

Fotonische snelheidsmeting in stromingen: Particle Image Velocimetry (PIV)

Léon van Dooren, TNO-TPD

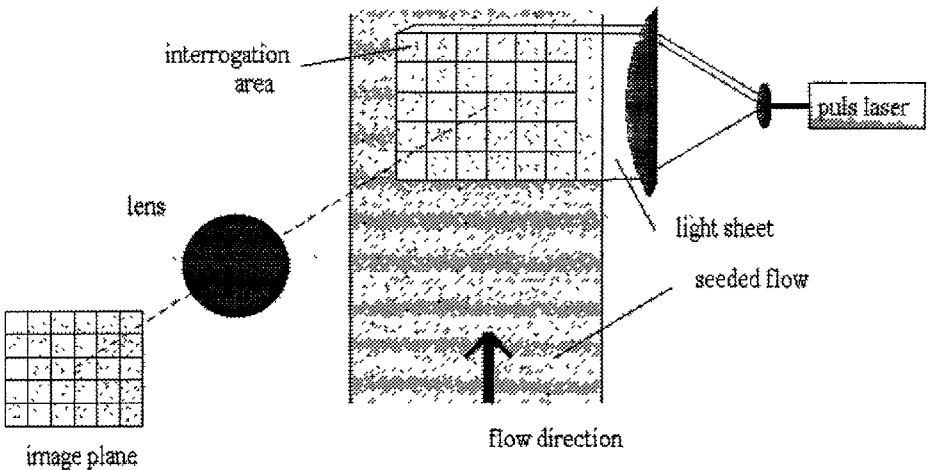
Inleiding

In het kader van het onderzoeksproject "3D-stromingen" bij de afdeling OIM (Optische Inspectie- & Meetsystemen) van TNO-TPD, worden technieken voor stromingsvisualisatie en snelheidsmeting onderzocht voor toepassing in stromingsinstallaties. Snelheidsmetingen in stromingen worden al tientallen jaren gebruikt om stromingen te karakteriseren. Traditionele technieken voor het uitvoeren van puntmetingen, zoals Laser Doppler Anemometrie en Hot Wire Anemometrie, hebben als nadeel dat voor een uitgebreide ruimtelijke karakterisering, de stroming punt voor punt in de tijd moet worden afgescand. Een techniek waarmee instantane ruimtelijke snelheidspatronen kunnen worden bepaald en die de laatste jaren sterk in de be-

langstelling staat, is Particle Image Velocimetry (PIV). In samenwerking met het laboratorium voor Aero & Hydrodynamica van de TU-Delft, waar men veel expertise met betrekking tot deze techniek heeft opgebouwd, zullen diverse toepassingsmogelijkheden die deze techniek biedt, worden bekeken. In het optisch laboratorium "MOOI" van TNO-TPD is een demonstratie-experiment opgezet, om het meetprincipe te laten zien. Dit artikel is bedoeld ter kennismaking met de techniek, waarbij het basisprincipe zal worden uitgelegd en enkele toepassingsmogelijkheden zullen worden verkend.

PIV-principe

Particle Image Velocimetry is een techniek waarmee in een doorsnijdend vlak van een

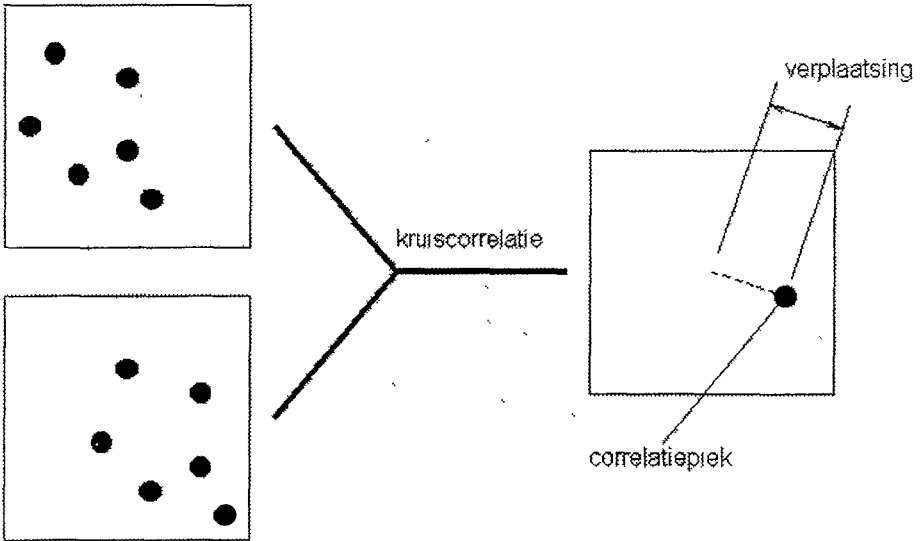


Figuur 1
Schematische PIV-setup.

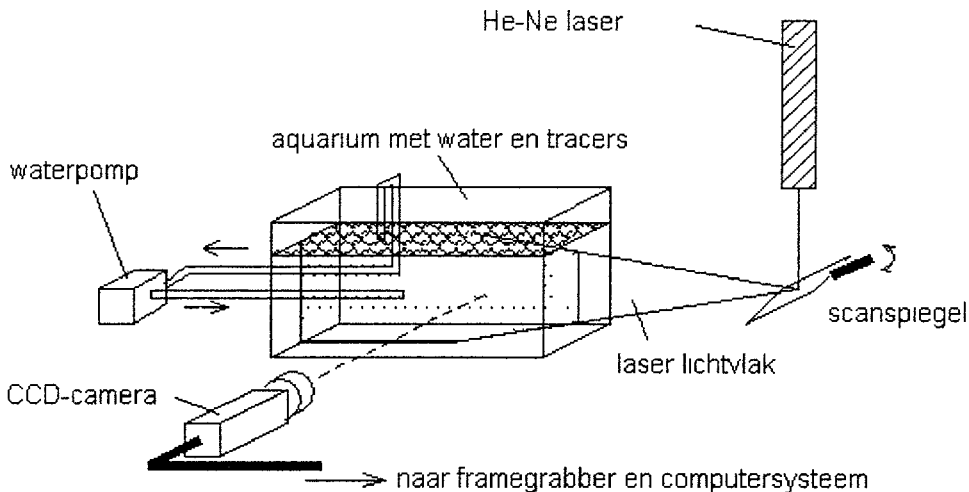
stroming de stroomsnelheidsverdeling op één tijdstip kan worden bepaald. De techniek is gebaseerd op het bepalen van de afstand die tracers (deeltjes) in de stroming afleggen in een bekend tijdsinterval, dat wordt gedefinieerd door twee lichtpulsen. Het meetvlak (volume) wordt bepaald door een laser-lichtvlak dat wordt afgebeeld met behulp van een camera loodrecht op het lichtvlak (zie Fig 1). Tracers in het lichtvlak zijn zichtbaar door verstrooiing aan de tracers in de richting van de camera. Hun oorspronkelijke positie is bepaald door de eerste lichtpuls; de tweede lichtpuls legt de positie na het tijdsinterval vast. De snelheid kan nu worden bepaald uit verplaatsing en tijdsinterval.

De verplaatsing wordt als volgt bepaald. Het meetvlak wordt opgedeeld in subvlakjes (Eng.: interrogation areas). In zo'n vlakje wordt de snelheidsvector vastgesteld door bepaling van de gemiddelde verplaatsing van een groep tracers in het vlakje. Deze gemiddelde verplaatsing kan door middel van auto- of kruiscorrelatie worden

bepaald. Bij bepaling via autocorrelatie worden de twee lichtpulsen in één beeld gevangen, waarna ieder subvlakje met van iedere tracer twee afbeeldingen, wordt gecorreleerd aan zijn verschoven evenbeeld. De verschuiving die de hoogste correlatiepiek oplevert, geeft de gemiddelde verplaatsingsvector van de tracers in het subvlakje. Omdat onbekend is welk van de twee beelden van de tracer het eerst werd afgebeeld, treedt bij autocorrelatie een onbepaaldheid van 180° in de richting van de snelheidsvector op. Bij kruiscorrelatie worden de twee tracerafbeeldingen in aparte beelden gevangen, waardoor deze onbepaaldheid niet optreedt. In Fig.2 is het beeld van een subvlakje, vóór en na verplaatsing van de tracers, en hun kruiscorrelatie weergegeven. Door voor alle subvlakjes het quotient van verplaatsingsvector en tijdsinterval te bepalen, ontstaat een snelheidsvectorplaatje van het meetvlak met een ruimtelijke resolutie die bepaald wordt door de grootte van de subvlakjes



Figuur 2
Bepaling van de verplaatsingsvector binnen een subvlakje



Figuur 3
Demonstratie-opstelling voor PIV

In Fig.3 is de demonstratie-opstelling weergegeven, bestaande uit een aquarium met water en tracers waarin via een pomp en een pijpje een stroming wordt gecreëerd. Deze stroming wordt doorsneden door een lichtvlak dat wordt aangebracht met behulp van een laser en een scannende spiegel. Tracers in het lichtvlak worden afgebeeld (per scan één maal) en opgenomen met een CCD-camera.

In Fig.4 is een dergelijk beeld weergegeven. Hierin zijn treintjes van tracerafbeeldingen zichtbaar (per scan van de spiegel één afbeelding), waaruit via autocorrelatie het snelheidspatroon wordt bepaald.

De analyse van het PIV-beeld gebeurt op een PC, met PIV-software ontwikkeld bij het Laboratorium voor Aëro & Hydrodynamica. Analyse van het PIV-beeld uit Fig.4 levert een snelheidsvectorplot weergegeven in Fig.5. Hierbij zijn grootte en richting van de snelheid weergegeven met lijntjes. In dit snelheidsvectorplaatje is de gemiddelde snelheid ca. 4cm/s.

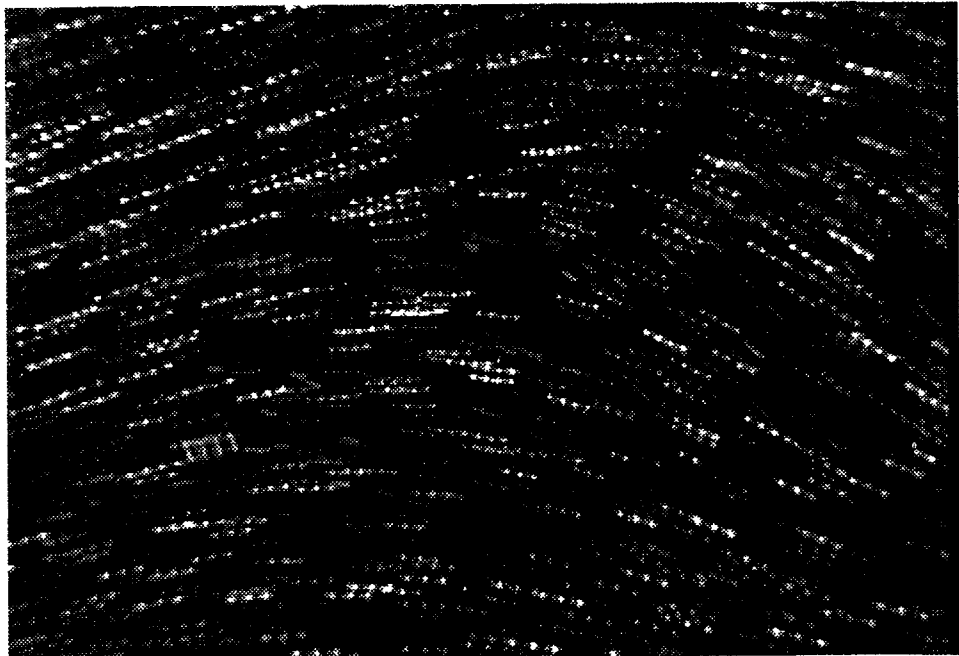
Door het juist instellen van de parameters (zoals tijdsduur tussen lichtpulsen en

grootte van de subvlakjes) zijn met PIV kleine maar ook grote snelheidsbereiken te realiseren, tot enkele honderden meters per seconde met een typische resolutie van ca. 1% van het bereik. Meetvlakken in de stroming beslaan typisch enkele centimeters tot enkele tientallen centimeters. Binnen een meetvlak kunnen dan globaal zo'n 400 snelheidsvectoren worden bepaald. Er wordt gemeten in zowel gassen als vloeistoffen.

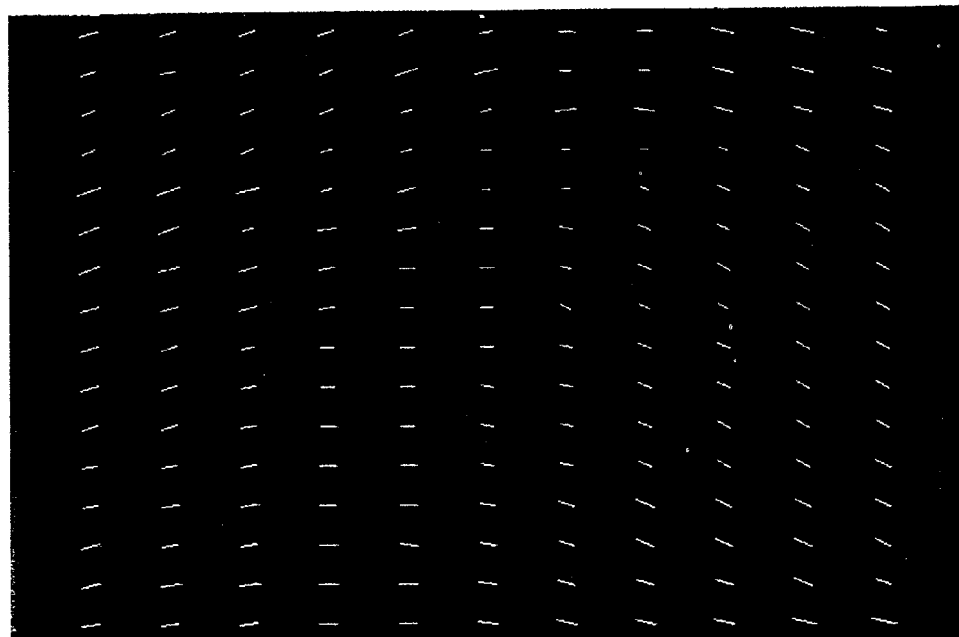
Huidige ontwikkelingen ten aanzien van de techniek richten zich o.a. op high-speed opnamesystemen zodat niet alleen het snelheidspatroon op één tijdstip kan worden bepaald maar ook de ontwikkeling van dit snelheidspatroon kan worden gevolgd. Een andere ontwikkeling is het gebruik van holografische en stereografische opnamesystemen om de overstap te maken van 2D-snelheidsmetingen in een vlak naar 3D-snelheidsmetingen in een volume. Deze ontwikkelingen vinden plaats om stromingen nog beter te kunnen karakteriseren.

Toepassingen

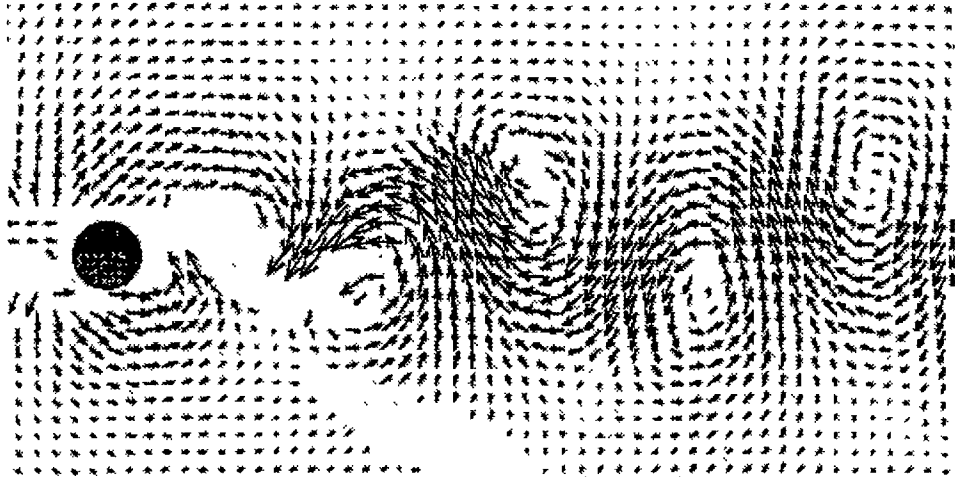
De meettechniek Particle Image Velocimetry vindt steeds meer toepassingen in



Figuur 4
PIV-afbeelding verkregen met de opstelling uit figuur 3



Figuur 5
Snelheidsvectorplot bepaald uit de PIV-afbeelding van figuur 4.



Figuur 6
Snelheidsvectorveld in de wervelstraat achter een cilinder (diameter ca 3mm) na aftrek van de gemiddelde snelheid.

allerlei gebieden waar stromingen een belangrijke rol spelen. Enkele voorbeelden hiervan zijn het gebruik voor onderzoek aan wervels bij stromingen rond objecten als vleugels en bladen van turbines; onderzoek aan water- en luchtstromingen in pijpen, kanalen, nozzles etc.. In onderstaande figuur is een met PIV bepaald snelheidsvectorveld in de wervelstraat achter een cilinder gegeven.

Ook stromingen die een rol spelen bij verbrandingsprocessen worden met behulp van PIV onderzocht. Zo wordt het gebruikt om meer inzicht te krijgen in turbulente stromingen in verbrandingsmotoren. Op medisch gebied worden PIV-metingen ver-

richt in modellen van het hart en modellen van hartvaten.

Bij TNO-TPD is een project gestart voor Particle Image Velocimetry in gasstromingen in pijpen. Experimenten zullen worden uitgevoerd in een aparte flowmeetbank, waarbij met name zal worden gekeken naar de invloed van componenten als bochten en afsluiters op de stroming. Hierover zal te zijner tijd in een volgend artikel verslag worden gedaan.

Literatuur

Een aardig overzichtsartikel over deze techniek is: "Particle Image Velocimetry: A Review", I. Grant, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 211 Part C, IMechE 1997.