TU Delft

Delft University of Technology

De gloeidraad anemometer

Delfos, Rene

Publication date
2017

Document Version
Final published version

Published in
175 jaar TU Delft

Citation (APA)
Delfos, R. (2017). De gloeidraad anemometer. In P. T. L. M. van Woerkom, W. Ankersmit, R. Hagman, H. G. Heijmans, G. J. Olsder, & G. van de Schootbrugge (Eds.), *175 jaar TU Delft: Erfgoed in 33 verhalen* (pp. 173-177). Histechnica.

Important note
To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy
Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

This work is downloaded from Delft University of Technology.
For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to a maximum of 10.

TU Delft
175 jaar TU Delft
Erfgoed in 33 verhalen
8
5
26
25
23
29
30
20

De gloeidraad anemometer

R. Delfos

Inleiding

Stromingsleer is de naam van het vakgebied dat 'stromende media' beschrijft. Dat medium kan lucht of water zijn, maar ook olie, mayonaise, of lucht-watermengsels. Als we het vakgebied wat ruimer nemen dan stromen zand- of suikerkorrels ook. Kortom, alles stroomt, of zoals Heraclitus het rond 500 vóór Christus verwoordde: 'Panta Rhei'. En dat is de naam van het dispuut voor studenten van het Laboratorium voor Aëro- en Hydrodynamica van de TU Delft, naar waar ik u wil meenemen.

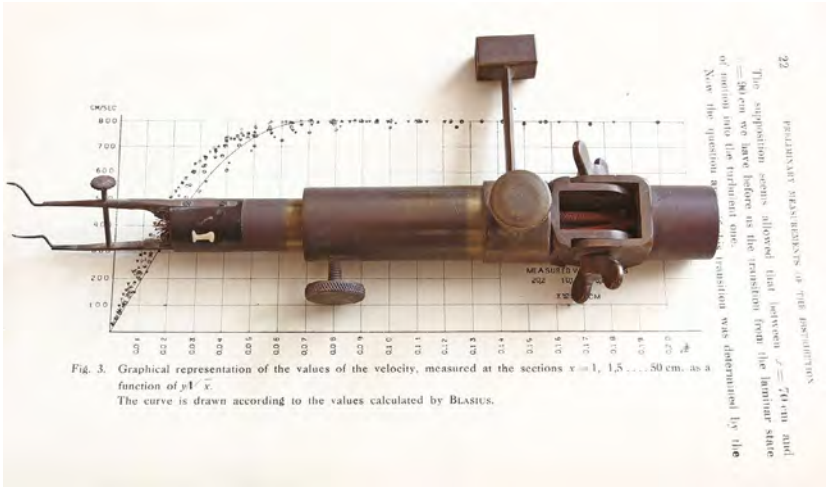
In 1918 werd het Laboratorium opgericht als onderdeel van de toenmalige Afdeling Werktuigbouwkunde en Scheepsbouwkunde van de Technische Hoogeschool te Delft. Het lab kwam onder leiding van Johannes Martinus (Jan) Burgers, de eerste Nederlandse hoogleraar specifiek op het vakgebied Stromingsleer. Burgers en zijn verdienste voor wetenschap en maatschappij zijn uitgebreid beschreven in [2,4,5]. Burgers was onder meer mede-grondlegger van de International Union for Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM) en is sinds 1991 naamgever aan de nationale Onderzoeksschool voor Stromingsleer, het JM Burgerscentrum.

De gloeidraad op de foto

Burgers – zelf geen ingenieur – zag het grote belang in van experimenteel onderzoek en zag het als zijn taak naast ingenieurstoepassingen toch vooral om fundamentele theorievorming en experimenteel onderzoek hand in hand te laten gaan. En dan komen we bij de gloeidraad. Beroemd is de schets van Leonardo da Vinci van de stroming uit een sluisgat, waarin hij nauwgezet laat zien en in woorden beschrijft dat een stroming kan opbreken in wervelende structuren van allerlei grootte. Bijna 400 jaar later komen we in 1883 bij Osborn Reynolds, die in een stroming van water door een buis middels injectie van inkt liet zien dat de stroming bij lage stroomsnelheden 'laminair' (mooi gelaagd) was, maar bij hogere snelheden 'turbulent' (wervelend) werd. Met een simpele meting liet hij zien dat in het turbulente regime de weerstand die de stroming in die buis ondervond niet-lineair verliep met de stroomsnelheid. De huidige Werktuigbouwkundestudenten mogen hetzelfde experiment overigens nog steeds doen als deel van hun tweedejaarspracticum.

Het kwantificeren van die turbulente stroming, daar was het Burgers om te doen. Samen met zijn hoofdmedewerker B.G. van der Hegge-Zijnen werkte hij aan de (verdere) ontwikkeling van de gloeidraadanemometer – in 1914 beschreven door L.V. King (zie [6]) – om toe te passen bij 'lokale' snelheidsmetingen. Een van de allereerste Delftse exemplaren uit 1921 is hier afgebeeld (zie figuur). Het meetprincipe is relatief simpel: een dunne metaaldraad (ook toen al van platina gemaakt!) wordt door

een constante elektrische stroom vanwege z'n eigen elektrische weerstand verwarmd. De draad wordt tegelijkertijd gekoeld door het langsstromende medium; waarbij geldt hoe sneller de stroming, hoe sterker de koeling. Omdat de elektrische weerstand van de metaaldraad varieert met de temperatuur van de draad kan door meting van de elektrische spanning over de draad de weerstand en zodoende – na kalibratie van het signaal – de stroomsnelheid bepaald worden. Het unieke van dit instrument ten opzichte van klassiekere stromingsinstrumenten – waaronder als bekendste de Pitot-buis – is dat het dunne draadje erg klein kan zijn – dus op kleine ruimtelijke schaal kan meten, en dat het vanwege z'n eigen geringe warmtecapaciteit heel snel reageert op snelheidsvariaties, en zodoende ook op kleine tijdsschaal kan meten. Burgers' metingen aan intermittentie in grenslaagstromingen (de stroming gaat niet eenvoudigweg over van laminair naar turbulent, maar doet dat op een bijzonder complexe wijze, waarbij de stroming een deel van de tijd laminair, een deel turbulent is) zijn wereldwijd leidend geweest voor zowel grenslaag onderzoek als voor veel andere intermitterende fysische processen.



Figuur 1 | De gloeidraad in een robuuste houder. De stelschroef net vóór het draadeinde is er om de – verwarmd sterk uitgezette – draad netjes recht te trekken.

Ontwikkelingen

Met deze gloeidraad probe was de meetmethode zeker niet 'af'. Een aantal lijnen daarin is:

Registratie

In de beginjaren was met name het vastleggen van het signaal problematisch. Waar een tijdsgemiddelde of eventueel een standaarddeviatie van een grootheid nog met een galvanometer te bepalen is, wordt het vastleggen van een (snel) fluctuerend signaal veel lastiger. In honderd jaar is er veel veranderd; van het fotograferen van een oscilloscoop-signaal, via penschrijvers (in beide gevallen werd de signaalanalyse wellicht uitgevoerd met de mechanische Fourier analyser in het Laboratorium)

naar uiteindelijk pas vanaf de tachtiger jaren van de vorige eeuw het daadwerkelijk beschikbaar komen van Analoog-Digitaal-converters waarmee het signaal op een relevante frequentie (al snel boven de 10 kHz) bemonsterd kan worden – en de computer eenvoudig een heel spectrum berekent van het signaal.

Constructie van probe en draad

Materiaalkundige ontwikkelingen zijn enorm van belang geweest voor het verbeteren van de probes. Bij de eerste exemplaren zitten de metalen componenten nog met ebonieten of porseleinen blokjes als stevige maar isolerende elementen aan elkaar. Bakeliet en later andere kunststoffen gaven nieuwe mogelijkheden voor veel fijnere bewerkingen en constructie. Omdat de draden nou eenmaal vaker kapot gaan dan de rest van de probe werd er al snel overgeschakeld op een systeem van een mechanisch sterke probehouder voor montage met de buitenwereld en kabels naar de meetbrug, en een nog altijd relatief fragiele maar snel verwisselbare insteekprobe voor de laatste paar centimeters richting de uiteindelijke draad of draden. Op één van de foto's ziet u een in het Laboratorium vervaardigde kruisdraadprobe met twee draden. In latere draden werd de dunne (moderne 'standaard' draden zijn nog maar zo'n 10 micrometer dik) elektrolytisch verdikt met een laagje goud om zodoende het windgevoelige stukje draad terug te brengen tot – typisch – nog maar 1 of 0.5 mm lengte. In de zeventiger en tachtiger jaren had het Laboratorium naast een gewone werkplaats een eigen instrumentmakerij voor al het onontbeerlijke materieel 'kleiner dan 2 mm'. Ook de industrie liet zich niet onbetuigd. Diverse op stromingsleer gespecialiseerde bedrijven hebben ontwikkeling, productie en standaardisatie op zich genomen. Ook de binnen het Laboratorium gebruikte probes, houders en meetbruggen worden tegenwoordig gewoon gekocht.

Figuur 2 | Kruisdraadprobe uit de jaren '60.

Figuur 3 | De laatste (vierdraads-) probe van het Laboratorium.

Meetprincipe

De eerste draden zoals boven beschreven werden gebruikt in een 'Constant Current-Anemometer' (CCA); de elektronica, een (zeer eenvoudige) meetbrug, stuurde onafhankelijk van de weerstand een constante stroom door de draad. Niet alleen brandden de draden gemakkelijk door als de windsnelheid (dus de koeling) te laag werd (de naam gloeidraad is niet toevallig gekozen), maar belangrijker is de nog altijd beperkte frequentierespons tot een paar honderd Hz. Met de door M. Ziegler in de veertiger

en vijftiger jaren ontwikkelde 'Constant Temperature Anemometer' (CTA) werd in een feedback-lus juist de elektrische weerstand – dus de temperatuur – van de draad constant gehouden door de elektrische stroom te regelen en die te meten. Doordat de thermische inertie nu niet meer begrenzend is, wordt de frequentierespons veel hoger, en is 20kHz of hoger goed haalbaar. Dit was ook nodig, want theoretisch werk door Kolmogorov in 1941 (nu meestal kortweg K41-theorie genoemd) had inmiddels laten zien hóe klein die turbulentie wel niet kon worden.

Snelheidsmeting

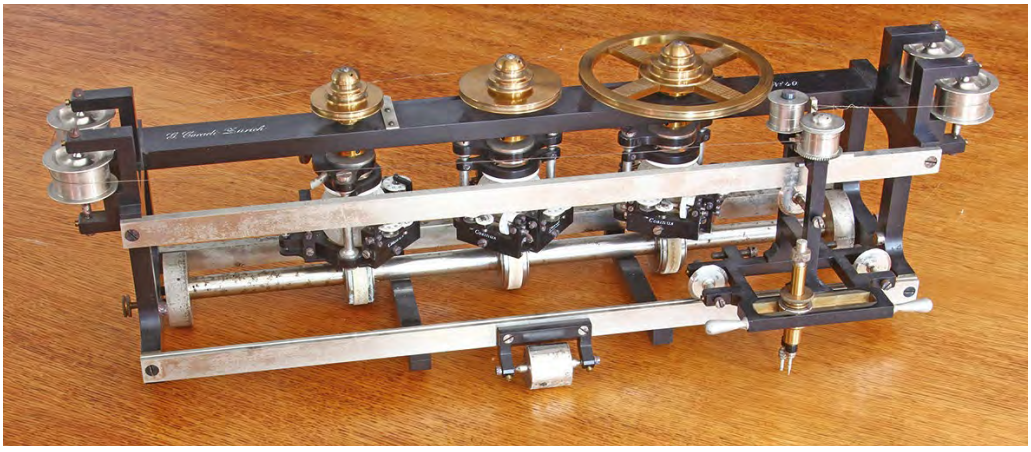
Een enkele gloeidraad is met name gevoelig voor de windsnelheid loodrecht op de draadrichting, maar kan verder geen onderscheid maken in de richting waaruit die wind komt. Alleen bij lage turbulentie-intensiteiten kan je bij benadering de fluctuaties in de richting van de gemiddelde stroming meten, maar de andere componenten geheel niet. Dat oplossend vermogen kan met meerdere draden in verschillende oriëntaties verbeterd worden, en met name de kruisdraad bestaande uit twee draden is erg populair geworden. Hiermee kan namelijk niet alleen één component loodrecht op de gemiddelde wind gemeten worden, maar ook de zogenaamde Reynolds-spanning, 'het gemiddelde product van twee fluctuerende componenten', of minder technisch de wrijving die de turbulentie ter plekke in de stroming veroorzaakt. Diverse configuraties van meerdraadsprobes zijn er ontwikkeld (2- en 3-draadsprobes staan gewoon in de catalogus van leveranciers) met elk een toepassing voor het meten van een specifieke turbulentiegrootheid. Ook de signaalanalyse (kalibreren en ontrafelen in componenten) is goed beschreven [6].

De laatste gloeidraad

Veel technieken zijn geperfectioneerd tegen de tijd dat ze achterhaald zijn; de grammofoon met diamanten naald en tangentiaal-arm, of de typemachine met Daisywheel en tweekleuren- en correctielint. De laatste in Delft ontwikkelde probe – in de laatste foto – is een geminiaturiseerde vierdraadsprobe ontwikkeld tot 1994, waarbij in een 1,5 mm stalen capillair acht naaldvormig geëtste wolfraamdraden elk in een teflon isolatiemantel middels vier stuks opgelaste draden (en daar hoort nog meer hightech vervaardiging bij) in principe op één punt alle drie snelheidscomponenten kunnen meten met een respons van zo'n 50 kHz. In de ultieme uitvoering van deze probe worden er vijf van deze sub-probes in een kruis gemonteerd, waardoor - met 20 draden - ook nog eens álle ruimtelijke eerste en tweede afgeleiden van de snelheid gemeten worden. Het geheel omringd door nog vier temperatuur-sensordraden. En dat is pas voldoende om in atmosferische turbulentie écht tot op de kleinste turbulentieschaal te meten. Een machtig instrument voor het fundamentele turbulentieonderzoek. De enorme complexiteit van deze probe (zowel de kalibratie als de mechanische stabiliteit; van de 24 draden was er altijd wel ééntje onbetrouwbaar) is dusdanig dat het slechts in een enkele geval tot een korte meting is gekomen [3].

Sinds eind jaren tachtig wordt er in het Laboratorium gewerkt aan de ontwikkeling van Particle Image Velocimetry (PIV). Met behulp van een laser en een camera wordt van een tweedimensionaal 'plakje' lucht of water meteen het hele tweedimensionale snelheidsveld gemeten. Met meerdere camera's worden óf alle drie snelheidscomponenten in een plakje (Stereo-PIV), of zelfs in een heel ruimtelijk

volume (Tomo-PIV) vastgelegd – iets waar we ten tijde van die 24-draads probe nog nauwelijks van durfden dromen. Op het moment van schrijven doet ook de industrie al snel 'even een PIV-meting' om een complexe stroming te analyseren, want net als bij de gloeidraad is een groot deel van het proces door gespecialiseerde bedrijven overgenomen. Techniek en geschiedenis van PIV zijn ruim beschreven in [1].



Figuur 4 | Mechanische Fourier-analyser uit 1936 om een complex signaal in (hier maximaal negen) sinussen en cosinussen te ontbinden.

Figuur 5 | Portret van de befaamde vloeistof mechanicus prof.dr.ir. J.M. Burgers. Hoogleraar al op 23 -jarige leeftijd. Op deze foto 29 jaar.