan uw deel bijdraagt in het stellen van de problemen én in het oplossen ervan, is een stimulans voor de gehele afdeling.

Waarde Haringx,

Ik verheug mij er bijzonder op nauwer met U in contact te komen. De wijze waarop gij technische mechanica problemen analyseert is van een zodanig formaat dat ik hoop nog veel van U te leren. Uw medewerking thans aan de opbouw van het laboratorium is voor mij een grote steun.

De namen *Biezeno en Koch* zijn onverbrekkelijk met elkaar verbonden in de herinnering van velen die het voorrecht hadden onder hun gezamenlijke leiding te werken aan theoretisch en experimenteel onderzoek. Wat mij vaak heeft getroffen is het merkwaardig feit dat de resulterende kracht die zij samen konden uitoefenen zeer veel groter was dan men zou kunnen verwachten wanneer men, door het woord kracht misleid, te veel zou denken aan een verwant axioma uit de mechanica. Voor de arbeid die gij, *hooggeleerde Biezeno*, en gij, *hooggeleerde Koch*, hebt willen verrichten om mij te helpen bij mijn voortgang, ben ik U oprecht dankbaar.

Waarde van Wijngaarden,

Naast mijn leermeesters van de Delftse hogeschool ben jij het die bijzonder hebt bijgedragen tot mijn wetenschappelijke vorming. Onze vriendschappelijke gesprekken over wiskunde en mechanica onderwerpen zijn legio. De uren waarin jij mij deelgenoot maakte van je invallen, waarvan er later enige onder je handen uitgroeiden tot belangrijke publicaties, behoren tot de meest leerzame in mijn leven.

Mijne heren van de Hogere Technische School te Haarlem,

In Haarlem heb ik gelukkige jaren doorgebracht. De prettige en collegiale sfeer die heerst in uw docentencorps en de vriendschappelijke omgang met een aantal van U buiten de schooltijden hebben hier bijzonder toe bijgedragen.

U, *waarde de Vries*, ben ik dankbaar dat gij mij in contact hebt gebracht met ingenieurswerkzaamheden in de praktijk. De samenwerking met U gedurende de afgelopen jaren is voor mij van grote waarde geweest.

Dames en heren medewerkers van de afdeling der Werktuigbouwkunde,

Bij de opbouw van een moderne hogeschool is de enthousiaste medewerking van de wetenschappelijke, technische en administratieve staf van onschatbare betekenis. Met vreugde wil ik hier vaststellen dat de wijze waarop gij Uw taak vervult aan hoge eisen voldoet. Ik hoop nog lang met U te mogen samenwerken.

Dames en heren studenten,

Ook U levert een belangrijke bijdrage tot de opbouw van onze hogeschool. De stijl die U in deze jaren schept, zal in aanzienlijke mate bepalend zijn voor de wijze waarop in de toekomst de studenten te Eindhoven zullen leven en werken. Uw taak is niet gemakkelijk. Bespreekt de problemen die zich hierbij voordoen openhartig met hen die erbij zijn betrokken. Weest ervan overtuigd dat ons in dit verband slechts één doel voor ogen staat: uw vorming, niet alleen tot een kundig ingenieur, maar tot een in alle opzichten goed lid van onze samenleving.

Ik dank U voor uw aandacht.