

LUCHTIGE ASPECTEN IN DE BOUWFYSICA

NIEUWE MEETTECHNIKEN

Akoestisch meten is voor velen een nieuw onbekend onderwerp. In dit artikel wordt kort ingegaan op de theoretische achtergrond van het meetprincipe; enkele praktische mogelijkheden worden toegelicht. Akoestische meettechniek van Innovation Handling geeft een beeld van het binnenklimaat waar verbeteringen mogelijk zijn, het levert een innovatieve bijdrage aan energiebesparingsmogelijkheden en handvatten voor vernieuwing in de HVAC-wereld.



ir. W.H.J. (Wilhelm)
van Schaik, van Schaik
Innovation Handling BV

Het meten en visualiseren met geluid van het binnenklimaat geeft volkomen nieuwe mogelijkheden voor het inzicht in en het beheersen van de ruimtelijke klimaattoestand. Met akoestische meettechniek worden onder andere luchttemperaturen en luchtsnelheden gemeten. De meetinformatie kan met akoestische tomografie en interpolatiemethoden worden verwerkt tot een ruimtelijk klimaatbeeld.



ing. M.P.G.E. (Martin)
van Schaik, van Schaik
Innovation Handling BV

Reeds in de 18^e eeuw wist men dat de geluidssnelheid afhankelijk is van de temperatuur. Vanaf 1738 tot 1919 waren dit soort metingen gebaseerd op onder andere de ‘cannon-flash open-air’ methode (een kanon geeft een lichtflits). Deze metingen maakten natuurlijk veel kabaal met weinig praktische toepassingsmogelijkheden. Johannes Diderik van der Waals, als een van de belangrijkste grondleggers van de kinetische gastheorie, heeft in de tweede helft van de 19^e eeuw de verschijnselen theoretisch beschreven. Met theorie kan men in de praktijk pas iets doen als de techniek er rijp voor is. Momenteel is het meten van de geluidssnelheid zodanig ontwikkeld dat dit snelle voortplantingsverschijnsel bruikbaar is voor diverse toepassingen.

METEN MET GELUID

Veel fysische verschijnselen zijn niet zichtbaar maar wel meetbaar zoals geluid, temperatuur, snelheid, vocht, spanning en stroom. De te meten grootheden beïnvloeden de meetsensor en veranderen het sensorgedrag. De veranderingen in sensorgedrag worden gemeten. Een bekend voorbeeld is het meten van de temperatuur door de uitzetting van kwik of de weerstandverandering van een platinadraad, de Pt100 sensor. Bij het temperatuurmeteren met geluid is de lucht zelf het sensormateriaal. Geluid is een longitudinaal golfverschijnsel gebaseerd op voortplanting van adiabatise verdichtingen en verdunningen in lucht. Met geluid in combinatie met aanvullende sensoren kunnen afgeleide grootheden worden gemeten zoals luchtsnelheid, debiet en zelfs de luchtvochtigheid [1]. Bij de akoestische metingen kijken we naar de fysische eigenschappen van geluid in lucht en niet naar het effect van geluid zoals in de akoestiek.

Voor de praktisch toepasbare eigenschap van geluid voor fysische metingen wordt gekeken naar de voortplantingssnelheid of geluidssnelheid c en verder naar enkele eigen-

schappen die er invloed op hebben. De geluidssnelheid c is niet constant maar hangt af van een aantal parameters $c = c(T, RV, CO_2, P_{atm}, \dots)$. De veruit belangrijkste grootheid is hier de temperatuurafhankelijkheid. Ieder kent het verhaal dat als je de bliksem ziet en de knal na 3 seconden hoort de inslag op 1 km afstand was; hieruit volgt dat de geluidssnelheid bij kamertemperatuur ongeveer 333 m/s is.

Voor een ideaal gas kan een vergelijking voor de geluidssnelheid worden afgeleid:

$$c \approx \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

Hierbij is $\gamma = C_p / C_v$ de specifieke-warmteverhouding (voor lucht 1,41), R de algemene gasconstante (8,3145 J/(mol K)), T is de absolute temperatuur in Kelvin en M de gemiddelde molaire massa van het gas in kg/mol. De temperatuurafhankelijkheid, of verandering van de geluidssnelheid per graad bij kamertemperatuur is ongeveer 0,5 m/s.

$$\frac{\partial c}{\partial T} \approx 0,5 [ms^{-1}K^{-1}] \quad (2)$$

Met geluid kan, met bijbehorende correcties, nauwkeurig de luchttemperatuur worden gemeten [2].

Akoestische meetmethoden worden door NPL's (National Physical Laboratories) zoals NIST en NPL als de meest nauwkeurige meetmethoden voor temperatuurmetingen beschouwd [7], [8], [9].

De grote betrouwbaarheid van het akoestisch meetprincipe is gebaseerd op het feit dat de temperatuur wordt gemeten met een tijdmeting over een vaste afstand (geluidssnelheid). Het meten van de tijd kan zeer nauwkeurig worden uitgevoerd. De grootte van luchtsnelheden wordt eveneens met een tijdmeting gemeten. De meetresolutie bedraagt ongeveer 1 mm/s. De richting van de snelheidsvector wordt uit de combinatie van drie orthogonale metingen bepaald (figuur 3). Kalibratie van de akoestische apparatuur vindt plaats in een klimaatkast onder bekende temperatuur- en vochtcondities.

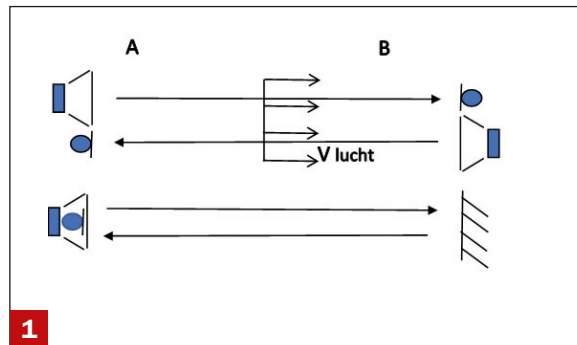
Van het meetprincipe worden onderstaand een aantal praktische aspecten toegelicht, namelijk:

- meetprincipe, eigenschappen en karakteristieken
- meetprocedure (QuickScan)
- bruikbaarheid en toepassingen
- uitvoeringsvorm
- resultaten
- uitdagingen en nieuwe mogelijkheden

Meetprincipe, eigenschappen en karakteristieken van meten met geluid

Eigenschappen van meten met geluid

- De geluidssnelheid hangt voornamelijk af van de temperatuur.
- De luchtvochtigheid heeft relatief weinig invloed, zoals blijkt uit formule (1). Voor nauwkeurige metingen wordt de invloed ervan in de meetverwerking meegenomen [1].
- Voor het meten van de temperatuur wordt geluid uitgezonden van A naar B en terug (figuur 1). De gemiddelde akoestische looptijd van heen en terug is een maat voor de temperatuur.
- Het tijdsverschil tussen heen en terug bij een bekende afstand levert een snelheidscomponent op van de luchtsnelheid $V = |AB| / (t_{AB} - t_{BA})$. Het is een vectorcomponent van de lichtsnelheid.
- Akoestisch meten levert dus met twee metingen, heen en terug, de gemiddelde temperatuur en de luchtsnelheid. Drie onderling orthogonale metingen leveren met Pythagoras naast de gemiddelde temperatuur ook de ruimtelijk georiënteerde luchtsnelheidsvector in het gemeten punt.
- De ‘traject- of lijntemperatuur’ is de gemiddelde temperatuur van het luchtvolume van A naar B.
- In een fractie van een seconde worden met digitale tijdmeting de temperatuur en de luchtsnelheid gemeten, dit is duidelijk anders dan het meten van de klassieke punttemperatuur.
- De methode van temperatuurmeting met bijbehorende ruimtelijk gerichte snelheidsoriëntatie biedt de mogelijkheid om met tomografische reconstructie en interpolaties een betrouwbare ruimtelijke weergave te geven van het temperatuur- en stromingsveld.
- De lucht zelf is de sensor; veroudering, drift of aantasting zijn niet aan de orde. Een belangrijk voordeel van meten met geluid is de hoge resolutie van de temperatuur en luchtsnelheid.
- Akoestisch meten kan worden toegepast in lucht, gasen en vloeistoffen.
- Akoestische sensoren zijn zeer robuust vergeleken met bijvoorbeeld hittedraad metingen. De informatie van de akoestische sensoren kan de klimaatregeling gaan gebruiken in de regeling.
- Met geluid wordt de luchttemperatuur gemeten, ongevoelig voor stof, chemische aantasting of warmtestraling. In vergelijking met een thermometer die gevoelig is voor warmtestraling van de zon biedt dit een grotere nauwkeurigheid.
- Klimaatvisualisatie van het temperatuur- en stromingsveld is mogelijk met bijbehorende software. Voor het verkrijgen van de ruimtelijke informatie wordt gebruik gemaakt van een traverserende meetmethode (via een meetraster) waarbij de ruimte systematisch wordt door-



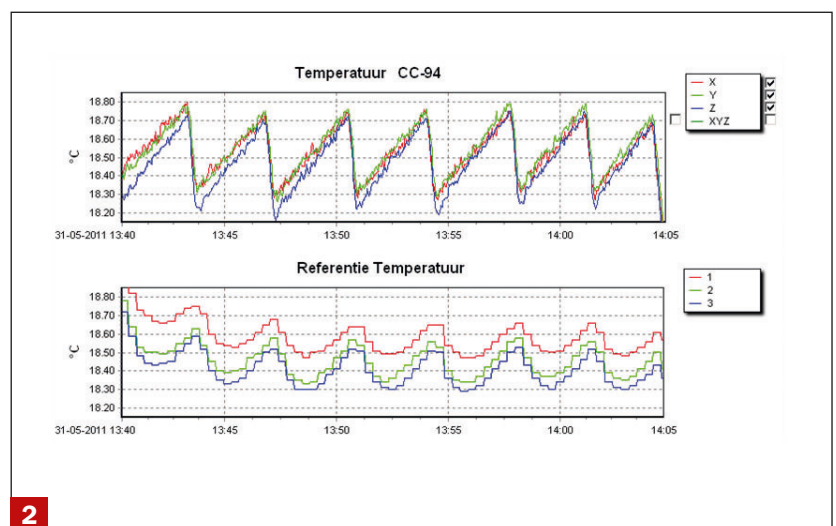
1 Meetprincipe

gemeten. Doordat akoestische metingen kort na elkaar kunnen worden uitgevoerd levert een QuickScan snel een klimaatimpressie bij aanname van een quasi-stationaire toestand. Ook deelaspecten kunnen worden gevisualiseerd zoals het Coanda-effect bij een rooster en koudeval bij wanden of ramen.

- Bij de ruimtelijke metingen worden alle meetgegevens digitaal opgeslagen met tijd-, plaats-, richting- en tijdinformatie. Hierdoor kunnen naast de temperatuur, luchtsnelheid en vochtverdeling, bijvoorbeeld bij herhalingsmetingen (andere omstandigheden), ook verschillen worden weergegeven zoals het verschil in temperatuur, de luchtsnelheid tussen twee hoogten of het ruimtelijk verschil dat optreedt bij twee ventilatie-instellingen.

Figuur 2 geeft het temperatuurgedrag weer in een klimaatkast, de kast verwarmt en koelt om de temperatuur constant te krijgen. In de kast worden drie akoestische temperatuursensoren vergeleken met drie stuks Pt1000 sensoren (referentietemperatuur). Wat hier opvalt is het amplitude- en faseverschil tussen de verschillende typen sensoren. De eerste kalibraties zijn bij VSL in Delft uitgevoerd in een bereik van 8 tot 70°C, onder verschillende vochtcondities.

De tijdconstante τ van een snelle standaard temperatuursensor ligt in de orde van seconden, akoestisch is dit milliseconden. Daardoor ijlt in figuur 2 de referentiesensor na. De referentietemperatuur reageert door thermische traagheid later op het schakelgedrag van de kast.



2 Temperatuurgedrag klimaatkast

Ruimtelijke klimaatinformatie wordt accuraat en snel gemeten. Met de temperatuur- en richtingsgeoriënteerde stromingsinformatie is het mogelijk om betrouwbaar het ruimtelijk klimaat te visualiseren. Ruimtelijke klimaatinformatie is in diverse onderzoeken uitgewerkt [3]. In een promotieonderzoek [4] is de methode van het verwerken van akoestische meetgegevens tot ruimtelijke klimaatinformatie verder uitgewerkt, dit onderzoek is hier geen onderwerp van dit artikel.

Galm en echo's die belangrijk zijn in de akoestiek, hebben bij deze metingen geen invloed omdat alleen het snelste akoestische signaal wordt gebruikt, het rechtstreekse signaal is van A naar B en niet via een omweg (figuur 1).

QuickScan meetmethode

Het akoestisch meten is de basis geweest van de ontwikkelde QuickScan meetmethode waarmee het ruimtelijk klimaat wordt gevisualiseerd.

Bij deze QuickScan wordt het meetraster, gebaseerd op de plattegrond van de te meten ruimte, systematisch doorlopen. De meetgegevens worden draadloos overgestuurd naar een laptop of PC. Per rasterpunt wordt met meer akoestische sensoren boven elkaar tegelijk gemeten (3).

Doordat akoestisch vectorieel de lichtsnelheid wordt bepaald is de oriëntatie van de meetapparatuur van belang. Deze wordt tijdens de metingen opgeslagen. De meetverwerking vindt plaats met ClimaView software.

De meetinformatie bestaat uit een ruimtelijk gestructureerde verzameling 'lijnmetingen' in plaats van een ruimtelijke wolk van conventionele puntmetingen. Het betekent dat het meetprincipe zeer geschikt is voor tomografische ruimtelijke meetverwerking.

De akoestische meetmethode kan voor onderzoeksdoel-einden worden gebruikt zoals voor het meten van luchttechnische systeemelementen in de HVAC, debieten en lekdebetmetingen, het verversingsdebet in spouwmuren en nieuwe klimaatregelingen in de gebouwde omgeving.

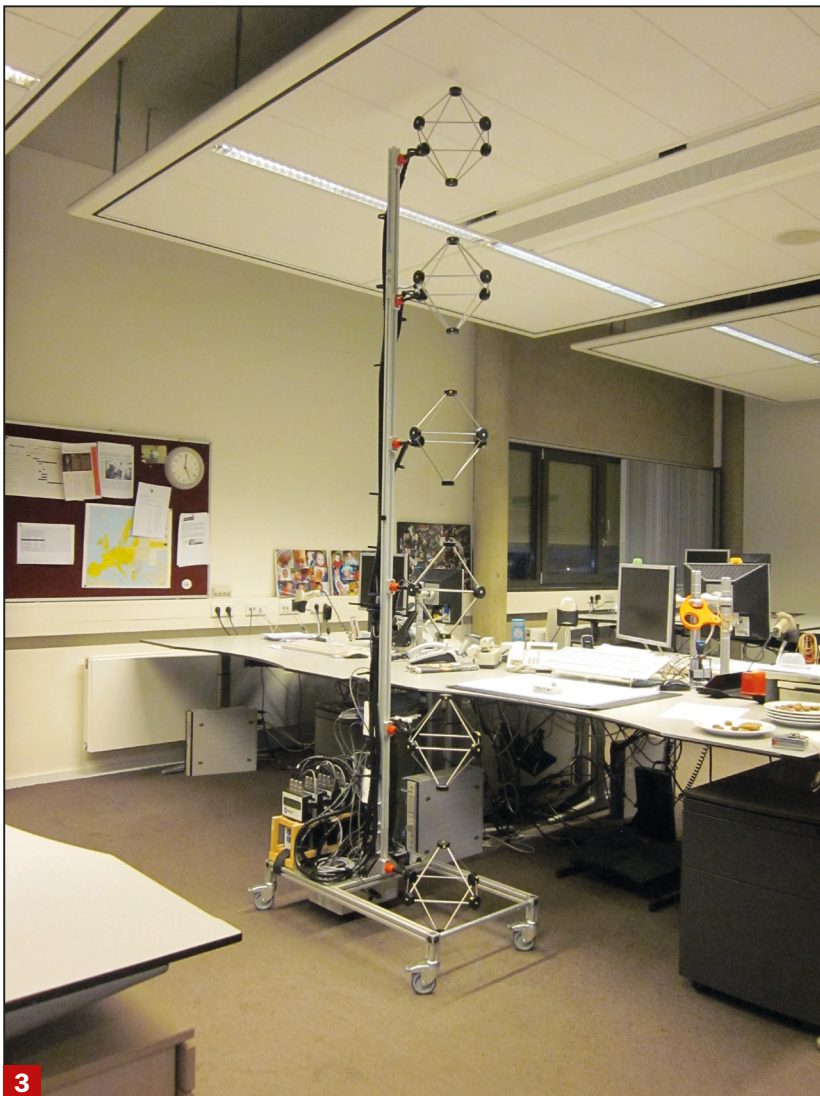
De ruimtelijke meetgegevens worden in matrices opgeslagen. Zo wordt de ruimtelijke klimaatinformatie in verschillende doorsneden gevisualiseerd en worden tegelijkertijd bijbehorende berekeningen uitgevoerd. Bij de weergave kunnen naast de temperatuur- en stroming ook isothermen of lijnen van constante snelheid en gemiddelden worden weergegeven. Door de hoge resolutie van de meettechniek kan de legenda zodanig worden geschaald dat detailinformatie nauwkeurig kan worden bekeken (figuur 5 en figuur 6). Afgeleide grootheden zoals energiestromen zijn ook te berekenen en weer te geven (figuur 7). Dit kan vervolgens worden gebruikt bij het beoordelen van de efficiëntie van de afzuiging in een ruimte, zoals in een datacenter, het bepalen van het rendement van luchtgordijnen of het weergeven van de verschilsituatie tussen twee toestanden, denk hier bijvoorbeeld aan het afschermend effect van het verschil tussen twee ventilatorstanden van een luchtgordijn.

Naast inzicht in het klimaatgedrag biedt de QuickScan meetmethode mogelijkheden om optimale plaatsen te vinden voor de posities van sensoren en actuatoren.

Een verdere toepassing is 'temperature mapping'. Industrieel is dit een belangrijk aandachtspunt en speelt het een rol op locaties waar bederfelijke en vochtgevoelige producten worden opgeslagen, maar ook in onder andere hoogwaardige productieomgevingen, zaadopslag en musea. Toepassing van de akoestische meetmethode heeft als groot voordeel dat met weinig sensoren zeer snel de ruimte 3-dimensionaal kan worden doorgemeten. Doet men dit met traditionele methoden dan zullen op veel meetpunten sensoren moeten worden geplaatst om zo informatie over temperature mapping te krijgen. (tuinbouw kas, magazijn, cultureel erfgoed zoals een kerk).

Stationaire en instationaire effecten

Ongewenste effecten in het binnenklimaat kunnen met een QuickScan snel en objectief worden bepaald. De metingen geven inzicht in het temperatuur- en stromingsgedrag in een ruimte. Voorbeelden: verspreiding van dampen van chemische stoffen, geur en olieniveau in productieruimten, ongewenste stratificatie, gedrag van ventilatieve koeling ([5], [6]), koudeval, invloed op het binnenklimaat door diverse aggregaten en convectieve energiestromen.

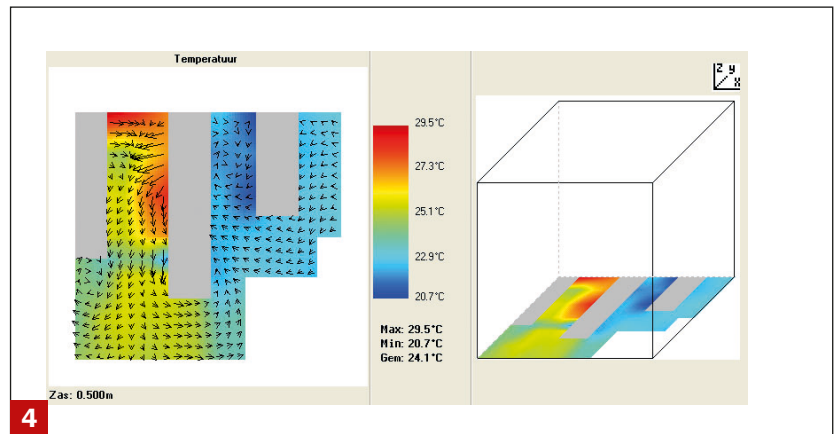


3

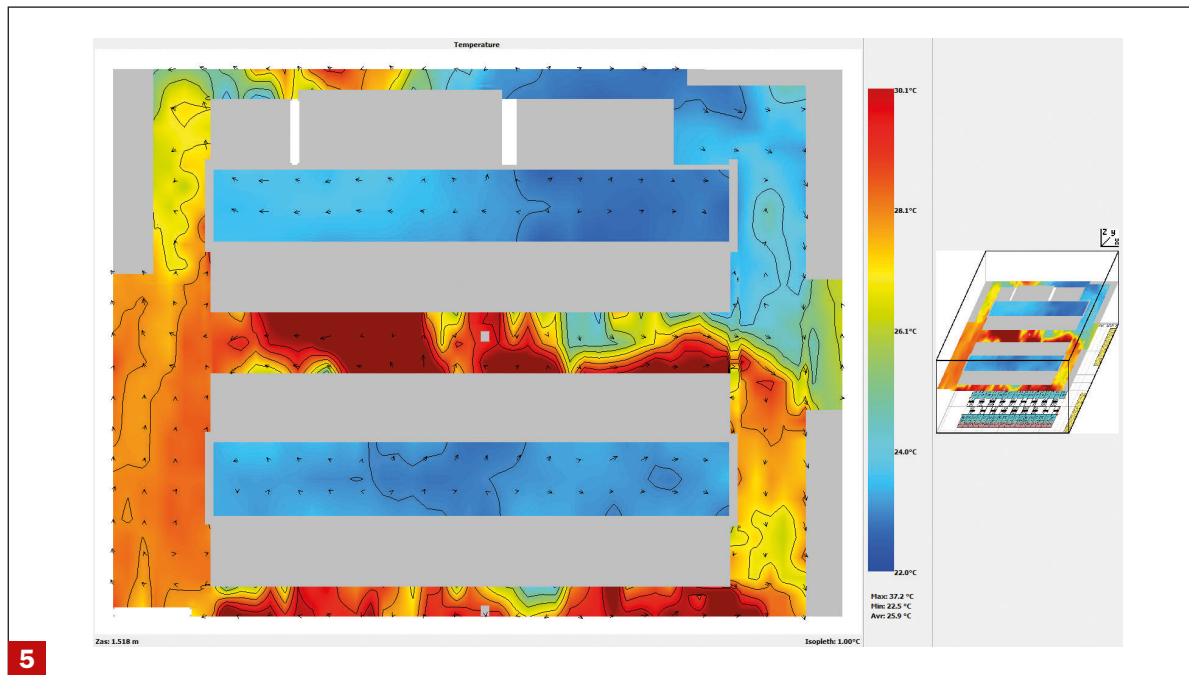
QuickScan apparatuur in kantooromgeving

Beïnvloedingsfactoren op de toestand van en de dynamica in het binnenklimaat

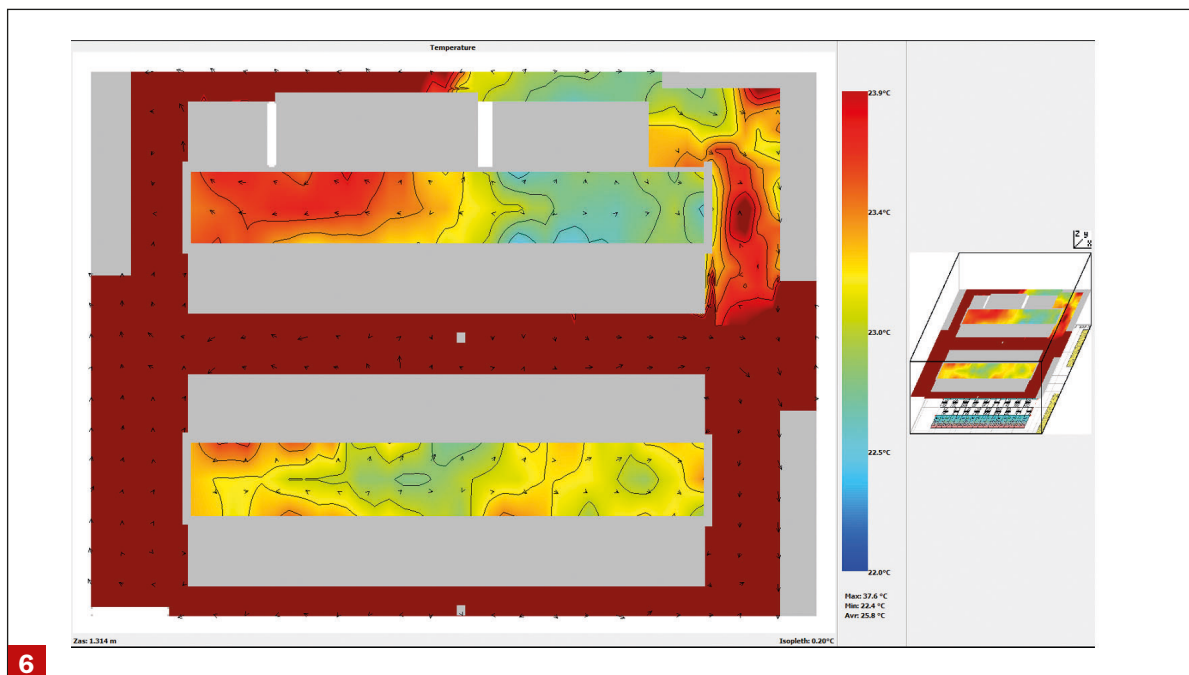
Binnen de gebouwde omgeving spelen verschillende aspecten een rol die de toestand van het binnenklimaat en de behaaglijkheid beïnvloeden. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in statische en dynamische effecten. Bij statische effecten valt te denken aan constructieve zaken zoals het beperken van lekkage en oplossingen als compartimentering, het aanbrengen van isolatie en constructies met stromingstechnische voorzieningen voor het beperken van koudeval en tocht. Dynamische klimaat-effecten zijn verschijnselen die optreden door onder andere een openstaande deur of raam, verandering in het buitenklimaat, interne warmtebronnen, temperatuur- ▶



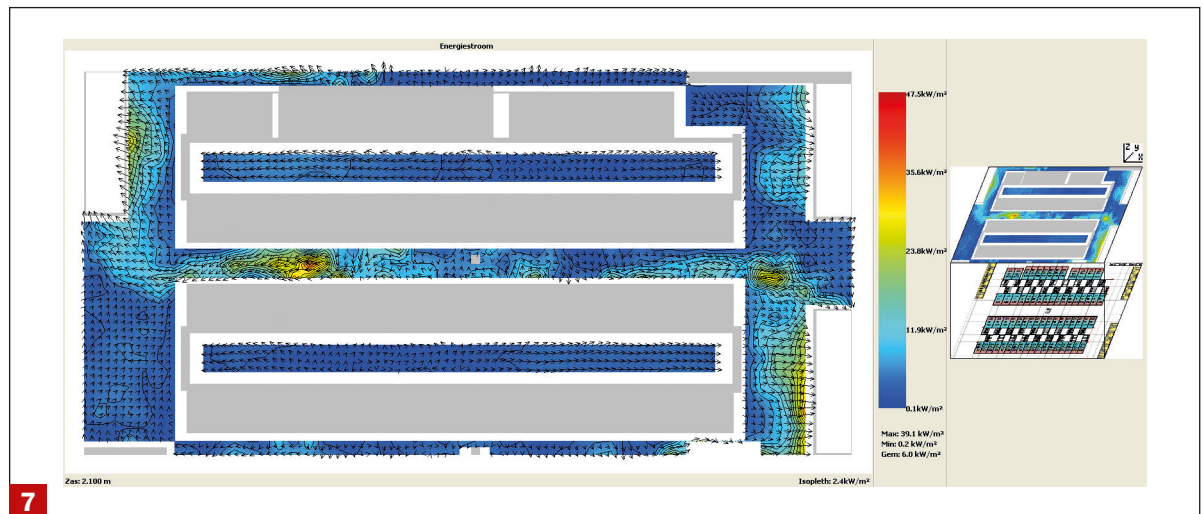
4 Meetresultaten in deel van datacenter



5 Temperatuurverdeling in koude en warme gangen in een datacenter gemeten met een akoestische QuickScan op hoogte 1,52 m. Legenda temperatuurbereik 22° - 30°C



6 Temperatuurverdeling in koude en warme gangen in een datacenter gemeten met een akoestische QuickScan op hoogte 1,31 m. Legenda temperatuurbereik 22° - 24°C



7 Energiestroom. Legenda 0,1 tot 47,5 kW/m²

gradiënten, tocht, zoninstraling en regelacties van verwarming, koeling en ventilatie.

Voor het beheersen van het klimaat in een gebouw wordt een klimaatsysteem toegepast dat is ontworpen en gebouwd op basis van kennis, inzicht en ervaring. De werkelijke situatie blijkt meestal anders te zijn dan gedacht. Vaak is er bij klachten een klimaatonderzoek nodig om te achterhalen wat de situatie en oorzaak is, daarna worden vervolgacties gepland. Het objectief vastleggen van klachten met bestaande meetapparatuur is, zoals bekend, lastig, mede door de vaak persoonlijke belevenis. Akoestische meettechniek biedt een nieuwe mogelijkheid voor een snelle en meer objectieve inventarisering van problemen in het binnenklimaat.



8 QuickScan meetapparatuur

Enkele voorbeelden

De temperatuur en stroming in figuur 4 laat een deel van een datacenter zien waarbij er kortsluiting optreedt tussen de koude en warme gang. Hier was nog geen fysieke scheiding tussen de koude en warme gang aangebracht. In figuur 5 en 6 zijn de koude gangen afgesloten met deuren. De kleur bruin is een temperatuur die buiten het bereik van de legenda valt. Zwarte lijnen zijn isothermen, figuur 5 (1 K) en figuur 6 (0.2 K). Het grijze gebied in het midden zijn servers; grijze gebieden in de hoeken zijn de CRAC's (airco's).

Met conventionele temperatuurmeettechnieken is dit inzicht in temperatuurverdelingen niet realiseerbaar. De hoge resolutie van akoestisch meten is duidelijk te zien. Ook is interessant de stratificatie te zien die optreedt.

Figuur 7 geeft de visualisatie van de energiestroom met energiedichtheid in kW/m², zie de kleur in de legenda. Gemeten is hier op 2,10 m hoogte, dit is de hoogte van de instroom in de CRAC's (witte rechthoeken in de hoeken). Duidelijk is dat de CRAC rechtsboven duidelijk minder thermische energie afvoert dan de andere twee. Slimme steunventilatie kan het thermisch koelrendement verbeteren.

In de opstelling in figuur 8 wordt in de warme gang van een datacenter gelijktijdig op twee verschillende plaatsen en op 4 verschillende hoogten de temperatuur en vectoriële luchtsnelheid gemeten. Draadloos worden de meetgegevens van beide meetsystemen overgestuurd. Per meetpositie wordt bijvoorbeeld gedurende 10 s gemeten. Als alleen de temperatuur hoeft te worden gemeten kan dit in enkele seconden.

CONCLUSIE

Met de akoestische meetmethode zijn de snelheid en temperatuur van lucht ruimtelijk inzichtelijk te maken. Akoestische metingen kunnen in een kort tijdsinterval worden uitgevoerd. De hoge resolutie van de akoestische metingen, in combinatie met het real-time meetgedrag en de visualisatietechnieken, levert een innovatieve doorbraak voor klimaatinzicht en mogelijkheden voor optimalisering. Het

toepassen van akoestische sensoren en bijbehorende aangepaste regelingen leveren nieuwe mogelijkheden voor een meer efficiënte beheersing van het binnenklimaat zoals voor het verminderen van convectieve verliezen en het verminderen van tocht. De meetmethode kan in onderzoeksprojecten nieuwe inzichten opleveren. De snelle en nauwkeurige akoestische meettechniek zal, ook in combinatie met andere typen sensoren, een bredere toepassing gaan vinden zowel bij validatie van klimaatsituaties als in de klimaatregeling zelf.

In combinatie met snelle dataprocessing en aangepaste CFD rekenmethoden zal voor nieuwe klimaatregelingen, naast de randvoorwaarden, ook gebruik kunnen worden gemaakt van nieuwe aanvullende real-time veldvoorwaarden.

Op Europees en nationaal niveau zijn afspraken gemaakt om klimaatverandering tegen te gaan. Een grote opgave ligt in het verduurzamen van de bestaande woning- en bouwvoorraad in Nederland. Binnen grote gebouwen van o.a. het cultureel erfgoed, veelal oude en energieslurpende gebouwen, moeten substantiële energiebesparingen worden gerealiseerd om zo een bijdrage te leveren aan het verbeteren van de energieprestatie van het gebouw. Besparingen zullen niet alleen op statische aspecten zijn gebaseerd zoals conventionele isolatie maar betreffen ook onderwerpen met dynamische aspecten die aansluiten bij het ICT tijdperk en slimme gebouwen. Een meer behaaglijk en energiezuiniger klimaat kan met nieuwe klimaatregelingen worden gerealiseerd zowel voor oude gebouwen alsook voor nul-energie gebouwen. In de moeilijke transitie naar een meer energiezuiniger wereld kan de bouwfysica en HVAC wereld nu met een beter klimaatinzicht gericht in beweging komen door het toepassen van ICT, nieuwe analyse en klimaatbeheersmethoden. ■

BRONNEN

- ▶ [1] van Schaik W.H.J., Grooten M.H.M., Wernaart T., van der Geld C.W.M., High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air, Sensors 2010, 10, 7421-7433
<http://www.mate.tue.nl/pdfs/12015.pdf>
- ▶ [2] Cramer O., The Variation of the Specific Heat Ratio and the Speed of Sound in the Air with Temperature, Pressure, Humidity, and CO2 Concentration, J. Acoust. Soc. Am. 93(5), 2510-2516, 1993
- ▶ [3] Suurmond R.T., Tomographic reconstruction of temperature distributions from acoustic measurements, TU/e, 1998
- ▶ [4] Mao X., Acoustic techniques for temperature and flow velocity measurements, TU/e, 2005 <https://pure.tue.nl/ws/files/1781639/200513071.pdf>
- ▶ [5] van Pollet I., de-toekomst-van-echt-hernieuwbare-energie, <https://www.duurzaamgebouwd.nl/expert-posts/20160617->
- ▶ [6] Jacobs, I., Increasing the potential of ventilative cooling in low energy building designs by better quantifying the air flow at the window interface - is sonic anemometry a useful technique for that?, TU/e, 2017
- ▶ [7] Ripple D.C. e.a., Acoustic Thermometry Results from 271 K to 552 K, http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=831005
- ▶ [8] Moldover M.R. e.a., Acoustic gas thermometry, http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=914033
- ▶ [9] Primary Acoustic Thermometry <http://www.npl.co.uk/temperature-humidity/research/primary-acoustic-thermometry>, (met film)

■ BIJNA JE SCRIPTIE AFGEROND?

Schrijf een artikel in Bouwfysica

redactie@nvbv.org

