

ONZICHTBARE STROMINGEN ZICHTBAAR MAKEN



Figuur 1. Een kuch zichtbaar gemaakt door middel van Schlieren-visualisatie. Met dank aan Gary Settles.

De meeste stromingen die we in het dagelijks leven tegenkomen zijn niet waarneembaar. Immers, lucht en water zijn transparant. In een vliegtuig op grote hoogte kijkt u door een raampje naar beneden en u ziet slechts de grond beneden traag bewegen. Maar realiseert u zich dat een paar centimeter van u verwijderd, aan de buitenzijde van het raampje, lucht beweegt met een snelheid van 900 kilometer per uur? En dat dankzij die onzichtbare bewegende lucht het vliegtuig van zo'n 100.000 kilo in de lucht kan blijven?

Stromende fluïda zoals gassen en vloeistoffen zijn alomtegenwoordig in de natuur en technologie; in bijna elk fysisch proces of technisch systeem komen ze voor, al dan niet samen met vaste objecten of organismen, zoals bijvoorbeeld in de oceaan. Lucht en water, de belangrijkste fluïda, zijn transparant zodat we ons niet bewust zijn van de complexiteit van de stromingen die daarin kunnen optreden. In de jaren die net achter ons liggen was het zeer relevant om erachter te komen hoe het SARS-CoV-2-virus werd verspreid en waren er belangrijke vragen over het nut van beschermende gezichtsmaskers en luchtcirculatie in gebouwen.

De eerste stap om bewegingen in fluïda te begrijpen, is ze zichtbaar te maken en zo de interactie met de omgeving te laten zien. Een voorbeeld is een Schlieren-visualisatie [1] van een kuch, afgebeeld in figuur 1, die de omvang van de stroming bij hoesten en niezen weergeeft en ons bewust maakt van het nut van hoesten of niezen in de binnenkant van de elleboog of het gebruik van een gezichtsmasker om verspreiding van virussen en bacteriën in de lucht te voorkomen. Klassieke meetmethoden, zoals de Pitotbuis, hitte-draad-anemometrie en laser-dopplersnelheidsmetingen, geven informatie over de snelheid in één punt in de stroming als functie van de tijd en zijn daarom niet in staat om de ruimtelijke verdeling van het snelheidsveld, zoals in de afgebeelde kuch, te kunnen meten.

Particle image velocimetry

Voor modern experimenteel onder-

zoek naar turbulentie en complexe stromingen wordt gebruikgemaakt van *particle image velocimetry*, bekend onder de afkorting PIV [2]. Het principe van PIV is weergegeven in figuur 2, waarmee kwantitatieve informatie uit beeldopnamen van stromingen kan worden bepaald. De methode maakt gebruik van kleine deeltjes, meestal slechts een à twee micrometer in lucht en tien tot vijftig micrometer groot in water, die als tracers in het stromende gas of vloeistof met de stroming worden meegevoerd en de beweging van het fluïdum nauwkeurig volgen [2]. De afmeting en concentratie van deze deeltjes is zo laag dat de stroming en eigenschappen van het fluïdum onveranderd blijven; ook bevinden zich geen instrumenten of obstakels in de stroming, zodat PIV als niet-intrusieve meetmethode kan worden beschouwd. De tracerdeeltjes zijn in het algemeen niet zichtbaar met het blote oog, maar wanneer ze worden verlicht door middel van een pulserende lichtbron, zoals Nd:YAG- of Nd:YLF-lasers, kunnen ze worden vastgelegd op digitale CCD- of CMOS-camera's. Uit twee opeenvolgende opnames, gescheiden door een kort tijdsinterval van in het algemeen enkele milliseconden, wordt de verplaatsing van deze tracerdeeltjes bepaald, en de snelheid volgt door de verplaatsing te delen door het tijdsinterval tussen de opnames. Dit maakt het mogelijk om meer dan enkele tienduizenden gelijktijdige metingen van het instantane snelheidsveld te doen. Oorspronkelijk werd de stroming gemeten door gebruik te maken van vlakke dwarsdoorsneden, maar moderne implementaties

van PIV gebruiken een tomografische reconstructie van ten minste vier camerabeelden om in de tijd opgeloste volumetrische metingen te verkrijgen [2].

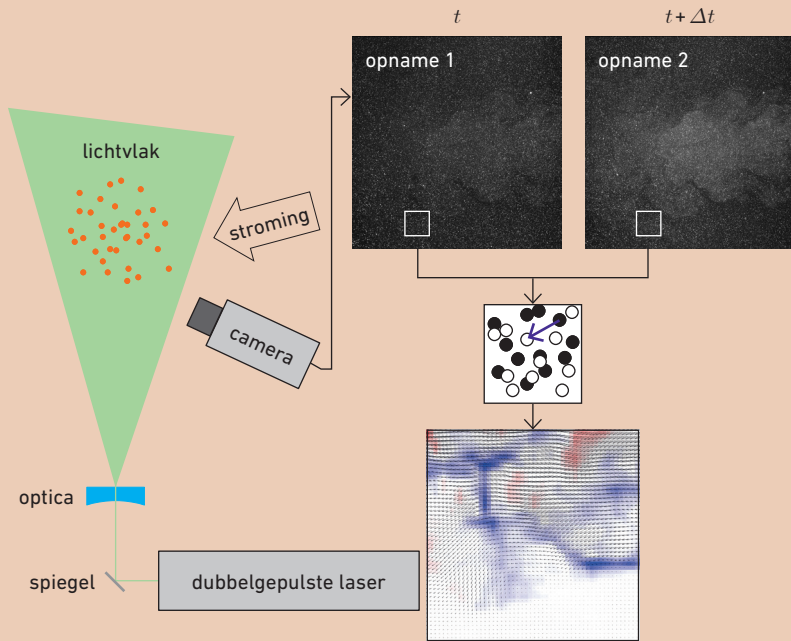
De beweging van de tracerdeeltjes kan worden bepaald met een nauwkeurigheid van ongeveer 0,1 pixel. Dat betekent in de praktijk dat bij een werkafstand van 30 - 40 cm, verplaatsingen van 4 μm kunnen worden gemeten; dat is ongeveer gelijk aan 1/15-de van de dikte van een haar. Ik daag u uit om een dergelijke kleine verplaatsing met het oog waar te nemen.

Vorticititeit

Uit de met PIV gemeten snelheidsvelden kunnen de afzonderlijke wervelingen in de stroming worden bepaald. De lokale werveling, $\omega = \nabla \times u(x, t)$, wordt vorticititeit genoemd; deze grootheid is gerelateerd aan de lokale rotatiesnelheid van het gas of de vloeistof.

PIV is vooralsnog de enige algemene methode waarmee het mogelijk is om vorticititeit te meten. Het meten van vorticititeit is belangrijk omdat op die manier kwantitatieve informatie kan worden verkregen over zogenoemde coherente structuren in turbulente stromingen. Deze coherente structuren zijn gerelateerd aan de productie, het transport en de dissipatie van energie in turbulentie [3]. Het is dan ook geen verrassing dat PIV de meest gebruikte experimentele techniek is in de moderne experimentele stromingsleer [4].

Meestal wordt PIV toegepast in laboratoriumonderzoek, zoals in windtunnels, waterkanalen en sleeptanks. Maar door het zeer



Figuur 2. Het principe van *particle image velocimetry* (PIV): een stroming met daarin kleine deeltjes (tracers) wordt belicht in een vlak of volume met een dubbel-gepulste laser, met een tijd Δt tussen de opnamen. Een digitale camera registreert de belichte deeltjes, met een vergroting M_0 . De twee opnamen worden opgedeeld in kleinere gebiedjes, waarin door middel van een correlatie de verplaatsing ΔX van het door de deeltjes afgebeelde patroon wordt bepaald. De lokale snelheid $u(x,t)$ volgt uit: $u(x,t) = M_0^{-1} \Delta X / \Delta t$. Door dit te herhalen over het hele beeld wordt het snelheidsveld bepaald (zwarte pijlen), waaruit ook de component van de vorticiiteit loodrecht op het beeldvlak kan worden bepaald (rode en blauwe achtergrond). Zie: [2].

eenvoudige meetprincipe kan het vrijwel overal worden toegepast en op heel diverse schalen, variërend van micrometers, zoals de stroming rond kleine organismen en in kleine bloedvaten [5], tot planetaire schalen, zoals de bewegingen van wolken in de atmosfeer van Jupiter [6].

PIV geeft experimentele informatie over stromingen die complementair is aan resultaten van numerieke berekeningen en simulaties; de berekening van turbulente stromingen vereist ofwel een turbulentiemodel, dat meestal experimenteel moet worden gevalideerd of, in het geval van directe simulatie, beperkt is in geometrie en stromingsconditie [3]. Hoewel veel stromingsproblemen kunnen worden onderzocht met behulp van computers, die de bewegingsvergelijkingen numeriek oplossen, is experimenteel onderzoek ver-

eist voor niet-standaardproblemen en fundamenteel onderzoek, zoals het geval is voor turbulentie en complexe stromingen.

Aan de hand van enkele persoonlijke voorbeelden zal ik laten zien wat de rol van PIV is geweest in het verkrijgen van nieuwe inzichten in turbulentie en complexe stromingen: de transitie naar turbulentie in een laminaire buisstroming, het grensvlak tussen turbulente en niet-turbulente stroming, en de stroming door een kloppend embryonaal hart.

Turbulentie

Voor turbulentie bestaat nog geen alomvattende theorie, wat met name het volledig begrijpen en voorspellen van turbulente stromingen in de weg staat. Het is een van de onopgeloste Millennium Prize Problems; ook in Richard Feynmans beroemde lezingreeks wordt vermeld dat

turbulentie een onopgelost probleem in de klassieke mechanica is gebleven. Bovendien behandelen de meeste leerboeken geïdealiseerde stromingsgeometrieën, zoals perfect gladde wanden en oneindig lange rechte pijpen, kanalen en cilinders, terwijl in de praktijk wanden nooit glad zijn en objecten veel complexer en overduidelijk niet ideaal zijn.

Een lang bestaand probleem in de stromingsleer is het ontstaan van turbulentie in een buisstroming. Een wiskundige lineaire stabiliteitsanalyse leidt tot de conclusie dat een laminaire buisstroming altijd stabiel is voor kleine verstoringen, ongeacht de snelheid van de buisstroming. Maar in vrijwel alle leerboeken staat dat een buisstroming overgaat van een laminaire naar een turbulente toestand bij een Reynoldsgetal tussen de 2000 en 2300. Het Reynoldsgetal is hierbij gedefinieerd als: $R_e = UD/\nu$, waarbij U de gemiddelde stroomsnelheid is, D de buisdiameter en ν de kinematische viscositeit van het gas of de vloeistof in de buis. Het is mogelijk om in speciale laboratoriumopstellingen een buisstroming laminair te houden tot een Reynoldsgetal van 60.000. Dit lijkt op een paradox.

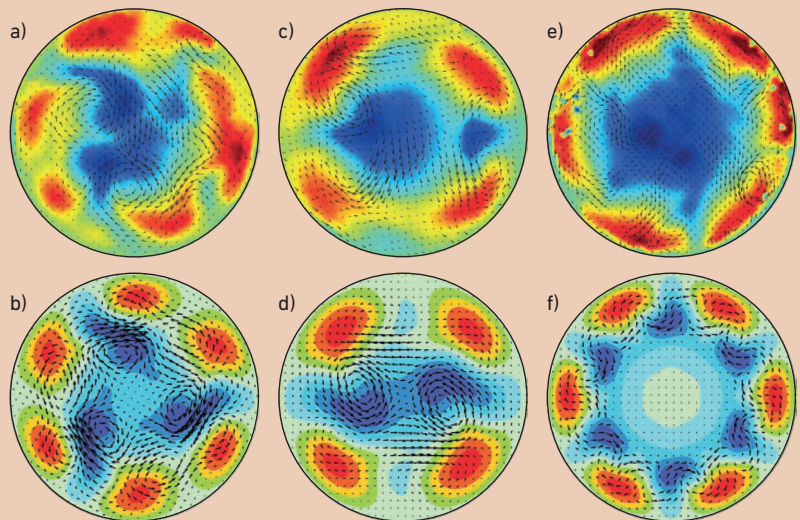
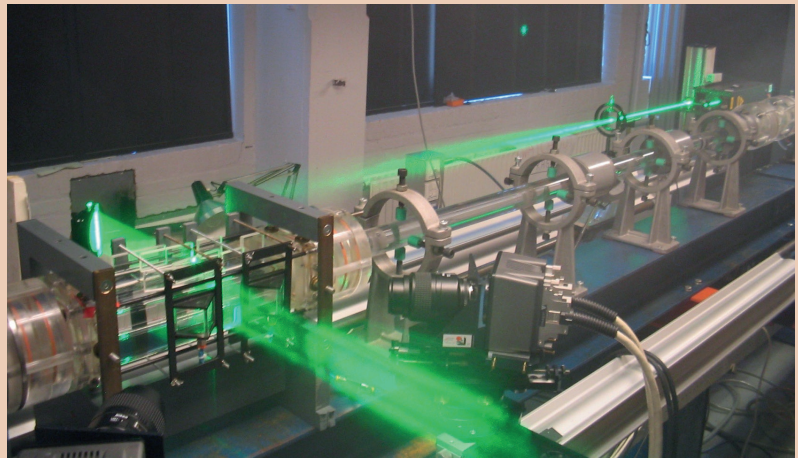
Echter, in 2003 waren er theoretische aanwijzingen voor nieuwe exacte oplossingen voor een buisstroming die anders waren dan het klassieke laminaire parabolische profiel, in de vorm van zogenoemde *traveling waves*, die een kenmerkende symmetrie vertonen [7]. Het experimentele bewijs voor het bestaan van deze structuren werd geleverd door nauwkeurige metingen met PIV. Om deze structuren te kunnen waarnemen, is het noodzakelijk om alle drie de componenten van de instantane snelheid in een vlak loodrecht op de as van de buis te kunnen meten. Hiervoor werden met behulp van twee onder een hoek van negentig graden geplaatste camera's de bewegingen gemeten in een vlak loodrecht op de aanstromende vloeistof in een buis, zie figuur 3. In deze stereoscopische

opnamen werden deze theoretisch voorspelde structuren inderdaad aangetoond [8]. Deze vondst was een belangrijke stap in het verklaren van de paradoxale stabiliteitseigenschappen van buisstromingen.

Happen of knabbelen?

Een ander al lang bestaand probleem bij het begrijpen van turbulente stromingen is het grensvlak tussen een turbulente stroming en haar niet-turbulente omgeving. Het zogenoemde turbulente/niet-turbulente grensvlak komt voor aan de randen van stapelwolken, aspluimen uit vulkanen, turbulente vlammen en sneeuwlawines, maar vaker zijn ze niet eens zichtbaar aanwezig. Wat opvalt is dat deze grensvlakken zeer scherp blijven terwijl turbulentie juist de eigenschap heeft menging te bevorderen, waardoor men zou verwachten dat deze grensvlakken een diffuus karakter hebben. Op deze grensvlakken wordt niet-turbulent fluidum in het turbulente gebied opgenomen, met als gevolg dat het turbulente gebied groeit. Dit proces wordt *entrainment* of invangen van niet-turbulent fluidum genoemd, maar het was niet duidelijk of dit een proces is dat op de schalen van de grote inertiaële wervels gebeurt, waarbij er grote 'happen' worden genomen (*engulfment*), of op die van de kleine visceuze wervels die met kleine happen (*nibbling*) de omringende vloeistof het turbulente gebied in trekken.

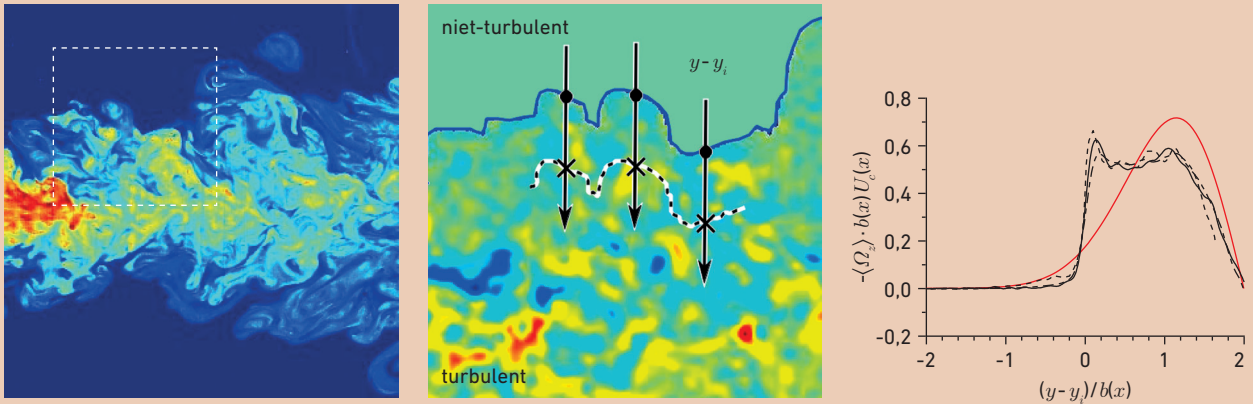
Figuur 4 toont de stroming van een turbulente straal, waarbij te zien is dat als gevolg van *entrainment* de turbulente straal stroomafwaarts in omvang toeneemt. Dit proces speelt een belangrijke rol bij menging, verbranding en verspreiding van luchtverontreiniging of rook, om er maar een paar te noemen. Maar het turbulente/niet-turbulente grensvlak is een uitdaging voor computersimulaties. Turbulentiemodellen zijn namelijk gebaseerd op de aanname dat turbulentie homogeen en isotroop is op kleine schaal, terwijl hieraan niet wordt voldaan op dit grensvlak, met als gevolg dat bere-



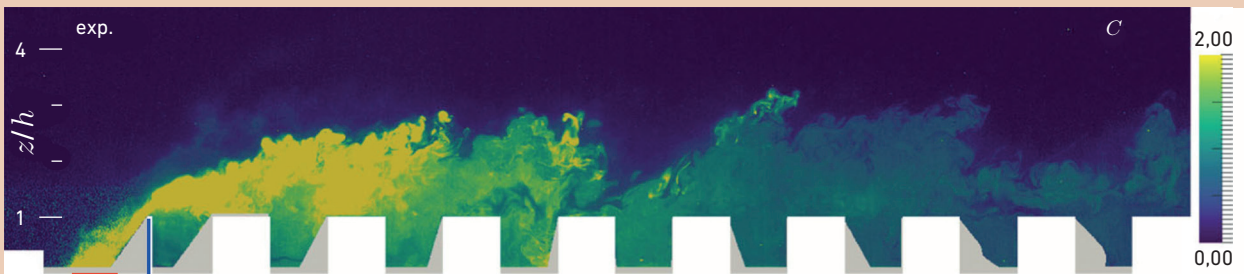
Figuur 3. Boven: stereoscopische PIV-opstelling voor het meten van buisstroming in een vlak loodrecht op de axiale richting. Onder: met PIV waargenomen (A,C,E) en theoretisch voorspelde (B,D,F) *travelling wave*-oplossingen, met respectievelijk drievoudige, tweevoudige en zesvoudige symmetrie, voor een instationaire stroming in een buis. De kleuren komen overeen met de snelheid in de axiale richting ten opzichte van het laminaire snelheidsprofiel (rood is positief; blauw is negatief) en de pijlen komen overeen met de snelheid in het vlak loodrecht op de axiale richting. Uit: [8].

keningen met behulp van turbulentiemodellen niet betrouwbaar zijn. Met behulp van PIV kunnen de processen op het grensvlak nauwkeurig worden onderzocht. Eerdere pogingen met traditionele meetmethoden gaven geen goede resultaten, omdat deze technieken zijn gebaseerd op vaste punten in de stroming. Daarmee is het niet goed mogelijk om de positie van het sterk gekronkelde grensvlak te bepalen. Met PIV is het mogelijk om in een enkele momentopname de hele

stroming te meten, in plaats van slechts in één punt, en kan het grensvlak over een groter domein worden vastgelegd. Door de turbulente vloeistof met een fluorescerende kleurstof te markeren is het mogelijk om turbulente vloeistof te scheiden van de omringende niet-turbulente vloeistof. Daarmee wordt ook het turbulente/niet-turbulente grensvlak vastgelegd en kan de stroming relatief ten opzichte van de positie van het grensvlak worden bepaald. Dit leverde een geheel



Figuur 4. Links: concentratie in een turbulente straal in een niet-turbulente omgeving. Midden: na detectie van het grensvlak (blauwe lijn) tussen het turbulente en niet-turbulente deel van de stroming wordt de vorticeit conditioneel gemiddeld ten opzichte van de positie y_i van het grensvlak. Rechts: het resultaat laat een scherpe sprong zien in de vorticeit op de positie van het grensvlak, terwijl een meting langs vaste punten een geleidelijke overgang laat zien (rode lijn). Uit: [9].



Figuur 5. Onderzoek aan een model voor het bestuderen van de verspreiding van verontreinigingen afkomstig van een snelweg (rood) achter een geluidswand (blauw) in een woonwijk (witte blokken). De stroming is van links naar rechts. De scherpe overgangen zijn duidelijk zichtbaar tussen gebieden met verschillende niveaus van turbulentie, elk met vrijwel uniforme concentratie. Uit: [10].



Figuur 6. Links: een opengewerkt kippenei onder de microscoop. Midden: microscoopbeeld van een kippenembryo met in het midden het primitieve hart (in blauwe cirkel). Rechts: met PIV gemeten snelheidsverdeling in het hart bij maximale dilatatie (0,2 mm). De hoogste snelheid (rode pijlen) is ongeveer 20 mm/s.

nieuwe manier op om de eigenschappen van de turbulentie en het grensvlak te bepalen. Conventionele meetmethoden met vaste posities laten een geleidelijke overgang laten zien van de turbulentie; het PIV-experiment toonde daarentegen een duidelijke sprong van vorticeiteit op de plaats van het grensvlak [9]. Dit kon vervolgens worden gekoppeld aan nibbling: het invangen van niet-turbulente vloeistof blijkt een viskeus proces te zijn dat op kleine schalen plaatsvindt.

Een belangrijke toepassing van dit type onderzoek ligt in de verspreiding van verontreinigingen in de bebouwde omgeving; verontreinigingen verspreiden zich dus niet gelijkmatig in een turbulente stroming, maar kunnen lokaal sterk variëren [10]; zie figuur 5. Hiermee moet dus rekening worden gehouden bij het bepalen van maximaal toelaatbare concentraties.

Hartslag

Een grote uitdaging is het gebruik van PIV in biologische organismen. In tegenstelling tot opstellingen in het laboratorium is het meetgebied niet altijd optisch toegankelijk en kan het toevoegen van kleine deeltjes aan de stroming mogelijk het te onderzoeken organisme verstoren. Voor biomedisch onderzoek aan hart- en vaatsystemen wordt vaak gebruikgemaakt van kippenembryo's. Ongeveer drie dagen na de bevruchting heeft zich een klein kloppend hart gevormd. Door de eischaal en wat vliezen te verwijderen kunnen het embryonale hart, minder dan 1 mm groot, en het ontwikkelde vaatsysteem onder een microscoop worden bekeken. Uit voorgaand onderzoek was gebleken dat een verstoring van de bloedsomloop in het vaatsysteem kan leiden tot afwijkingen in de ontwikkeling van het embryonale hart. Er was echter weinig bekend over de stroming in het hart zelf. In samenwerking met onderzoekers van het Leids Universitair Medisch Centrum en het Erasmus Medisch Centrum is PIV gebruikt om metingen uit te

voeren aan het kloppende hart van een kippenembryo. Er was sprake van verschillende uitdagingen. Een eerste uitdaging was om voldoende tracerdeeltjes in de bloedbaan te brengen. Het embryonale bloed bevat bloedcellen, maar die zijn nogal groot en de concentratie ervan varieert en is erg laag. Ook het omringende weefsel bemoeilijkt het maken van opnamen die geschikt zijn voor de beeldanalyse. De oplossing werd gevonden door gebruik te maken van liposomen; dit zijn kleine deeltjes van ongeveer 0,2 μm . Deze kunnen fluorescent worden gemaakt, zodat met behulp van optische filters alleen het fluorescente licht van de tracers via een microscoop wordt geregistreerd door de camera's. Ook werden de liposomen voorzien van een hydrofiele coating, zodat deze niet als lichaamsvreemde objecten werden gezien door het primitieve immuunsysteem. Nu konden alsnog metingen met PIV worden uitgevoerd die als niet-intrusief konden worden beschouwd, wat ook bleek uit het feit dat het hartritme van rond de 2,5 Hz voor injectie, tijdens de meting en na de meting onveranderd bleef.

Het resultaat van deze metingen [5] is te zien in figuur 6. Uit deze metingen is gebleken dat de grootste schuifspanningen van de stroming op de hartwand zich voordoen aan de binnenbocht. Dat was een verrassend resultaat, omdat de hoogste stroomsnelheden in gekromde kanalen zich doorgaans aan de buitenbocht voordoen, denk hierbij bijvoorbeeld aan bochten in rivieren. In dit geval geeft de combinatie van sterke kromming en het lage Reynoldsgetal aan dat de stroming juist aan de binnenkant harder stroomt. Dit kwam overigens ook overeen met de expressie van genen in dit deel van het hart die verantwoordelijk zijn voor de ontwikkeling van een embryonaal hart. Dit resultaat verklaarde ook waarom genen in cellen die gevoelig zijn voor de stromingsweerstand juist aan de binnenbocht van het embryonale hart worden geactiveerd; deze genen

sturen de verdere ontwikkeling van het embryonale hart.

Ten slotte

PIV is niet meer weg te denken uit het experimenteel onderzoek van turbulentie en complexe stromingen. In dit artikel staan slechts een paar voorbeelden waarbij PIV unieke resultaten heeft gegeven. Misschien bent u door het lezen van dit artikel nieuwsgierig geworden naar deze optische meetmethode of wilt u studenten of leerlingen laten kennismaken met kwantitatieve visualisatie van stromingen. Tegenwoordig zijn smartphones voorzien van hoogstaande camera's en beschikken ze over aanzienlijke rekenkracht. Er bestaat inmiddels een app waarmee eenvoudige PIV-metingen kunnen worden gedaan [11].

Jerry Westerweel studeerde technische natuurkunde aan de TU Delft en promoveerde in 1993. Daarna verbleef hij in Stanford en Caltech. Sinds 2005 leidt hij de sectie Stromingsleer van de TU Delft. Zijn onderzoeksinteresse ligt op het gebied van turbulentie en complexe stromingen.

J.Westerweel@tudelft.nl

REFERENTIES

- 1 G.S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques* (2001).
- 2 R.J. Adrian en J. Westerweel, *Particle Image Velocimetry* (2011)
- 3 F.T.M. Nieuwstadt, B.J. Boersma en J. Westerweel, *Turbulence - Introduction to Theory and Applications of Turbulent Flows* (2016)
- 4 J. Westerweel, G.E. Elsinga en R.J. Adrian, *Particle image velocimetry for complex and turbulent flows*. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **45**, 409-436 (2013).
- 5 P. Vennemann et al., *In vivo micro particle image velocimetry measurements of blood-plasma in the embryonic avia heart*. *J. Biomech.* **39**, 1191-1200 (2006).
- 6 P.T. Tokumar en P.E. Dimotakis, *Image correlation velocimetry*. *Exp. Fluids* **19**, 1-15 (1995).
- 7 H. Faisst en B. Eckhardt, *Traveling waves in pipe flow*. *Phys. Rev. Lett.* **91**, 224502 (2003).
- 8 B. Hof et al., *Experimental observation of nonlinear traveling waves in turbulent pipe flow*. *Science* **305**, 1594-1598 (2004).
- 9 J. Westerweel et al., *Mechanics of the turbulent/nonturbulent interface of a jet*. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 174501 (2005).
- 10 H.E. Eisma et al., *Effects of a fence on pollutant dispersion in a boundary layer exposed to a rural-to-urban transition*. *Boundary-Layer Meteorol.* **169**, 185-208 (2018).
- 11 C. Cierpka, R. Hain en N.A. Buchmann, *Flow visualization by mobile phone cameras*. *Exp. Fluids* **57**, 108 (2016).