

door

Ir. M.J. Pagen

FlowMotion, Delft

Omdat stromingen (gassen en vloeistoffen) in bijna alle technische processen een belangrijke rol spelen is de stromingsleer naast de mechanica een van de belangrijkste disciplines in de wetenschap en techniek. Door het complexe karakter van de wiskundige vergelijkingen waarmee stromingen worden beschreven, zijn er alleen voor zeer eenvoudige stromingen analytische oplossingen beschikbaar waarmee direct de relevante grootheden snelheid, druk, dichtheid en temperatuur berekend kunnen worden. Voor complexere stromingen zijn meestal alleen empirische oplossingen voorhanden met een beperkte nauwkeurigheid. Bij complexe problemen worden de relevante processen in de stroming daarom bestudeerd met behulp van computersimulaties die worden aangeduid met CFD (Computational Fluid Dynamics). Vergelijkbaar met de FEM (Finite Element Methods) uit de constructieleer biedt CFD de mogelijkheid kennis over processen te vergaren die met andere methodes niet of alleen tegen hoge kosten toegankelijk is. CFD is een steeds beter inzetbaar gereedschap geworden dat een zeer breed bereik aan ontwikkelingen kan ondersteunen. Deze brede inzetbaarheid wordt toegelicht aan de hand van twee voorbeelden.

# De bonte wereld van CFD

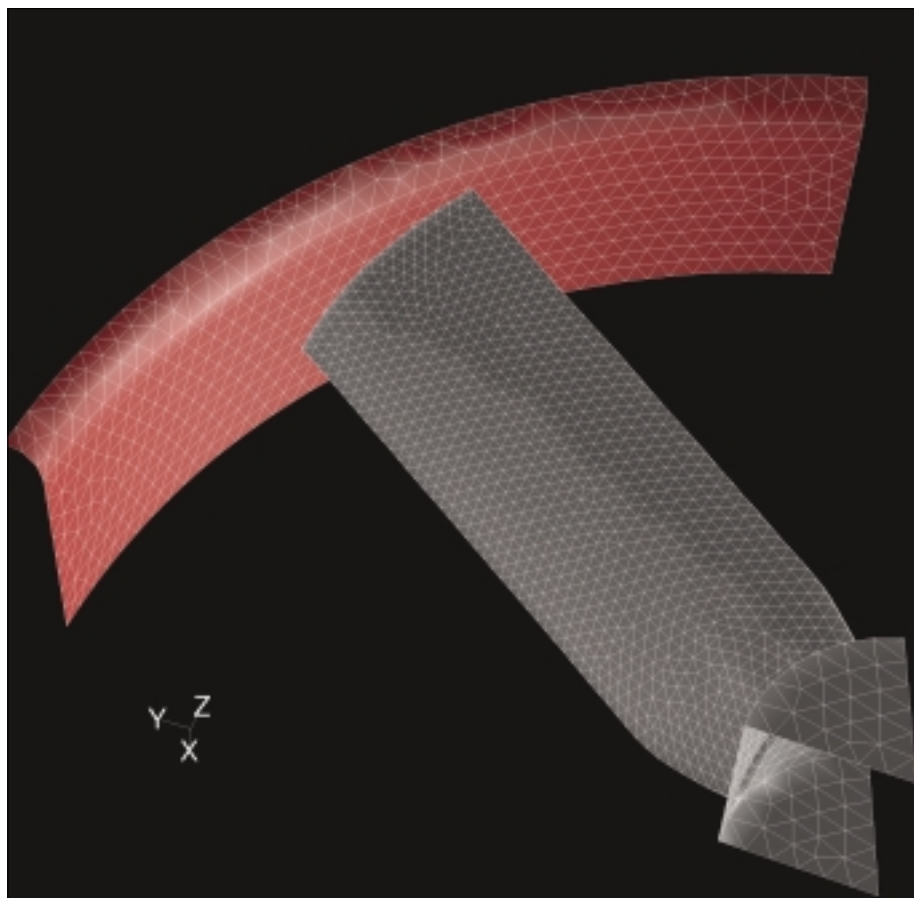
## Computational Fluid Dynamics

### Inleiding

In bijna alle technische processen spelen stromingen (gassen en vloeistoffen) een belangrijke rol. Vaak is de invloed van stromingen duidelijk, zoals bij het gedrag van luchtschepen en vliegtuigen, het brandstofverbruik van auto's of de opwekking van (duurzame) energie. Echter ook het rendement van ventilatoren, de warmteoverdracht in klimaatinstallaties en koelkasten, de productie van zowel metalen gietstukken als boter, of de kwaliteit van een irrigatiesysteem worden bepaald door stromingen. Deze processen zijn gebaseerd op het vermogen van stromingen om krachten, energie en massa over te brengen. Met behulp van de stromingsleer kunnen de bewegingen van stromingen worden beschreven en voorspeld. Dit is de reden dat de stromingsleer naast de mechanica een van de belangrijkste disciplines is in de wetenschap en techniek.

### CFD

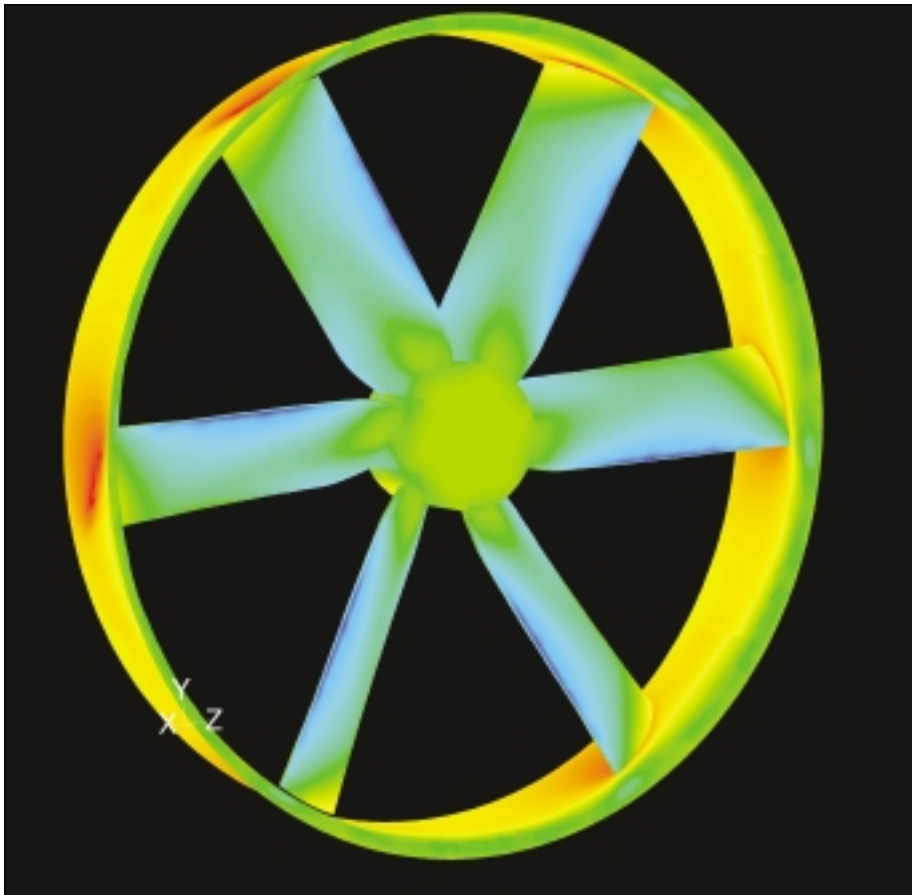
Wanneer men zich bezighoudt met technisch-wetenschappelijke onderwerpen, is een fundamentele kennis van de theoretische verbanden onmisbaar. Zoals alle natuurwetenschap-



Figuur 1: Door toepassing van CFD kunnen luchtstromingen gevisualiseerd worden.

pelijke verschijnselen, kunnen stromingen met wiskundige vergelijkingen worden beschreven. Voor stromingen zijn dat de Navier-Stokes vergelijkingen.

gen. Door het complexe karakter van deze vergelijkingen kunnen alleen voor zeer eenvoudige stromingen analytische oplossingen gevonden



Figuur 2: Gevisualiseerde drukverdeling bij een axiaalventilator.

worden waarmee de relevante grootheden snelheid, druk, dichtheid en temperatuur berekend kunnen worden. Complexere stromingen kunnen alleen berekend worden met min of meer nauwkeurige empirische oplossingen terwijl voor veel technische toepassingen er helemaal geen wiskundige berekeningen beschikbaar zijn.

Bij complexe problemen kan met behulp van computersimulaties van de stroming getracht worden kennis te vergaren over de relevante processen. Deze methode wordt met de engelse term CFD aangeduid (Computational Fluid Dynamics; numerieke stromingsleer).

Bij CFD probeert de computer op zeer veel punten in de stroming (het zogeheten rekenrooster; calculation grid, figuur 1) met behulp van numerieke rekenalgoritmes de Navier-Stokes vergelijkingen op te lossen. Voor een driedimensionale geometrie zijn in de

orde van enige miljoenen rekenpunten benodigd. Met deze enorme hoeveelheid gegevens is het mogelijk met grafische computerpakketten de resultaten zeer aansprekend te visualiseren.

Vanwege het grote aantal benodigde rekenpunten en de tijdrovende numerieke algoritmen was CFD tot voor kort alleen op mainframes mogelijk. Door de explosief stijgende prestaties van processoren en geheugens kunnen nu ook stromingssimulaties op PC's worden uitgevoerd met acceptabele rekestijden (minimale configuratie: 1 GHz processor, 2 Gbyte RAM).

Behalve aan de computer worden er ook aan de gebruiker van CFD hoge eisen gesteld. Omdat er stromingstechnisch weinig verschil bestaat tussen een stroming in een pijp, om een ventilatorschoep of om een luchtschip, zijn de meeste CFD pakketten zeer breed inzetbaar. Dat betekent dat de computer voorzien moet worden van een serie van randvoorwaarden voor

de stroming om betekenisvolle resultaten te verkrijgen. Dit vraagt om ervaring van de gebruiker op het gebied van de wiskunde, stromingsleer en het tekenen van constructies.

De wetenschappelijke achtergrond van CFD is vergelijkbaar met die van de EEM pakketten (Eindige Elementen Methodes) die in de constructieleer worden gebruikt. Ook CFD is in diverse stadia van de produktontwikkeling inzetbaar. Dat kan variëren van conceptstudie tot detailontwerpen, van parameterstudies tot foutanalyses. Deze brede inzetbaarheid zal worden toegelicht aan de hand van twee voorbeelden.

### Ventilator ontwerp

De werking van een ventilator kan op een eenvoudige wijze worden omschreven door te stellen dat het dient om een stroming in beweging te brengen en daarbij een zekere weerstand te overwinnen. Deze weerstand wordt uitgedrukt in een drukverschil tussen de instroom- en uitstroomkant van de ventilator. Dit proces komt tot stand met behulp van schoepen die om een as draaien, al dan niet omringd door een mantel. Door de roterende beweging ontstaat een stroming om de schoep die een bepaalde druk op het schoepoppervlak genereert en daarmee een opwaartse kracht, vergelijkbaar met die op een vliegtuigvleugel. Deze opwaartse kracht bepaalt het volume van de verplaatste lucht. Figuur 2 toont een dergelijke drukverdeling bij een axiaalventilator, waarbij de kleur een maat is voor de statische druk op het schoepoppervlak (blauw = lage druk, rood = hoge druk). Een ander gevolg van de stroming om de schoep is dat deze een weerstand ondervindt die terug te vinden is in het aandrijfkoppel dat benodigd is voor de rotatie, en het benodigde elektrische vermogen van de ventilator. Het betekent dat het verband tussen volumestroom, drukverschil en rendement direct volgen uit de plaatselijke stromingsgrootheden op de ventilatorschoep.

Figuur 3 toont een voorbeeld van een dergelijk plaatselijk stromingsbeeld.

Met behulp van vectoren wordt de richting van de stroming aangeduid en met behulp van kleuren de grootte van de luchtsnelheid (blauw = lage snelheid, rood = hoge snelheid). Aan de achterkant van de schoep is een wervel te zien die de stroming naar buiten afbuigt in de richting van de schoeptip. Een dergelijke stroming zal resulteren in een lage opwaartse kracht en een hoge weerstand die weer tot een lage volumestroom en een slecht rendement leiden.

Omdat plaatselijke stromingsgrootheden zoals druk en snelheid zeer moeilijk en slechts met hoge kosten experimenteel vastgesteld kunnen worden, worden ventilatorschoepen voor het grootste deel proefondervindelijk ontwikkeld. Dat houdt in dat een ventilator wordt samengesteld met bepaalde schoepvormen waarna grootheden als volumestroom, druksprong en elektrisch vermogen van de totale ventilator in een testopstelling worden gemeten. Blijkt dat de ontwerpspecificaties niet worden gehaald, wordt de ventilator- of schoepgeometrie gewijzigd en wordt de testprocedure herhaald. Meestal leidt dit tot een kostbare stuksproductie van meerdere prototypes van schoepen en ventilatoren.

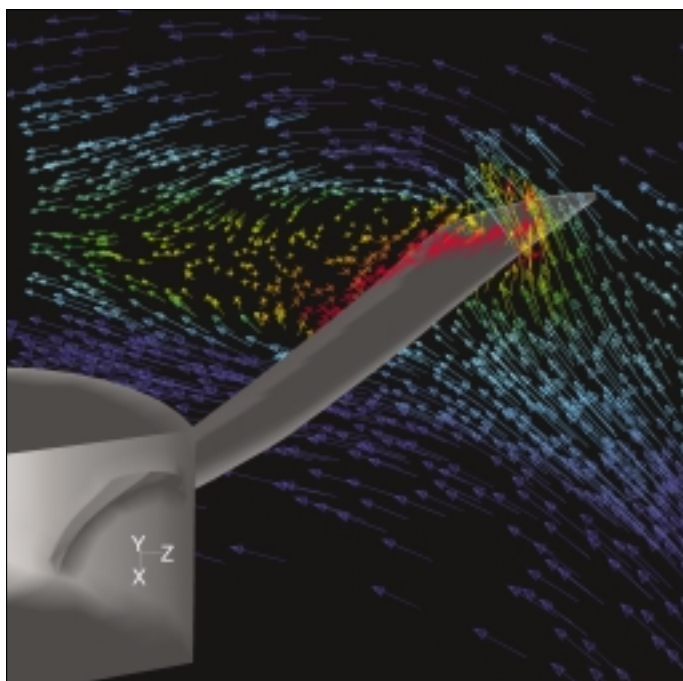
In contrast biedt CFD verscheidene aanvullende mogelijkheden. De prestaties van een ventilator kunnen in de computer worden vastgesteld zonder deze te bouwen. Bij de huidige stand van de rekentechnieken zijn gemiddelde nauwkeurigheden van 5% haalbaar in vergelijking met de resultaten van de standaard testprocedures. De noodzaak voor het bouwen en testen van prototypes is hiermee drastisch gereduceerd. Ten tweede kunnen met behulp van de lokale stromingsgrootheden verborgen aandachtspunten voor de optimalisatie van reeds bestaande ventilatoren worden gevonden. Ten derde kunnen parameterstudies snel en efficiënt worden uitgevoerd. Een voorbeeld van een dergelijke studie is een onderzoek naar het effect van de tipvorm en de tipspeling tussen tip en mantel op het geluidsniveau van de ventilator. Figuur 4 toont een schoeptip met een wervel waarvan de intensiteit bepalend wordt geacht voor de geluidssterkte.

### Klimaatinstallaties

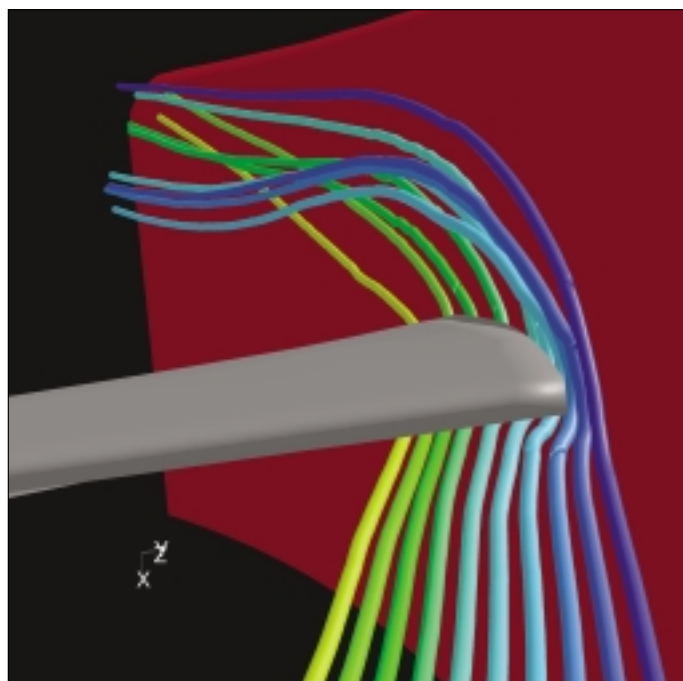
Behalve voor de ontwikkeling van ventilatoren biedt CFD ook nieuwe mogelijkheden voor de ontwikkeling

van klimaatsystemen voor gebouwen (HVAC). Immers, een goed ontworpen ventilator biedt geen voordeel wanneer hij vervolgens verkeerd gepositioneerd is. In het nu volgende voorbeeld wordt een hal beschouwd, waarin zich drie stellingen bevinden en die met behulp van een luchtverwarmer wordt verwarmd. Verder heeft de hal in een van de wanden een deur die slecht is geïsoleerd en die daardoor de (lage) temperatuur van de buitenlucht heeft. Figuur 5 toont de temperatuurverdeling in de hal (blauw = lage temperatuur, rood = hoge temperatuur).

Dat met CFD niet alleen geometrische wijzigingen geanalyseerd kunnen worden, maar ook wijzigingen in de omstandigheden, blijkt uit afbeelding 6 met de temperatuurverdeling in dezelfde hal, maar nu met de deur geopend, waardoor er koude buitenlucht binnendringt. Ook dit voorbeeld toont aan dat met CFD studies verricht kunnen worden, die experimenteel niet uitvoerbaar zijn. Dit geldt zeker voor grote ruimtes, waar zelfs een minimum aan benodigde meetpunten al tot zeer omvangrijke experimenten zal leiden. Een bijkomende moeilijkheid is dat metingen van luchtsnelheden beneden 1 m/s zeer gevoelig zijn



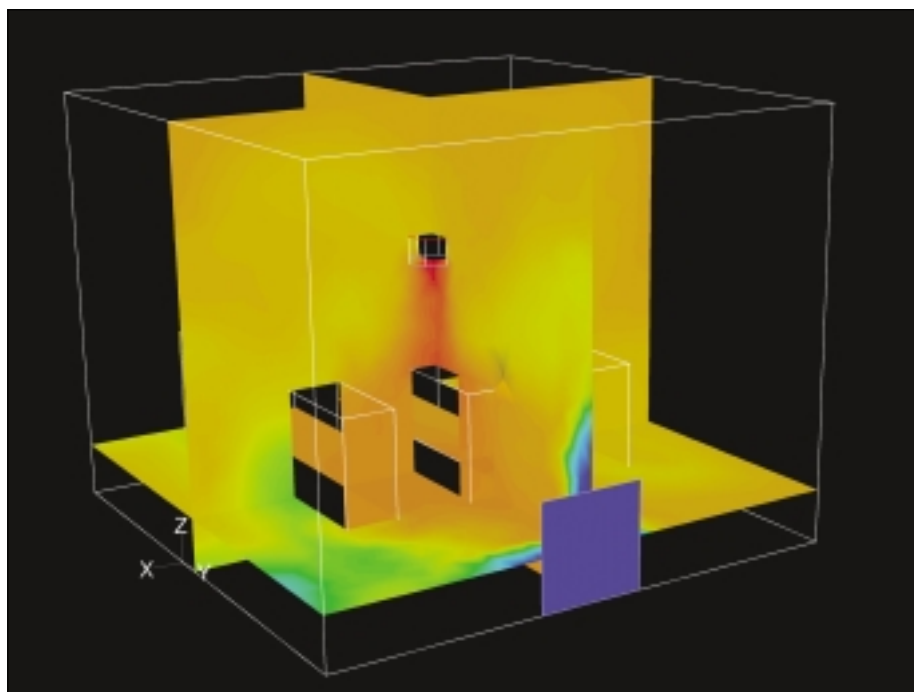
Figuur 3: Stromingsbeeld ter plaatse van de schoep.



Figuur 4: CFD kan door de visualisatie ook een inschatting worden gemaakt voor het te verwachten geluid.

Lijken de gebruikte voorbeelden op het eerste gezicht eenvoudig, het geheim van een goede simulatie zit in de details. Om bijvoorbeeld voor een ventilator het benodigde vermogen correct te kunnen voorspellen, is een goede bepaling vereist van de luchtweerstand die de ventilatorschoepen ondervinden bij het draaien. Hiervoor moet de luchtlaag direct op het schoepoppervlak (de zogeheten grenslaag), waar de luchtweerstand ontstaat door wrijving tussen de lucht en het schoepoppervlak, zeer nauwkeurig worden gemodelleerd. Zowel in vorm als in fysische eigenschappen. Bij het analyseren van een ruimtelijke temperatuurverdeling vereist het effect van warmte-overdracht tussen voorwerpen en stromingen ook een zeer zorgvuldige modellering van de thermische en geometrische eigenschappen. Ruime ervaring is noodzakelijk bij het modelleren van complexe stromingsverschijnselen als wrijving, turbulentie en convectie.

voor verstoringen uit de omgeving. Echter, dit niveau van lichtsnelheden

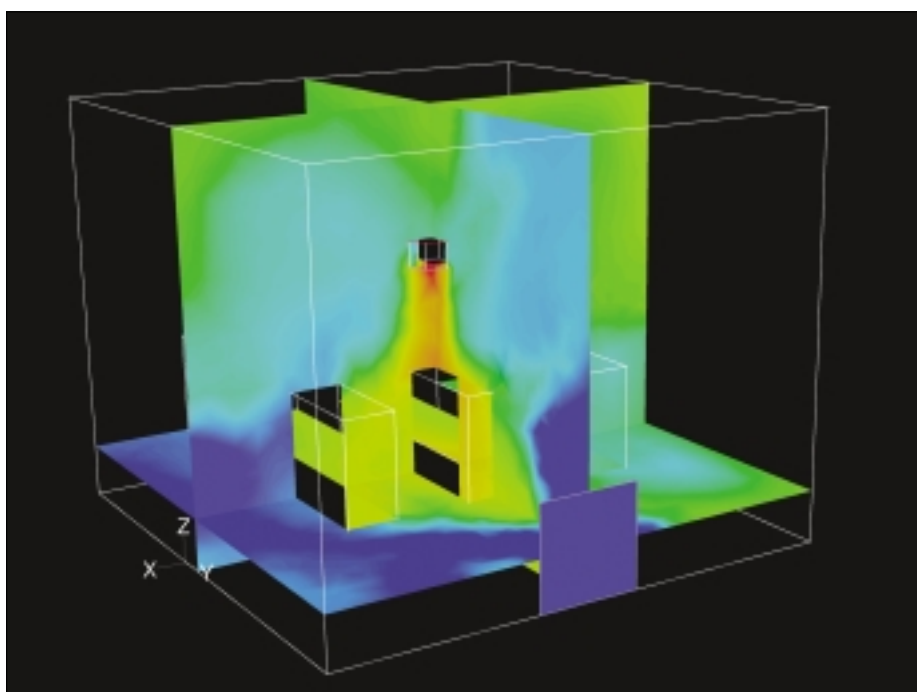


Figuur 5: Temperatuurverdeling in een hal met luchtverwarmer en een slecht geïsoleerde deur.

komt in de klimaattechniek zeer vaak voor, omdat deze snelheden door de mens al als onaangenaam worden ervaren. CFD biedt de mogelijkheid om snel de invloed van verwarmings-elementen, uitblaasopeningen en snelheden te bepalen op het algehele klimaat in een ruimte.

## Conclusie

Hoewel simulaties altijd slechts een afbeelding van de werkelijkheid zullen zijn, hebben voorgaande voorbeelden verduidelijkt dat CFD nieuwe en uiterst waardevolle gegevens kan opleveren. Omdat veranderingen relatief snel en eenvoudig kunnen worden aangebracht, biedt CFD de mogelijkheid kennis over processen te vergaren die met andere methodes niet of alleen tegen hoge kosten toegankelijk is. Ondanks de eisen die aan de gebruiker worden gesteld, is CFD een steeds beter inzetbaar gereedschap geworden dat een zeer breed bereik aan ontwikkelingen kan ondersteunen.



Figuur 6: Temperatuurverdeling in een hal met luchtverwarmer en een geopende deur.