

Over instabiliteiten

Citation for published version (APA):

Steenhoven, van, A. A. (2012). *Over instabiliteiten*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2012

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.

Afscheidscollege
prof.dr.ir. Anton
van Steenhoven
22 juni 2012



/ Faculteit Werktuigbouwkunde

TU / **e**

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Over instabiliteiten

Where innovation starts

Afscheidscollege prof.dr.ir. Anton van Steenhoven

Over instabiliteiten

Uitgesproken op 22 juni 2012
aan de Technische Universiteit Eindhoven

Inleiding

Mijnheer de rector, beste collega's, dames en heren,

In de trubbelige begintijd na mijn hoogleraarbenoeming zei collega Jeu Schouten me dat de taak van een hoogleraar vergelijkbaar is met die van de kapitein van een onderzeeboot: het is zijn taak en verantwoordelijkheid de bemanning heelhuids van punt A naar punt B te brengen, ongeacht of stormen en diepzeebommen je belagen. Die boodschap heb ik in mijn oren geknoopt en ik ga u vandaag dan ook vertellen wat A en B is en hoe we zijn gevaren.

Omdat u van dit college wat wilt opsteken, zal ik dat in de context plaatsen van het onderzoek naar stromingsinstabiliteiten en duurzame energietoepassingen. Uiteraard zal ik ook nog kort ingaan op mijn ervaringen met onderwijs en organisatie.

Stromingsinstabiliteiten

Voor de niet-ingewijden is het goed te weten dat instabiliteiten op veel plaatsen voorkomen en voor degenen die in stromingsleer geïnteresseerd zijn, vormt het de schakel tussen laminaire en turbulente stromingen. Eerst maar eens een voorbeeld: de stroming die uit een nozzle komt, is in het begin een nette gelaagde (laminaire) stroming die geleidelijk via golfvormige verstoringen (de zogenaamde schuiflaaginstabiliteit) en grote wervels overgaat in een ongeordende stroming: turbulentie.

Volgens het Clay Mathematics Institute hoort turbulentie tot de zeven (nu zes) wiskundig onopgeloste problemen [1]:

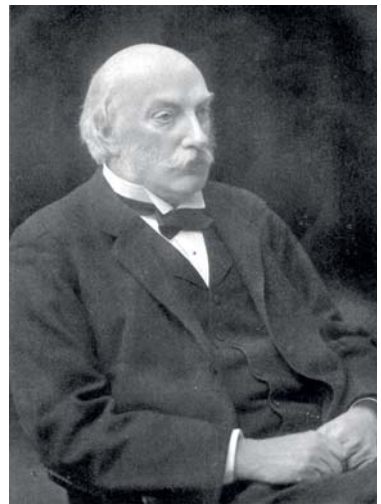
Waves follow our boat as we meander across the lake, and turbulent air currents follow our flight in a modern jet. Mathematicians and physicists believe that an explanation for and the prediction of both the breeze and the turbulence can be found through an understanding of solutions to the Navier-Stokes equations. Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

De analyse van instabiliteiten kan daarbij helpen omdat zij analytisch, numeriek en experimenteel hanteerbaar zijn. Gedurende mijn loopbaan aan de TU/e ben ik veelvuldig met instabiliteiten in aanraking geweest en ik wil u daar graag wat over vertellen.

Er zijn diverse classificaties van instabiliteiten. De meest gangbare indeling in subgroepen is die op basis van de rol van de viscositeit (of de stroperigheid) van de vloeistof:

- De stroming wordt als niet-viskeus beschouwd en viskeuze effecten worden dus verwaarloosd.
- De stroming is viskeus en de viscositeit werkt dempend.
- De stroming is viskeus en viscositeit is essentieel voor het ontstaan van instabiel gedrag.

Veel inzicht in deze instabiliteiten is verkregen uit de zogenaamde lineaire instabiliteitstheorie, waarin alleen de groei van kleine verstoringen wordt beschouwd [2]. Het fundament van deze theorie is reeds gelegd in de negentiende eeuw. Een van de grootste namen op dit gebied is die van Lord Rayleigh. Hij was hoogleraar in Cambridge en heeft op meerdere vakgebieden grote bijdragen geleverd aan de wetenschap. Zonder twijfel heeft zijn grondige wiskundige opleiding en de latere confrontatie van de theorie met het experiment bijgedragen aan zijn grote successen. Ik wil vooral memoreren aan wat hij in het begin van zijn hoogleraarschap in Cambridge heeft gevonden en aan dat wat hij later in zijn leven heeft gedaan.



Figuur 1

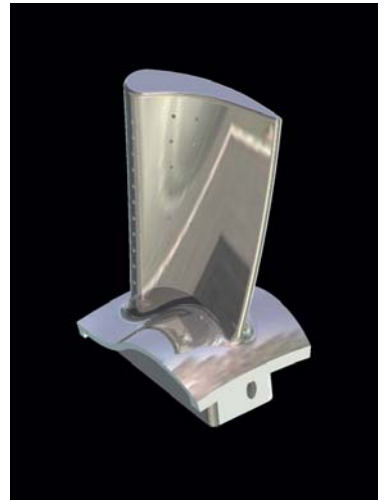
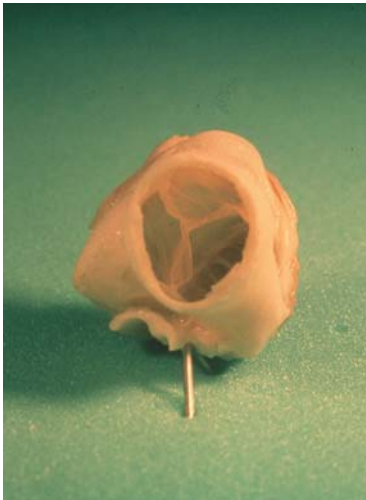
John William Strutt, Lord Rayleigh, 1842-1919 [2]

Inviskeuze analyse

Een van zijn beroemdste theorema's is het zogenaamde buigpuntcriterium: via een erg elegante afleiding, die ik bij de colleges Turbulente Stromingsverschijnselen altijd weer laat zien, is de stroming op basis van inviskeuze theorie (dus zonder dat je de viscositeit in de Navier-Stokes-vergelijking meeneemt) instabiel als het snelheidsprofiel van de hoofdstroming een buigpunt bevat. Zeventig jaar later (in 1950) heeft Fjørtoft [3] dat nog verfijnd door daaraan toe te voegen dat er naast het buigpunt ook een maximum in de vorticeiteit moet zijn. Kijkend naar de snelheidsprofielen kun je dan meteen zeggen dat een schuiflaag instabiel is en een grenslaag langs een plaat of pijp stabiel. Dat laatste stemt niet overeen met onze waarnemingen, maar daar kom ik later nog op terug. Zo'n typische schuiflaag-

instabiliteit heet een Kelvin-Helmholtz-instabiliteit. Zij komt voor in de atmosfeer waar luchtlagen van verschillende snelheid of dichtheid langs elkaar stromen.

De Kelvin-Helmholtz-instabiliteit treedt ook op in het menselijk hart. Tijdens mijn afstudeerwerk onder leiding van Rini van Dongen en tijdens mijn promotiewerk onder leiding van Piet Veenstra en Rob Reneman hebben we dat in modellen van een hartklep en in de fysiologische werkelijkheid experimenteel waargenomen. Een aantal jaren terug heeft Jurgen het Hart [4] dat met begeleiding van Frank Baaijens numeriek ook laten zien. Aan de snelheidsvectoren kun je zien dat de snelheid aan de achterkant van de vliezen kleiner is dan aan de voorkant. De frequentie van de trillingen bedraagt ca. 15 Hz en je kunt allerlei redenen verzinnen waarom dit gunstig is voor de hartklep, maar daar ga ik nu niet op in.



Figuur 2

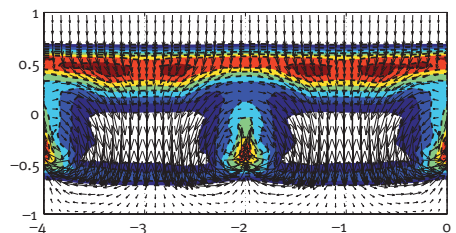
Kelvin-Helmholtz- instabiliteiten in hartklep en turbineblad

Een ander voorbeeld kwamen we een paar jaar geleden tegen toen we in het kader van een project van Technologiestichting STW, samen met Bob Matheij van de faculteit Wiskunde en Informatica, de filmkoeling van turbinebladen onderzochten [5]. De vraagstelling was: kun je in plaats van met de elektrochemische methode ook met lasertechnieken kleine kanaaltjes in het turbineblad maken? Het voordeel van een laser is natuurlijk dat het veel sneller gaat, maar het nadeel is dat er stolranden in het kanaal ontstaan. En inderdaad ook achter deze stolranden stroomt de vloeistof relatief langzaam en ontstaan er grote wervelstructuren, die bij een

ongelukkige positionering van de stollingsranden de filmkoeling negatief beïnvloeden. Maar bij een goed gekozen laserpulsduur kun je de koeling ook bevorderen!

Viskeuze analyse: viscositeit dempt

Dan de invloed van viscositeit. Vanwege de stroperigheid van het medium verwacht je intuïtief dat instabiliteiten bij het meenemen van viscositeit worden gedempt. In stromingsleer drukken we dat uit via dimensieloze getallen: in de teller staat dan de versturende term - dat kan de convectieve traagheidskracht zijn, de opwaartse kracht of de centrifugale kracht - en in de noemer staat de viskeuze kracht. Er bestaat een kritisch getal waarboven de versturende kracht de dempende kracht overwint. We spreken dan van een kritisch Reynolds-, Rayleigh- of Taylorgetal. Een prachtig voorbeeld hiervan is de zogenaamde Rayleigh-Bénard-instabiliteit. Hierbij wordt de onderkant verwarmd en bij het kritisch Rayleigh-getal ontstaan dan prachtige cellen die in het begin hexagonaal van vorm zijn en waarbij de karakteristieke lengtemaat ca. twee maal de afstand tussen de platen is. Het beroemde experiment van Bénard dateert van 1900 en de wiskundige analyse ervan heeft Rayleigh (voor een iets andere configuratie) zo'n 16 jaar later op 74-jarige leeftijd afgeleid.



Figuur 3

Instabiliteit achter een verwarmde cilinder (zij-aanzicht en snelheidsveld achter cilinder).

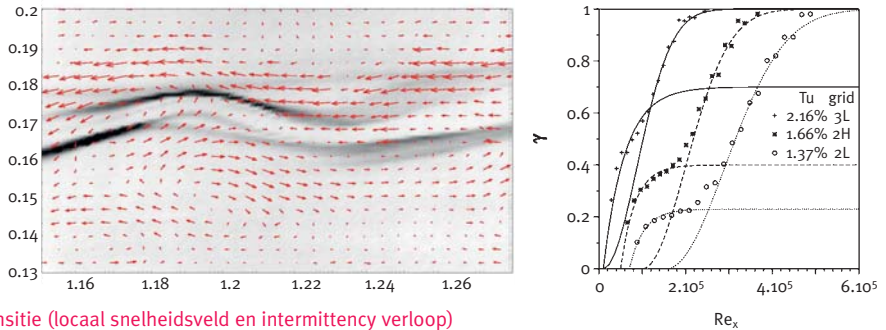
Wij hebben zo'n soort instabiliteit ook onderzocht bij de stroming achter een verwarmde cilinder [6, 7]. De aanleiding van dit onderzoek was een vraag van een medewerker vanuit het oude Philips NatLab, die een nauwkeurig beeld wilde hebben van de stroming rondom verwarmde objecten. Denk aan de cilinder als hete elektronica-component en de luchtstroom door de ventilator als hoofdstroom. Zo'n situatie is een typisch voorbeeld van gemengde convectie, waarbij de natuurlijke en geforceerde convectie van dezelfde orde grootte zijn. Onder leiding van Camilo Rindt en met financiële steun van de stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) hebben we daar een groot aantal jaren onderzoek naar gedaan.

De stromingsconfiguratie laat zich goed visualiseren in deze proefopstelling. Zonder warmte ontstaat de zogenaamde Von Kármán-wervelstraat, maar als we warmte gaan toevoegen gebeurt er een aantal dingen tegelijk. De wervels zijn niet meer symmetrisch verdeeld en in tegenstelling tot wat je zou verwachten gaat de wervelstraat onder invloed van warmte niet omhoog, maar omlaag. Dat heeft met de vortcriteitsproductie te maken onder invloed van temperatuurgradiënten en samen met Gertjan van Heijst hebben we dat volledig kunnen beschrijven. Een ander fascinerend iets is dat op de bovenste rol van de wervelstraat thermische pluimen ontstaan. Een kenmerk daarvan is dat zij, naar analogie met de Rayleigh-Bénard-convectiecellen, een onderlinge afstand van ca. 2 buisdiameters hebben. De gedetailleerde beschrijving van het fenomeen vroeg veel numeriek en experimenteel onderzoek, waarbij intensief gebruik is gemaakt van optische meettechnieken, zoals Particle Tracking Velocimetry (PTV) voor snelheidsmetingen, Laser Induced Fluorescence (LIF) voor temperatuurmetingen en Spectrale elementenmethode voor de numerieke berekeningen. Uiteindelijk gaat deze instabiliteitsmode nu als Mode-E door het leven (met de E van Eindhoven).

Viskeuze analyse: viscositeit is essentieel!

Tot zover het gedrag waarbij viscositeit voor demping van de stromingsinstabiliteiten zorgt. Maar elke tweedejaarsstudent leert dat de grenslaag van de stroming langs een plaat bij een bepaald lokaal Reynoldsgetal instabiel wordt en ook de stroming in een kanaal slaat om van laminair naar turbulent bij een Reynoldsgetal van ca. 2300. Laten we bij het eerste voorbeeld beginnen. Hoewel het zogenaamde Blasius-profiel geen buigpunt heeft, hebben Tollmien en Schlichting in 1929 aangetoond dat wanneer de viscositeit in de bewegingsvergelijking wordt meegenomen, na linearisatie toch een instabiliteit voorspeld wordt. Dus ook op basis van de lineaire stabiliteitstheorie wordt voorspeld dat de stroming langs een plaat instabiel wordt. Dit werd experimenteel bevestigd in 1947. Deze bevindingen hebben grote invloed gehad op de ontwikkeling van vleugels voor vliegtuigen. In ons geval doen we onder leiding van Rick de Lange al vele jaren onderzoek naar de stroming rondom turbinebladen. In tegenstelling tot bij vliegtuigen is de turbulentiegraad van de hoofdstroming in gasturbines heel hoog, hetgeen bepaalt dat de omslag van laminair naar turbulent via zogenaamde bypass-transitie plaatsvindt in plaats van de natuurlijke transitie bij vleugelprofielen. Deze bypass-transitie heeft twee karakteristieken: enerzijds wordt de stroming eerder instabiel en via stromingsvisualisaties en Particle Image Velocimetry (PIV)-metingen hebben we de interactie van sinueuze en varicose instabiliteiten met de in de grenslaag aanwezige streaks zichtbaar kunnen maken [8]. Daarnaast bleek het kritisch Reynolds-

getal veel lager en met behulp van expansiebuisexperimenten hebben we dat kunnen kwantificeren [9].



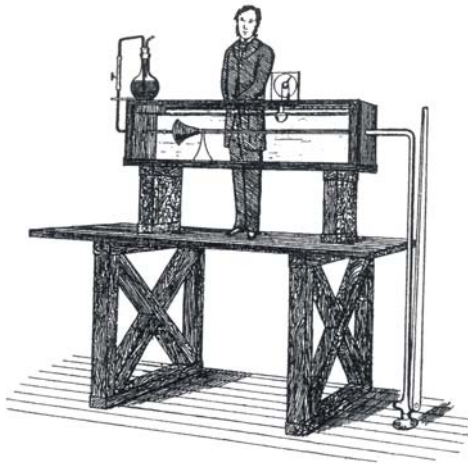
Figuur 4

Bypass-transitie (locaal snelheidsveld en intermittency verloop)

Buisstroming

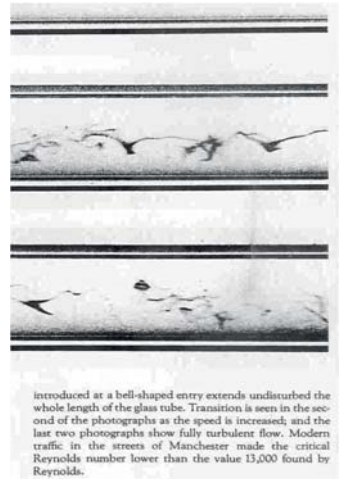
U denkt wellicht, mooi, alles is opgelost; kunnen we nu naar de receptie gaan? Helaas, dit college duurt 45 minuten en ik ben nog lang niet aan het eind! Zo wil ik u eerst nog het beroemde experiment van Osborne Reynolds uit 1883 laten zien, waarmee het turbulentie-onderzoek een grote push voorwaarts heeft gekregen. In zijn laboratorium in Manchester heeft hij de stroming in een glazen buis onderzocht en een karakteristiek resultaat ziet u in figuur 5. Bij het ophogen van het Reynoldsgetal ziet u dat de stroming eerst laminair is, dan instabiel gedrag vertoont en ten slotte turbulent wordt. Wat in kleine lettertjes onder de figuur staat is dat het karakteristieke Reynoldsgetal geen 2300 is, wat wij algemeen als waarde hanteren, maar 13.000. Kennelijk hebben de zandwegen rondom het lab en het vervoer per paard en wagen heel andere achtergrondverstoringen gegenereerd dan in onze moderne wereld.

De groep van Jerry Westerweel en wijlen Frans Nieuwstadt heeft in Delft ter verklaring van deze transitie een belangrijke stap kunnen zetten, maar er valt nog veel te doen. Een ander voorbeeld van vooraanstaand turbulentieterk vindt plaats bij Detlef Lohse in Twente en Herman Clercx hier in Eindhoven, waar de invloed van rotatie en de bijbehorende schalingsregels zijn onderzocht. Het was voor mij een eer om het FOM-programma 'Turbulence and its Role in Energy Conversion Processes', waar veel van dit onderzoek in is ondergebracht, als programmaleider te mogen coördineren.



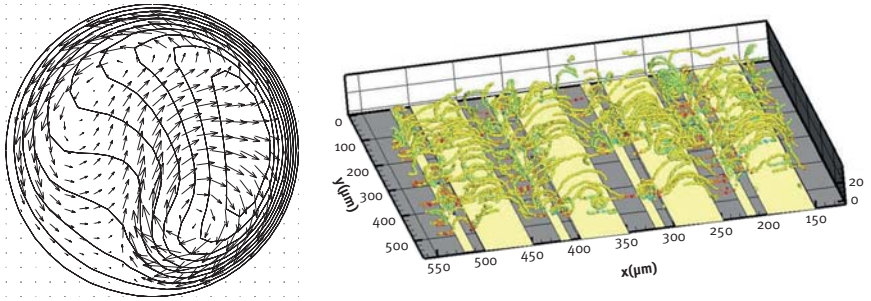
Figuur 5

Buisstroming [10, 11]



Wervels en secundaire stromingen

Een kenmerk van instabiliteiten is dat ze klein beginnen en eindigen in grote wervelachtige structuren. We zagen eerder al de Von Kármán-wervelstraat die in principe door een kleine verstoring wordt getriggerd en vanwege het niet-lineaire karakter van de Navier-Stokes-vergelijking uitgroeit tot grote wervelstructuren. Een ander mooi voorbeeld van wervels vindt u in een bocht. Onder invloed van centrifugale krachten ondervinden de vloeistofdeeltjes een kracht naar buiten, terwijl aan de wanden vanwege viskeuze invloeden en massabehoud de vloeistof weer terugstroomt. Deze wervels noemen we Dean-wervels. In feite zijn het wat we noemen secundaire stromingen, dus een snelheidsveld loodrecht op de axiale richting. Deze secundaire stromingen, die nog steeds een volledig laminaire oplossing vormen, komen ook voor in een halsslagadervertakking, die in feite ook een soort bocht is. In het begin van mijn loopbaan hebben we daar samen met Jan Janssen, Frans van de Vosse en vele anderen numeriek en experimenteel werk aan gedaan. Dit werk hebben we daarna voortgezet binnen de groep Energietechnologie. Dit soort stromingen komen namelijk ook voor in een warmteboiler en onder invloed van temperatureffecten worden deze Dean-wervels dan verstoord [12]. Net zoals bij de verwarmde cilinder is dit ook een voorbeeld van gemengde convectie. Met behulp van numerieke analyses kun je de totale warmteoverdracht van een warmtewisselaar voorspellen en op basis daarvan de warmteboiler optimaliseren.



Figuur 6

Wervelstructuren in warmteboiler en microkanaal

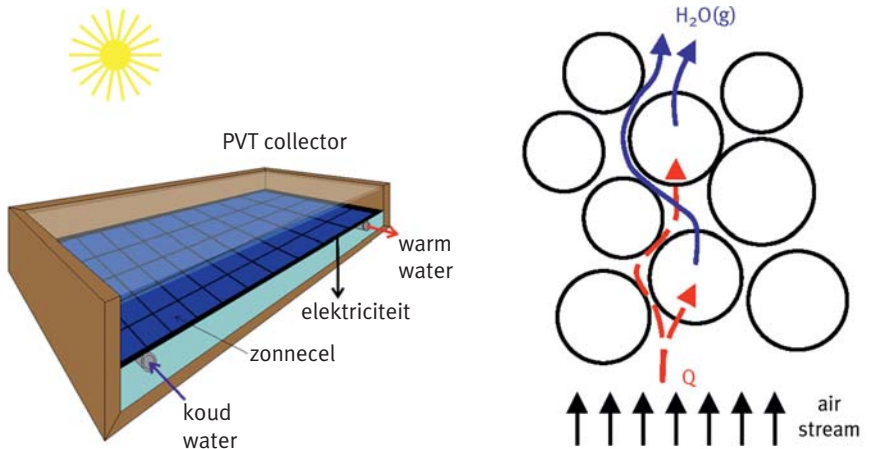
Met de komst van Michel Speetjens in mijn groep zijn we deze wervelstructuren gaan gebruiken om menging te bevorderen. Zo is de warmteoverdracht in een microkanaal niet vanzelfsprekend. Door het laminaire karakter van de stroming is de warmteoverdracht beperkt tot een relatief lage waarde. Toch wil je in de toekomst, bijvoorbeeld boven computerchips of in microsystemen, hete oppervlakken koelen. Een mogelijkheid om dat te doen is om door middel van AC Electro-Osmose kunstmatig wervels op te wekken. We hebben daartoe in nauwe samenwerking met de Universität der Bundeswehr München een 3D micro-PTV-methode ontwikkeld. Op basis van de vervorming van de optische beelden van de deeltjes in het focusvlak kun je de derde snelheidscomponent afschatten, waardoor de driedimensionale wervelstructuren zichtbaar worden [13]. We staan aan het begin van deze onderzoekslijn, en hopen die geleidelijk uit te breiden met micro-LIF voor het zichtbaar maken van de temperatuurvelden in microkanalen.

Energie Technologie

Ongemerkt zijn we zo aan gekomen bij microsystemen. De opbouw van de groep Energie Technologie is geleidelijk gegaan: de eerste 10 jaar hebben we ons gericht op het warmtetransport in de wat grotere systemen. Met de komst van Arjan Frijs en Silvia Nedeja, en in nauwe samenwerking met de groep van Peter Hilbers van de faculteit Biomedische Technologie, zijn we de laatste 10 jaar geleidelijk aan ook naar kleinere systemen gaan kijken. Die belangstelling werd gevoed vanuit Philips, Océ en ASML, waar in microsystemen veel problemen optreden die een warmte-technische achtergrond hebben, maar ook door de intrinsieke belangstelling vanuit mijn natuurkunde-achtergrond voor wat er aan warmteoverdracht op die kleine schaal te modelleren en bemeten is. Het kenmerk van dit soort systemen is dat de interactie met de wanden verre van triviaal is. De moleculen zijn niet uniform verdeeld en dicht bij de wanden ontstaan daardoor dichtheidsvariaties en sprongen in snelheid en temperatuur. Het mooie is dat via Moleculaire Dynamica-studies de wandeigenschappen gevarieerd kunnen worden. Zo zie je dat aan een hydrofobe wand een grotere snelheidssprong en temperatuursprong optreedt dan aan een hydrofiele wand. Momenteel richt het onderzoek zich op de modellering van verdampingskoeling en chemische reacties.

Hoe wonderlijk het ook klinkt: via Moleculaire Dynamica (MD) zijn we aangekomen bij duurzame energietoepassingen. Zo'n 40% van het jaarlijkse energiegebruik gaat in de verwarming van gebouwen zitten. Logisch dat veel onderzoek wordt gedaan naar het gebruik van duurzame energie in de gebouwde omgeving. Mijn voorganger Chris van Koppen is in de zeventiger jaren onderzoek naar zonne-energie gestart en wij zijn daar met de steun van wijlen Paul Smulders van de faculteit Natuurkunde, wijlen Kees Daey Ouwens van ECN, Ronald van Zolingen van Shell Solar en Herbert Zondag van ECN mee door gegaan. In de beginfase was het onderzoek gericht op de opslag van via thermische collectoren opgewarmd water. Daarna hebben we het ontwerp van een gecombineerd Photovoltaïsch-Thermisch paneel ter hand genomen. Voor zo'n collector is het essentieel dat de absorptie van warmte wordt vergroot; bij een normale PV-collector probeer je dat juist te vermijden, aangezien de elektrische efficiëntie afneemt met een stijging van de temperatuur. Gedetailleerde optische analyses, optimalisaties en systeemstudies hebben geleid tot ontwerpen die voor verdere ontwikkeling zijn

doorgeleid naar ECN. Publicaties over dit gecombineerde PV-T paneel, die ongeveer eenzelfde efficiëntie haalt als twee afzonderlijke panelen voor elektriciteit en warmte, zijn de meest geciteerde van ons werk [14].



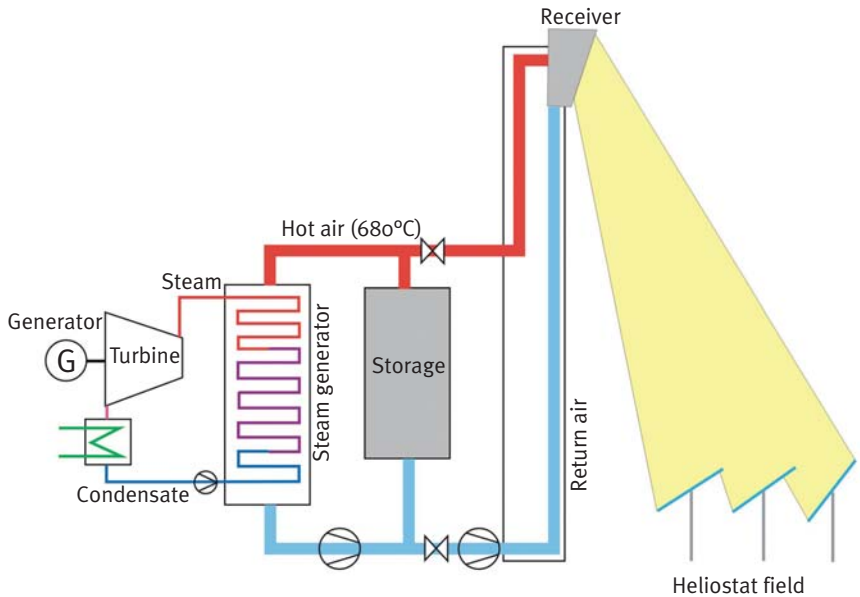
Figuur 7

Duurzame energie: PV-T paneel en Warmteopslag

De volgende fase is dat de warmte die je overdag hebt 'gewonnen', moet worden opgeslagen omdat je die 's avonds of in het geval van seizoensopslag in de winter wilt gebruiken. De systemen voor warmteopslag dienen redelijk compact te zijn, zodat ze bijvoorbeeld in de kelder van een flatgebouw passen. Een veelbelovende optie is thermo-chemische opslag die een factor 10 compacter belooft te zijn dan de opslag via warm water. Ook treden geen thermische verliezen op, wat voor een langetermijnopslag van warmte essentieel is. De warmte wordt aan zoutkristallen toegevoegd of onttrokken via een dehydratie- of hydratiereactie. In de zomer worden via zonne-energie de watermoleculen uit het zout verwijderd en in de winter wordt vochtige lucht aan de zoutkristallen toegevoegd, waarbij warmte vrijkomt die gebruikt kan worden om het gebouw op te warmen.

Dit probleem speelt ook bij de grote zonne-energiecentrale die Duitsland nu als compensatie voor het stoppen van zijn nucleaire activiteiten in Marokko gaat bouwen. Hier is de thermische warmtetoevoer afkomstig van grote spiegels die met de zonnestand meedraaien en de zonnestraling focuseren in de top van een Solar Tower. Mijn collega Hans Mueller-Steinhagen, toen naast hoogleraar in Stuttgart ook onderzoeksleider bij DLR, heeft hier op een van de Energy Days van Daan Schram een prachtig overzicht over gegeven. Uiteraard heb je in het systeem

warmteopslag nodig om de elektriciteitslevering tijdens de nacht intact te kunnen houden. Ook hier wordt met zouten gewerkt, maar dan via een faseovergang, en op termijn vormt thermo-chemische opslag, vanwege de geringere warmte-verliezen, een aantrekkelijk alternatief.



Figuur 8

Duurzame energie: grootschalige zonnecentrale [15]

Het probleem met hydratatie en dehydratie van zouten is dat er van alles gebeurt op moleculair- en korrelniveau, waar je op systeemniveau de consequenties van ondervindt. Daarom moet je het onderzoek doen op verschillende schalen. Zo is de wijze waarop de watermoleculen zich hechten aan de zoutmoleculen en de wijze van het verwijderen ervan onderwerp van MD-studies die we in het kader van de Graduate School tussen Lyngby, München en Eindhoven uitvoeren. Het onderzoek naar de kinetische parameters en het materiaalvervormingsgedrag tijdens de dehydratiereacties wordt uitgevoerd binnen het ADEM-programma samen met ECN. Het systeemonderzoek naar het ontwerp van een optimale reactor wordt gefinancierd binnen het Eindhoven Energy Institute met behulp van de zogenaamde Essent-gelden.

Onderwijs

Het zal u duidelijk zijn dat warmte en stroming een fascinerend vakgebied is waar nog veel te bestuderen valt en waarbij veel fenomenen in de dagelijkse praktijk herkenbaar zijn. Het is een vakgebied dat op alle schalen, van meters tot nanometers, technische uitdagingen biedt. Het is dan ook een typisch kenmerk van technische universiteiten dat de vakken thermodynamica, stromingsleer en warmteoverdracht verplichte onderdelen zijn van de ingenieursopleiding. In lijn met de ontwikkeling van Lord Rayleigh is het daarnaast van belang dat studenten niet alleen onderricht krijgen in het analyseren, maar ook kennismaken met het gebruik van experimentele en numerieke gereedschappen.

Daarmee kom ik nu vanzelf bij het onderwijs. In mijn carrière heb ik, samen met anderen, veel nieuwe onderzoeken opgestart. Beginnend met het onderzoek aan hartkleppen (samen met wijlen Fons Sauren), stroming in de halsslagadervertakking, instabiliteiten in thermische convectie, microwarmteoverdracht, thermische aspecten van duurzame energie en thermische processen in de mens. Het helpt geweldig om zo'n vakgebied te doorgronden door er 20 uur college over te geven. Een uur vullen met wat filmpjes en een afscheidscollege zoals vandaag lukt dan wel, maar de andere 19 uur moet je op een begrijpelijke wijze de diepte in. Zo heb ik in de loop der tijd, deels samen met anderen, de volgende vakken ontwikkeld en gegeven.

Thermodynamica (verplichte vakken voor Werktuigbouwkunde en Biomedische Technologie)

Warmteoverdracht (verplicht vak voor Werktuigbouwkunde)

Eindige Elementen Methode voor Warmte-en Stromingsproblemen

Fysische Meetmethoden

Humane Stromingsleer

Microwarmteoverdracht

Turbulente Stromingsverschijnselen

Warmtetransport in Biologische Systemen

Het is een voorrecht om aan de TU/e onderwijs te mogen geven. De studenten zijn vaak gemotiveerd en leergierig en dat houdt je scherp. Onderwijs geven vind ik leuk, maar vooral ook leerzaam. Het liefst sta ik daarbij met een krijtje voor het bord. Gezien de recente nominatie voor de W-onderwijsprijs voor beste bachelor-docent vinden de studenten dat kennelijk geen bezwaar.

Ook heb ik onderwijs mogen geven aan veel verschillende faculteiten en opleidingen; naast Werktuigbouwkunde ook voor Bouwkunde, Biomedische Technologie, Technische Natuurkunde en Sustainable Energy Technology. Hoewel de basisvergelijkingen steeds dezelfde zijn (de eerste en tweede hoofdwet van de thermodynamica en massa-, impuls- en energiebehoud bij warmte- en stromingsleer) zijn de verschillende toepassingen en analyses zo uiteenlopend, dat je elke dag weer wat nieuws leert.

Samenwerking

We zijn nu eindelijk aangeland bij punt B. We zijn onze toer begonnen in het menselijk lichaam en door de stimulerende interactie met de omgeving zijn we aangekomen bij punt B. Toch wil ik niet verhelen dat ik al die 40 jaar dat ik aan de faculteit Werktuigbouwkunde verbonden ben geweest een speciale belangstelling voor het menselijk systeem heb gehad. In de beginjaren werd dat soort onderzoek binnen de harde werktuigbouwkunde niet zo gewaardeerd, maar nu is dat volledig binnen de universiteit en faculteit verankerd.

Al die jaren hebben we een intensieve samenwerking gehad met de Universiteit Maastricht, de eerste 15 jaar met Rob Reneman voor onderzoek aan het cardiovasculaire systeem en de laatste 10 jaar met Wouter van Marken Lichtenbelt op het gebied van thermoregulatie. Het over de grens van je eigen discipline heen kijken met een deskundige uit een ander vakgebied die poogt je taal te begrijpen, is uiterst waardevol en vruchtbaar gebleken. Ik ben hen daar dan ook zeer erkentelijk voor.

Evenzo heb ik als voorzitter van diverse organen en stichtingen met veel verschillende achtergronden te maken gehad. Ik kan u verzekeren dat op basis van wederzijds respect veel problemen oplosbaar zijn. Dat heb ik ook zo ervaren binnen de onderzoekschool J.M. Burgerscentrum. Vanaf de eerste dag hebben wijlen Charles Hoogendoorn en wijlen Frans Nieuwstadt uit Delft mij alle steun gegeven, zowel bij de introductie in internationale gremia als bij het opzetten van nieuw onderzoek. In de loop der jaren is het circuit van hoogleraren in de warmte- en stromingsleer hecht geworden en het 3TU-gevoel, waarbij je elkaar in je waarde laat en elkaar vindt als je samen wat wilt, was al snel aanwezig. De belangrijke rol die Gijs Ooms hierbij heeft gespeeld valt niet te overschatten.

Een aspect wat ik nog niet genoemd heb, is dat je ontstane instabiliteiten ook kunt dempen. Zo hebben we onderzoek gedaan naar de invloed van een dunne draad op de stroming achter een omstroomd object [16] en samen met de KTH in Stockholm en de TU Delft onderzoeken we momenteel de invloed van het toevoegen van neutrale deeltjes [17]. Uiteraard zijn er ook veel instabiliteiten in het bestuurlijke circuit. Het dempen daarvan kan via eerlijke beoordelingsprocessen,

rustige besluitvorming en consistent gedrag. De faculteit Werktuigbouwkunde is in die zin in de loop der jaren gezegend met goede decanen. Hoe verschillend ze ook waren in persoon en manier van werken, het was elke keer de juiste man op de juiste plaats.

De diverse decanen, in het bijzonder Dick van Campen en Jeu Schouten, hebben dan ook veel bijgedragen aan mijn arbeidsvreugde en daarvoor wil ik hen hartelijk danken.

Daarnaast is het mij een voorrecht geweest aan veel juryberaden deel te nemen, zowel via de Hollandse Maatschappij voor Wetenschappen, de KNAW, FOM als STW. Ook binnen de TU/e heb ik mijn steentje proberen bij te dragen als lid van de Commissie van Beroep voor de Examens, de Cum laude Commissie en de Centrale Toelatingscommissie, en ook als coördinator bij de 3TU-onderzoeksvisitatie Werktuigbouwkunde, als waarnemend opleidingsdirecteur en als vicedecaan.

Dankwoord

Nu we bij het einde van dit afscheidscollege zijn aangekomen, wil ik een aantal mensen specifiek bedanken. Met hen dank ik al die anderen die op een soortgelijke wijze met mij hebben samengewerkt.

Toen ik in 1990 tot hoogleraar werd benoemd, had de sollicitatiecommissie een aantal verwachtingen. Zo hoopte ze dat de samenwerking met de stromingsleergroepen van de faculteit Technische Natuurkunde (TN) veel beter zou worden dan in de periode daaraan voorafgaand het geval was. Ik kan niet anders dan zeggen dat de samenwerking met Gertjan van Heijst, die een jaar eerder was benoemd, en Rini van Dongen voorbeeldig is gebleken. Vanaf het begin hebben Gertjan en ik nauw samengewerkt op onderzoek- en onderwijsgebied. Daar is o.a. het keuzevak Turbulente Stromingsverschijnselen uit voortgekomen. Ook bij meetapparatuurontwikkeling, technische ondersteuning en promoties hebben we elkaar steeds gevonden. Zijn inzet en belangstelling voor het wel en wee van de faculteit Werktuigbouwkunde heb ik erg gewaardeerd. De contacten met Rini zijn vanaf mijn afstudeerwerk goed geweest. In de biologische stromingsleer vormden we een gouden duo, met een grote output als gevolg. Met de komst van David Smeulders in onze faculteit wordt zijn werk deels voortgezet, niet alleen in wetenschappelijke zin maar ook in de manier waarop men een groep leidt. Ik ben dan ook erg blij dat hij de leiding van de groep Energie Technologie van mij overneemt.

Dan mijn mede-BAP'ers, Bert en Philip, sinds kort aangevuld met Harold en David. Wij hebben al die jaren samen opgetrokken, hoe verschillend we ook zijn. Gemeenschappelijk zijn we in ons streven naar een goede werksfeer in onze groepen. Het gezamenlijke TFE-lab, de gezamenlijke onderwijsinspanningen en de gezamenlijk gedeelde technische en administratieve ondersteuning zijn daar uitingvormen van. Als de vergadermaandag weer achter de rug was en ik dinsdagmorgen bij het TFE-colloquium en de aansluitende TFE-bijeenkomst zat, had ik vaak het gevoel weer thuis te zijn.

Tot slot wil ik de volgende personen in het bijzonder bedanken: Camilo, Rick, Rian en Frits, die van het begin af aan met mij de groep vorm hebben gegeven. Michel, Arjan en Silvia, die mijn scoop aanzienlijk hebben verbreed. En de

ondersteunende staf, Frank, Henri, Linda en Paul, de vele promovendi en postdocs en alle andere leden van Energie Technologie en Thermo-Fluids Engineering (TFE), die mij telkens weer laten ervaren wat een voorrecht het is om samen te kunnen optrekken.

Gelukkig is mijn thuisfront uitermate stabiel en heb ik bij hen sinds het tweede jaar van mijn studietijd rust en steun gevonden. Veel meer dan ik hier wil zeggen, ben ik hen daar dankbaar voor.

Dames en heren, we zijn aangekomen bij het einde van het afscheidscollege. Dat betekent niet dat het ook een afscheid is van u allen. Ik ben nu zo'n 40 jaar met u opgelopen en zal dat nog een viertal jaren op de TU/e blijven doen. Wel steeds in mindere mate, totdat we uiteindelijk ieder onze eigen weg vervolgen. Ik wens u allen en de faculteit Werktuigbouwkunde in het bijzonder een goede toekomst toe.

Ik heb gezegd.

Verwijzingen

1. http://www.claymath.org/millennium/Navier-Stokes_Equations/
2. http://nl.wikipedia.org/wiki/John_William_Strutt;
<http://www.potto.org/gasDynamics/node56.html>
3. Pijush K. Kundu: Fluid Mechanics, Chapter 11: Instability, Academic Press, 1990
4. Jurgen de Hart, Fluid-Structure Interaction in the Aortic Heart Valve, PhD-thesis TU Eindhoven, 2002
5. Milenko Jovanovic , Film cooling through imperfect holes, PhD-thesis TU Eindhoven, 2006
6. Rene Kieft, Mixed convection behind a heated cylinder, PhD-thesis TU Eindhoven, 2000
7. Maoshen Ren, 3D flow transition behind a heated cylinder, PhD-thesis TU Eindhoven, 2005
8. Jeroen Mans, Streak development and breakdown during bypass transition, PhD-thesis TU Eindhoven, 2007
9. Rob Schook, Bypass transition experiments in subsonic boundary layers., PhD-thesis TU Eindhoven, 2000
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds
11. Milton Van Dyke: An Album of Fluid Motion (10th ed.) Stanford: Parabolic press, 1982
12. Jos Sillekens (†), Laminar mixed convection in ducts, PhD-thesis TU Eindhoven, 1995
13. Zhipeng Liu et al: Heat-transfer enhancement in AC electro-osmotic micro-flows, Proc. Eurotherm 2012
14. Douwe de Vries, Design of a photovoltaic/thermal combi-panel, PhD-thesis TU Eindhoven, 1998
15. German Aerospace Center (DLR), Institute of für Technische Thermodynamik, Stuttgart, 2009
16. Ilhan Yildirim, Transition of wire-disturbed cylinder wake flow, PhD-thesis TU Eindhoven, 2011
17. Joy Klinkenberg, Stability analysis of channel flow laden with small particles, Thesis Licentiatexamen KTH Stockholm, 2011

Curriculum vitae

Prof.dr.ir. Anton van Steenhoven is sinds september 1990 voltijdhoogleraar Werktuigkundige Energie- en Procestechologie bij de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).

Anton van Steenhoven (1951) studeerde Technische Natuurkunde aan de TU/e, waar hij in 1979 ook promoveerde op de stroming rondom de aortaklep. Een gedeelte van zijn promotieonderzoek bij de faculteit Werktuigbouwkunde voerde hij uit aan de Universiteit Maastricht. Na zijn promotie volgden aanstellingen bij verschillende vakgroepen in de faculteit Werktuigbouwkunde, waarna hij in 1990 tot hoogleraar werd benoemd in de sectie Energie Technologie. Onderzoeks-aandachtsgebieden betreffen warmteoverdracht en transitiestromingen, vervuiling van warmtewisselaars, duurzame energiesystemen en warmtetransport in het menselijk lichaam. In 2003 volgde een sabbatical bij het National Institute of Advanced Industrial Science and Technology in Tsukuba, Japan. Sindsdien is het onderzoeksveld uitgebreid naar warmtetransport in systemen waarvoor de continuümsbenadering niet meer geldt. Onderwijsbijdragen behelsden o.a. thermodynamica en warmteoverdracht in de bachelorfase en het meehelpen voorbereiden van de masteropleiding Sustainable Energy Technology. In diverse functies binnen de faculteit en universiteit droeg hij bestuurlijke verantwoordelijkheid. Daarnaast was hij programmaleider binnen FOM, is hij coördinator binnen het ADEM-programma en als lid van de Koninklijke Hollandse Maatschappij der Wetenschappen betrokken bij veel prijsjury's. In internationaal verband is hij voorzitter van het EURO THERM Committee en bestuurslid bij het International Centre for Heat and Mass Transfer. Ten slotte was hij bestuurlijk actief binnen ERCOFTAC en vertegenwoordigde hij Nederland bij de assemblees van IUTAM en IHTC.

Colofon**Productie**

Communicatie Expertise
Centrum TU/e

Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp

Grefo Prepress,
Sint-Oedenrode

Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-3181-3
NUR 978

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

Bezoekadres

Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven

Postadres

Postbus 513
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11
www.tue.nl



Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology