

Thermisch comfort in relatie tot laag exergetische HVAC systemen

Citation for published version (APA):

Schellen, L., Loomans, M. G. L. C., Marken Lichtenbelt, van, W., & Wit, de, M. H. (2011). Thermisch comfort in relatie tot laag exergetische HVAC systemen: het ontwerp van een nieuwe klimaatkamer aan de TU Eindhoven en het gebruik van een thermofysiologisch model. *Bouwfysica*, 22(4), 2-7.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2011

Document Version:

Het geaccepteerde manuscript inclusief aanpassingen uit het peer-review proces

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Thermisch comfort in relatie tot laag exergetische HVAC systemen **[hoofdtitel]**

Het ontwerp van een nieuwe klimaatkamer aan de TU Eindhoven en het gebruik van een thermofysiologisch model **[ondertitel]**

ir. L. (Lisje) Schellen, promovenda TU Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Systems

dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans, TU Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Systems

dr. W.D. (Wouter) van Marken Lichtenbelt, Universiteit van Maastricht, faculteit Humane Biologie

prof.dr.ir. M.H. (Martin) de Wit, TU Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Systems

Door toepassing van het exergie concept (lowex) in de gebouwde omgeving kan het gebruik voor hoogwaardige energiebronnen gereduceerd worden. Echter, de toepassing van dergelijke systemen kan resulteren in discomfort, zowel op lichaamsniveau (globaal) als op lokaal niveau. Dit discomfort kan veroorzaakt worden door de combinatie van verschillende niet-uniforme omgevingscondities. Tevredenheid van de gebruikers is echter cruciaal voor het succesvol toepassen van lowex HVAC systemen. Daarom is het van belang om het comfort van de individuele gebruikers onder niet-uniforme en dynamische condities te kunnen voorspellen. [inleiding, vetgedrukt]

Inleiding [kop 1^e niveau]

De laatste jaren is steeds duidelijker geworden dat er een noodzaak bestaat om het energiegebruik in gebouwen te reduceren. Ongeveer een derde van het totale wereldwijde energiegebruik wordt gebruikt voor het verwarmen, koelen en ventileren van gebouwen. De focus bij het verminderen van dit energiegebruik ligt voornamelijk op de vermindering van de inzet van hoogwaardige energiebronnen.

Exergie is een relatief nieuw begrip binnen de bouwkunde. In de bouwpraktijk wordt voornamelijk de term ‘energiegebruik’ gebruikt. Echter, energieanalyses geven onvoldoende inzicht om onze systemen nog verder te verbeteren; veel systemen hebben al een energie-efficiëntie van bijna 100%. De kwaliteit van de energiebron daarentegen degradeert altijd in een bepaalde mate, ondanks dat de energie-efficiëntie 100% bedraagt. Met behulp van een exergieanalyse kan inzicht verkregen worden in het kwaliteitsverlies van de energie, zodat onze systemen verder verbeterd kunnen worden met als doel een verminderd dan wel efficiënter gebruik van hoogwaardige energiebronnen.

Naast bovenstaande ontwikkelingen worden ook steeds hogere eisen gesteld aan het thermisch comfort en de gezondheid van gebruikers. In een eerder onderzoek dat verricht werd in het kader van de IEA Annex 37 bleek dat een optimaal exergiegebruik niet altijd leidt tot een verhoogd comfortniveau, maar het in sommige gevallen juist moeilijker is om thermisch comfort te bewerkstelligen [1].

Niet-uniforme omgevingscondities, welke kunnen ontstaan door toepassing van laag exergetische systemen, kunnen discomfort veroorzaken. Discomfort (globaal en lokaal) kan ontstaan door bijvoorbeeld ongewenste luchtstromingen (zoals bij natuurlijke ventilatie in combinatie met lage temperatuur verwarming), plaatselijke verschillen in thermisch comfort en temperatuurfluctuaties. De luchtstromingen die ontstaan kunnen kritisch zijn, zowel voor situaties waarin verwarmd wordt (bijvoorbeeld een koudevalsituatie waarbij compensatie in de vorm van lage temperatuurvloerverwarming aanwezig is [2]) ,als voor situaties waarin gekoeld wordt.

Een goed thermisch comfort is een voorwaarde voor het succesvol toepassen van laag exergetische systemen. Momenteel is echter onvoldoende kennis aanwezig met betrekking tot het ontwerpen van laag exergetische warmte- en koude-afgiftesystemen in relatie tot een goed thermisch comfort. Meer kennis is benodigd met betrekking tot de interactie tussen het systeem, het binnenklimaat en het menselijk lichaam om optimale systemen te kunnen ontwerpen.

Het overkoepelende doel van het promotieonderzoek is daarom het ontwikkelen en valideren van een methode voor het voorspellen van het thermisch comfort van gebruikers onder niet-uniforme en niet-stationaire (dynamische) omgevingscondities.

Het voorspellen van thermisch comfort [kop 1^e niveau]

Tijdens de ontwerpfase van een gebouw is het zinvol om het comfort van de toekomstige gebruikers te voorspellen. Meestal wordt hiervoor het PMV/PPD model van Fanger gebruikt. Echter, verschillende studies hebben uitgewezen dat dit model beperkingen kent. Het optimale thermisch comfort blijkt niet per definitie gelijk te zijn aan een thermisch neutrale situatie, zoals verondersteld wordt door het PMV/PPD model. Voorkeuren voor een niet neutrale thermische sensatie zijn gebruikelijk (denk bijvoorbeeld aan luchtbeweging onder warme zomerse omstandigheden). Daarnaast blijkt dat lage en hoge PMV-waarden niet altijd discomfort representeren. Kort durende overshoots, warm en/of koud, kunnen juist resulteren in een situatie die als comfortabeler beoordeeld wordt dan wanneer een persoon blootgesteld wordt aan een constante 'optimale' temperatuur. Om dit fenomeen te beschrijven introduceerde [3] de term 'alliesthesia'. Bovendien hebben verschillende onderzoeken laten zien dat de optimale thermische condities voor ouderen niet gelijk zijn aan de optimale condities voor jonge personen [4]. Ook het geslacht heeft een invloed op het thermisch comfort. In het algemeen zijn vrouwen, in tegenstelling tot mannen, gevoeliger voor kou en afwijkingen (zowel naar de warme als naar de koude kant) ten opzichte van de optimale condities. Dikwijls prefereren vrouwen een hogere temperatuur dan mannen [5] [6]. Dit in tegenstelling tot resultaten die in [7] gepresenteerd zijn. Uit deze resultaten blijkt namelijk dat de optimale thermische condities voor jongeren en ouderen en voor mannen en vrouwen niet van elkaar verschillen.

Door de karakteristieken van de inputparameters is het PMV/PPD model van Fanger niet geschikt voor het voorspellen van het thermisch comfort voor niet-uniforme parameters. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk om een verticale temperatuurstratificatie te modelleren omdat de luchttemperatuur gedefinieerd is als gemiddelde luchttemperatuur. Voor dergelijke niet-uniforme omstandigheden zijn aanvullende voorwaarden gedefinieerd in de vorm van comfortdiagrammen, waarmee uitspraken gedaan kunnen worden over het te verwachte discomfort. Echter, in sommige gevallen

lijken deze voorwaarden conservatief te zijn en is de aanwezigheid van een bepaalde mate van discomfort niet altijd oncomfortabel (zoals luchtbeweging in een warme omgeving). Daarnaast ligt de focus bij deze aanvullende voorwaarden op individuele niet-uniforme condities (bijvoorbeeld alleen het effect van een verticale temperatuurgradiënt). De verwachting is echter dat juist een combinatie van verschillende niet-uniforme condities kan leiden tot discomfort, terwijl de individuele condities binnen de comfortrange liggen.

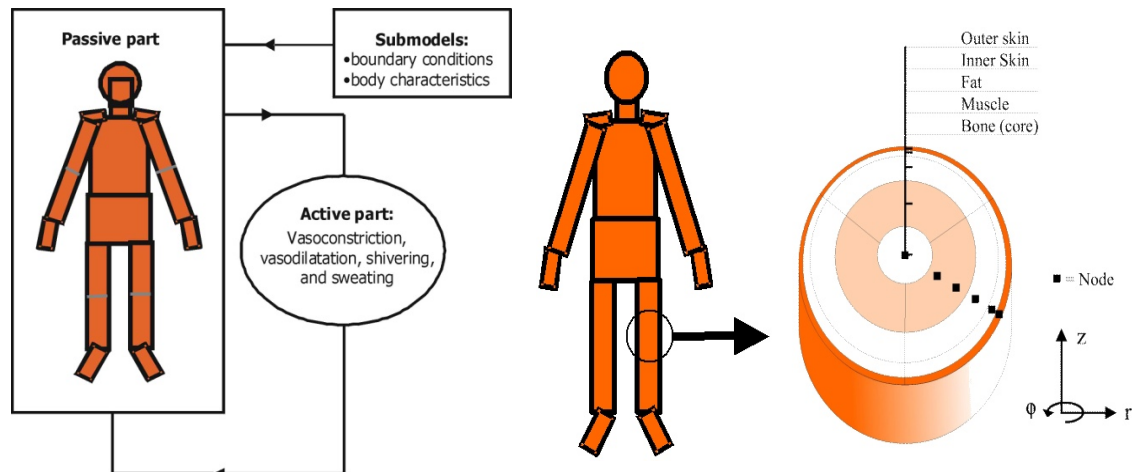
In het algemeen kan, op basis van de aangehaalde referenties, geconcludeerd worden dat het PMV/PPD model geschikt is voor het voorspellen van het thermisch comfort van een grote groep personen onder uniforme nagenoeg neutrale omstandigheden, waarbij de personen onderling niet veel van elkaar verschillen (fysiologisch gezien). De vraag resteert hoe het thermisch comfort voorspeld kan worden onder condities die niet-uniform zijn (gecombineerde effecten), niet neutraal of in gebouwen waar de gebruikers significant van elkaar verschillen met betrekking tot leeftijd, geslacht of lichaamsbouw.

Door gebruik te maken van een thermofysiologisch model, bijvoorbeeld ThermoSEM, is het mogelijk om gedetailleerd de fysiologische responsies te voorspellen onder gecombineerde asymmetrische randvoorwaarden [8]. Daarnaast is het met behulp van dit model mogelijk om rekening te houden met individuele lichaamskarakteristieken. Het huidige onderzoek richt zich onder andere op het voorspellen van de randvoorwaarden ten aanzien van de omgevingsparameters (lucht- en stralingstemperatuur en luchtsnelheden) die benodigd zijn voor het voorspellen van de fysiologische responsies (lokale huidtemperaturen en kerntemperatuur). Tevens wordt de koppeling onderzocht van fysiologische responsies met thermische sensatie en thermisch comfort.

Thermofysiologisch model [kop 1^e niveau]

Voor het voorspellen van lokale huidtemperaturen en kerntemperatuur wordt gebruik gemaakt van het dynamische numerieke thermofysiologische rekenmodel ThermoSEM [8], zie figuur 5. Dit model beschikt over een passieve en een actieve component. In het passieve gedeelte van het model wordt zowel de warmtehuishouding in het lichaam gemodelleerd als de warmte-uitwisseling met de omgeving. De warmte-uitwisseling tussen de verschillende elementen in het lichaam vindt plaats door middel van bloedcirculatie (convectief warmtetransport), warmtegeleiding (conductie), interne warmteproductie en warmteaccumulatie. Het model staat in wisselwerking met de omgeving door convectie, straling (kortgolvig en langgolvig) en verdamping. In het passieve gedeelte van het model wordt ook rekening gehouden met de positie van het lichaam (zittend of staand) en de bijbehorende zichtfactoren. Daarnaast kunnen ook de thermische en hygrische eigenschappen van de kleding meegenomen worden. Binnen het model is het menselijk lichaam verdeeld in 18 cilinders en een bol (figuur 5a). Elke cilinder inclusief de bol is opgebouwd uit verschillende lagen die de verschillende weefsellagen representeren. Daarnaast is elke cilinder opgedeeld in drie sectoren (anterieur, posterieur en inferieur). Het verschil in deze sectoren bestaat uit de manier waarop ze straling ontvangen van andere delen van het lichaam en de omgeving. Door verschillende sectoren te definiëren is het mogelijk om asymmetrische omgevingscondities te modelleren.

De actieve component simuleert de fysiologische responsies van het thermoregulatiesysteem: vasomotie, zweetuitscheiding en verhoging in het metabolisme veroorzaakt door het rilmechanisme. De grootste voordelen van dit model zijn dat de effecten van asymmetrische omgevingscondities gemodelleerd kunnen worden en dat er rekening gehouden kan worden met individuele lichaamskarakteristieken (onder andere lengte, gewicht en vetpercentage).



[Figuur 1]

Schematische weergave van het ThermoSEM model. a: thermoregulatieschema; b: passieve component

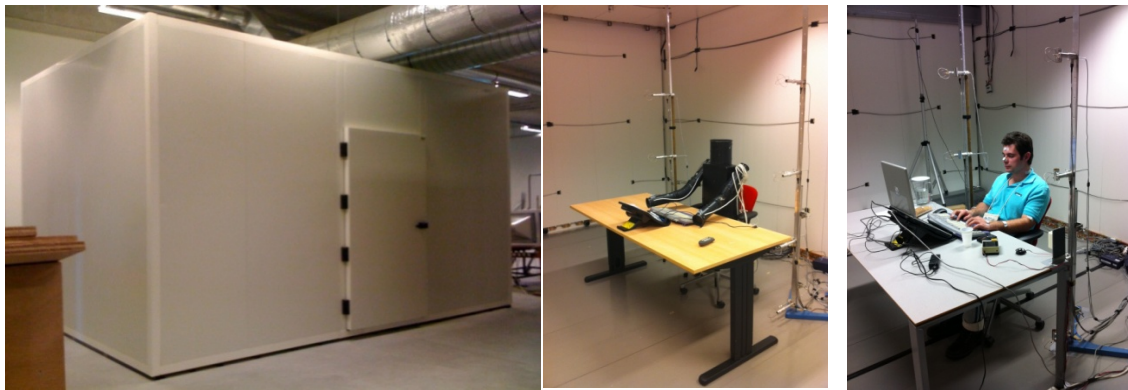
In onderzoek verricht door [9] en [10] is het model gebruikt voor het simuleren van de fysiologische responsies onder gematigde niet-uniforme en dynamische omstandigheden. De resultaten zijn vergeleken met metingen aan proefpersonen onder laboratoriumcondities. Hieruit is gebleken dat het model grote potentie heeft om toe te passen binnen de gebouwde omgeving voor het voorspellen van de fysiologische responsies en daaruit volgend het thermisch comfort onder uniforme, niet-uniforme en dynamische omstandigheden. Echter, er dienen nog enkele verbeteringen gedaan te worden aan het model. Een belangrijk aspect is het definiëren van de randvoorwaarden. Het model blijkt zeer gevoelig te zijn voor luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit, zowel op het totale lichaamsniveau als op lokaal niveau. Om deze randvoorwaarden nabij de persoon nauwkeurig te kunnen voorspellen wordt gebruik gemaakt van Computational Fluid Dynamics (CFD). Aan de hand hiervan wordt eveneens vastgesteld hoe gedetailleerd een dergelijk CFD model dient te zijn voor het voorspellen van de fysiologische responsies.

Op fysiologisch niveau zijn verbeteringen behaald ten aanzien van de actieve component door onder andere [11] en [12]. In het bestaande model werden voor onder andere vasoconstrictie in de huid voornamelijk op regressie gebaseerde vergelijkingen gebruikt. In het nieuwe model zijn deze vergelijkingen gebaseerd op fysiologische principes. Toekomstige verbeteringen kunnen, onder andere, behaald worden door het verbeteren van het modelleren van de randvoorwaarden. Daarnaast dient wellicht ook onderscheid gemaakt te worden tussen mannen en vrouwen.

Voor het onderzoeken van de invloeden van niet-uniforme omgevingscondities op het thermisch comfort en de fysiologische responsies wordt gebruik gemaakt van een klimaatkamer; de zogenaamde thermofysiologische testruimte (TFT-kamer).

Thermofysiologische testruimte [kop 1^e niveau]

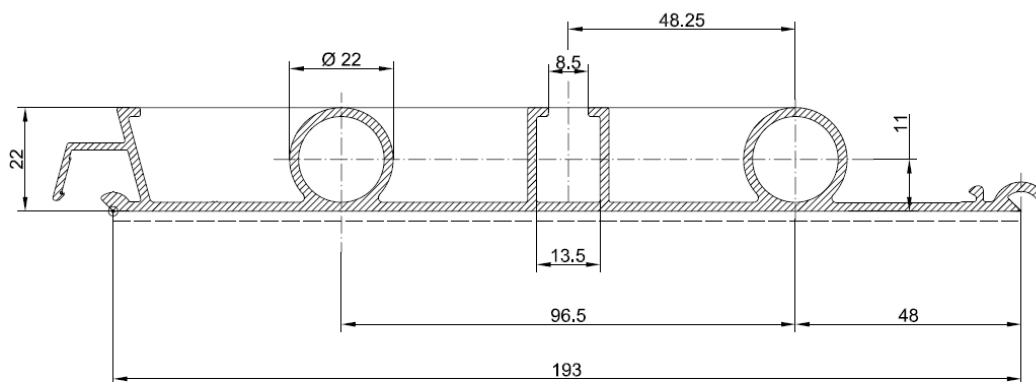
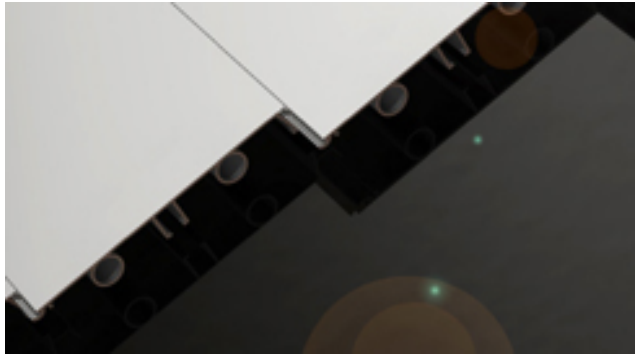
Voor het onderzoeken van de effecten van thermische niet-uniforme omgevingscondities is een speciale klimaatkamer ontworpen, zie figuur 1. De testruimte staat in het laboratorium van de unit Building Physics and Systems van de faculteit bouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven. De binnenafmetingen van de ruimte zijn gelijk aan een standaard kantoorruimte: 3,6x5,4x2,7m³ (BxLxH). De deur is in het midden van de lange wand geplaatst, waardoor de ruimte symmetrisch is, hetgeen een voordeel is voor het numeriek modelleren van de ruimte. Eveneens is dit een voordeel wanneer de laser-doppler anemometer in de toekomst gebruikt zou worden voor het meten van de luchtstroming en turbulentie in de ruimte. Het traverseersysteem van de laser kan voor de deuropening geplaatst worden, waardoor de gehele ruimte in kaart gebracht kan worden.



[Figuur 2]

Impressie van de thermofysiologische testruimte

De testruimte is opgebouwd uit een goed geïsoleerde “koel”cel (wanddikte 100mm [13]). In de ruimte kan de temperatuur van elk vlak (wanden, plafond en vloer) individueel geregeld worden binnen een range van 11 tot 35°C, zodat stralingsasymmetrieën bestudeerd kunnen worden. Om dit te realiseren is gebruik gemaakt van een watergebaseerd verwarmings- en koelsysteem. Alle vlakken zijn opgebouwd uit een modulair systeem van geëxtrudeerde aluminiumprofielen die ontworpen en geproduceerd zijn door Triple Solar, zie figuur 2 [14]. De belangrijkste voordelen van dit systeem zijn onder andere dat het systeem gebruikt kan worden voor zowel koeling als verwarming (koud en warm water kan door de leidingen getransporteerd worden), het systeem een korte responsietijd heeft en relatief goedkoop is. De draagkracht van de panelen is voldoende om de panelen direct op een vloerconstructie te plaatsen.



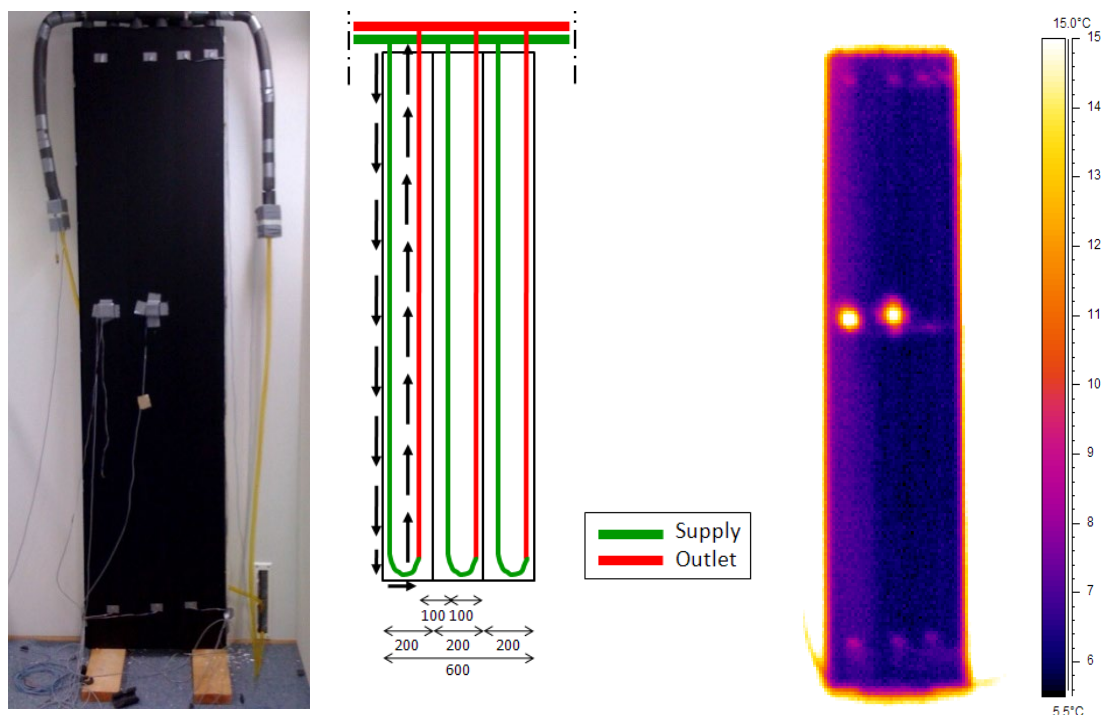
[Figuur 3]

Schematische doorsnede modulair oppervlaksysteem [14]

Een wand bestaat uit verschillende elementen die gecombineerd worden tot een vlak. Elk element is opgebouwd uit drie profielen (breedte 193mm), elk voorzien van één toe- en afvoerleiding. Het prinseschema van een element is weergegeven in figuur 3b. Om een gelijkmatige temperatuurverdeling over een vlak te verkrijgen en om te voorkomen dat er een luchtstroming ontstaat tussen de toe- en afvoerleidingen (convectieve ‘kortsluiting’), is de ruimte tussen de leidingen op enkele hoogten geïsoleerd. Voor het koelen van het water wordt gebruik gemaakt van de aquifer die aanwezig is op de TU/e-campus, hiermee wordt een range behaald van 11 tot 17°C. Daarnaast is er rekening gehouden met de aansluiting van een koelmachine waardoor de range vergroot kan worden. Het verwarmen van het water vindt plaats via een boiler.

Voordat de klimaatkamer gebouwd werd, is een testelement onderzocht, opgebouwd uit drie profielen (0,6x2,7m², BxL). Aan de hand van dit testpaneel is de temperatuurverdeling over het paneel onderzocht. In figuur 3a is een impressie van het testpaneel weergegeven. De testen zijn verricht bij een luchttemperatuur van 24°C en een relatieve luchtvochtigheid van 40%. De temperatuur van het toevoerwater bedroeg 5,5°C bij een debiet van ±8.5 l/min. Het drukverschil tussen de toe- en afvoerleiding bedroeg 0,012±0,002 bar. De resultaten laten zien dat het maximale temperatuurverschil optreedt tussen het middelpunt aan de linkerzijde van het element en het middelpunt van het middelste profiel; het maximale temperatuurverschil tussen deze twee punten bedraagt 1,1°C. De twee punten die als warm weergegeven worden op de infraroodopname (figuur 3c) zijn twee temperatuursensoren die afgedekt zijn met polystyrenschuim, zodat ze geen invloed ondervonden van de

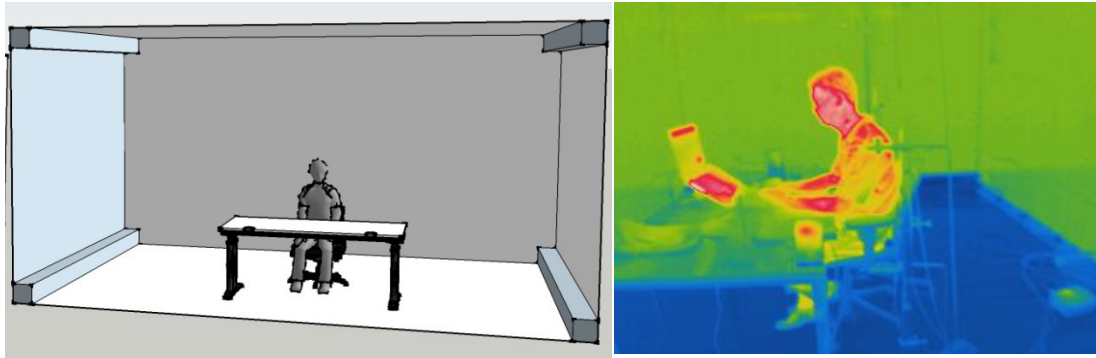
stralingstemperatuur van de omgeving. Het temperatuurverschil dat optreedt is hoogst waarschijnlijk veroorzaakt door een obstructie ter plaatse van de koppeling (las) van de hoofdtoevoerleiding en de toevoerleiding van het profiel. Tijdens de realisatie van de klimaatkamer is ervoor gezorgd dat dergelijke obstructies niet zouden voorkomen.



[Figuur 4]

Testpaneel (a), schematische weergave stroming (b) infraroodopname (c)

Voor het bestuderen van verschillende ventilatieprincipes en de effecten van verschillende luchtsnelheden zijn in de klimaatkamer twee typen ventilatiesystemen geïmplementeerd: mengventilatie en verdringingsventilatie. Voor het toevoeren van de ventilatielucht is gebruik gemaakt van drukdozen. In totaal zijn er vier drukdozen $100 \times 3600 \times 100 \text{ mm}^3$ (BxLxH) geïnstalleerd aan de onder- en bovenkant van de korte zijden van de kamer (figuur 4a). Met behulp van deze drukdozen wordt er voor gezorgd dat de lucht evenredig verdeeld over de breedte van de kamer ingeblazen wordt. De drukdozen kunnen zowel als inlaat en uitlaat gebruikt worden. Daarnaast kan de spleethoogte met stappen van 1 cm gevarieerd worden binnen een range van 1 tot 20 cm. Bovendien kunnen in de drukdozen ventilatieroosters geplaatst worden om zo bijvoorbeeld natuurlijke ventilatie te simuleren. Het ventilatiedebiet kan gevarieerd worden tot maximaal 170 l/s ($612 \text{ m}^3/\text{uur}$) en het aandeel verse lucht kan ook ingesteld worden. De toegevoerde lucht kan bevochtigd worden tot 10 kg/uur (RV 30-80%) met behulp van een ultrasoon bevochtiger. De temperatuurrange van de luchtbehandelingskast bedraagt 9 tot 45°C [15].



[Figuur 5]

Schematische weergave positie drukdozen in klimaatkamer (a), impressie van proefpersoon in klimaatkamer (b)

Validatie [kop 1^e niveau]

Voor de validatie van het CFD en thermofysiologisch model zijn vijf experimentele cases gedefinieerd. Deze cases zullen ook gebruikt worden voor het ontwikkelen en valideren van een methode voor het voorspellen van het thermisch comfort van gebruikers onder niet-uniforme en niet-stationaire (dynamische) omgevingscondities. De niet-uniforme condities zijn beperkt tot de temperatuur (luchttemperatuur, operationele temperatuur en stralingstemperatuur) en luchtsnelheid (inclusief turbulentie-intensiteit). De overige parameters, zoals de relatieve luchtvochtigheid en verlichtingssterkte worden gelijk gehouden gedurende elke case. Op deze manier is het mogelijk om mogelijke neveneffecten ten gevolge van andere parameters uit te sluiten. Binnen de cases is een onderscheid gemaakt in een winter- en zomersituatie (cases met verwarming en cases met koeling). Daarnaast worden ook twee verschillende ventilatieprincipes onderzocht: meng- en verdringingsventilatie. In het navolgende worden de verschillende cases besproken.

Voor de wintersituatie zijn twee verschillende cases gedefinieerd:

- *Lage temperatuur vloerverwarming* in combinatie met *natuurlijke ventilatie*
- *Lage temperatuur vloerverwarming* in combinatie met mengventilatie en een groot koud vlak dat *koudeval* veroorzaakt

Voor de zomersituatie zijn drie cases gedefinieerd:

- *Passieve koeling* met behulp van een verhoogde luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit door middel van mengventilatie (in deze case wordt geen actieve koude toegevoerd)
- *Actieve koeling* door middel van *convectie*; in deze cases wordt koude lucht door middel van meng- en verdringingsventilatie toegevoerd om te koelen
- *Actieve koeling* door middel van *straling*; hierbij wordt de vloer of het plafond (beide zijn onderzocht) gekoeld in combinatie met meng- of verdringingsventilatie (enkel voor het toevoeren van verse lucht, de inblaasttemperatuur is gelijk aan de ruimtetemperatuur)

De metingen zijn uitgevoerd in de periode van december 2010 tot en met juli 2011. In totaal hebben er 30 personen deelgenomen aan de experimenten (10 vrouwen en 20 mannen).

Conclusie [kop 1^e niveau]

Volgend uit het voorgaande is het doel van dit onderzoek het ontwikkelen van een methodiek waarmee het thermisch comfort (zowel op lichaamsniveau als op lokaal niveau) beoordeeld kan worden onder dynamische en niet-uniforme omstandigheden. Daarnaast is het van belang om hierin individuele karakteristieken (geslacht, leeftijd, lichaamsbouw, etcetera) te kunnen meenemen, omdat is gebleken dat deze een invloed kunnen hebben op het thermisch comfort. Modellen die gebaseerd zijn op regressievergelijkingen, zoals bijvoorbeeld het PMV/PPD model, zijn niet geschikt om dergelijke effecten mee te nemen. Fysiologisch gebaseerde modellen, zoals ThermSEM, zijn daarentegen wel in staat om dergelijke effecten mee te nemen. In dit promotieonderzoek wordt onderzocht hoe fysiologische responsies gekoppeld kunnen worden aan thermisch comfort [2] [16].

Dankbetuiging [kop 1^e niveau]

Dit onderzoek wordt gefinancierd door AgentschapNL (voorheen SenterNovem) onder projectnummer EOS LT02003. Daarnaast willen de auteurs graag het personeel van het laboratorium van de Unit Building, Physics and Systems aan de Technische Universiteit Eindhoven bedanken voor hun inzet tijdens het ontwerp en de realisatie van de klimaatkamer. Speciale dank gaat uit naar installatiebureau Kropman voor hun ondersteuning bij het ontwerp en de realisatie van de installaties.

Bronnen [kop 1^e niveau]

- [1] Juusela, M.A. (Ed.) *Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort*, Guidebook to IEA ECBCS Annex 37, Low Energy Systems for Heating and Cooling of Buildings, VTT Building and Transport, Espoo, 2003
- [2] Timmers, S. *Afstudeeronderzoek: Ontwerprichtlijnen ter voorkoming van koudeval*, Technische Universiteit Eindhoven, 2011
- [3] de Dear, R. *Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia*, Building Research & Information, Vol. 39(2), pp 108-117, 2011
- [4] Schellen, L., van Marken Lichtenbelt, W., Loomans, M., Toftum J., de Wit, M.H. *Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition*, Indoor Air, Vol. 20, pp 273-283, 2010
- [5] Parsons, K.C. *The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort*, Energy and Buildings, Vol. 34, pp 593-599, 2002
- [6] Karjalainen, S. *Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments*, Building and Environment, Vol. 42, pp 1594-1603, 2007
- [7] ASHRAE, *ASHRAE Handbook 2009 Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2009
- [8] van Marken Lichtenbelt, W.D., Frijns, A.J.H., van Ooijen, M.J., Fiala, D., Kester, A.M., van Steenhoven, A.A. *Validation of an individualized model of human thermoregulation for predicting responses to cold air*, International Journal of Biometeorology, Vol.51, pp 169-179, 2007
- [9] van Oeffelen, E.C.M., Loomans, M.G.L.C., de Wit, M.H., van Marken Lichtenbelt, W.D., Frijns, A.J.H. *Application of a thermophysiological model for assessing non-uniform thermal environments*, Proceedings of the International Conference Indoor Air 2008, Copenhagen, Denmark, 17-22 August 2008

- [10] Schellen, L., van Marken Lichtenbelt, W., de Wit, M.H., Loomans, M., Frijns, A., Toftum, J. *Thermal comfort, physiological responses and performance during exposure to a moderate temperature drift*, Proceedings of the International Conference Indoor Air 2008, Copenhagen, Denmark, 17-22 August 2008
- [11] Severens, N.M.W., van Marken Lichtenbelt, W.D., Frijns, A.J.H., Kingma, B.R.M., de Mol B.A.J.M., van Steenhoven A.A. *Measurement of model coefficients of skin sympathetic vasoconstriction*, *Physiological Measurement*, Vol. 31, pp 77-93, 2010
- [12] Kingma, B.R.M., Frijns, A.J.H., Saris, W.H.M., van Steenhoven, A.A., van Marken Lichtenbelt, W.D. *Modeling Skin Blood Flow During Cold Exposure: A Neurophysiological Approach*, in review, 2011
- [13] Gelderman koel- en vriescellen bouw, <http://www.gelderman-kvb.nl>, laatst bezocht op 12.09.2011
- [14] Triple Solar, <http://www.triplesolar.eu>, laatst bezocht op 12.09.2011
- [15] Verhulst Klimatechniek b.v. <http://www.verhulst.com>, laatst bezocht op 12.09.2011
- [16] Kingma, B.R.M., Schellen, L., Frijns, A.J.H. van Marken Lichtenbelt, W.D. *Thermal sensation: A mathematical model based on neurophysiology*, in review, 2011