

De mens als eigen sensor voor comfort

Dit artikel presenteert een nieuwe strategie voor de automatische regeling van individuele verwarming in licht koele kantooromgevingen, waarbij het menselijk lichaam als sensor wordt gebruikt in de klimaatregeling. De temperatuur van de bovenste extremiteiten, zoals vingers, handen, neus en voorhoofd, worden op afstand geregistreerd door infrarood (IR) thermografie en kunnen zo dienst doen als sensoren. Deze waarnemingen dienen als ingangssignaal voor de temperatuurregeling. Doel is het energiegebruik te verminderen met handhaving van het ondervonden thermisch comfort door de individuele gebouwgebruiker. Dit moet leiden tot nieuwe Smart Energy Systems, die met behulp van draadloze sensoren nieuwe, slimmere regelingen toepassen om de energievraag te reduceren. Tot 17% energiebesparing is mogelijk terwijl de gebruiker een optimaler individueel thermisch comfort ervaart.

D.R. (Derek) Vissers, prof.ir. (Wim) Zeiler, ir. G. (Gert) Boxem, H.D. (Michal) Veselý, J.C.G. (Jacob) Verhaart; Faculteit Bouwkunde, unit Building Physics and Services

Verwarming en koeling voor een algemeen aanvaardbaar thermisch comfort gaat gepaard met grote hoeveelheden energiegebruik, bijna 40% van het totale energiegebruik. Het verminderen of optimaliseren van energiegebruik gebeurt vaak zonder rekening te houden met het doel ervan, menselijk comfort. Maar dit kan gevolgen hebben voor de productiviteit van de werknemers in kantoorgebouwen. Er is namelijk een relatie tussen productiviteit en binnenklimaat [Clements-Croome and Baizan 2000, Wyon 2000, Fisk & Seppänen 2007, Lan et al. 2011]. Het is daarom belangrijk vanuit het perspectief van de organisatie-efficiëntie te kijken naar een optimaal thermisch comfort. Daarnaast kan energiebesparing alleen

worden bereikt als het individuele comfort van gebruikers wordt meegenomen [De Groot et al 2008]. De energie-efficiëntie optimaliseren zonder rekening te houden met de gebruiker werkt niet [Nicol 2007]. Het menselijk gedrag is een belangrijke factor bij het resulterende energiegebruik van een gebouw [Palme et al. 2006]. De mogelijkheid voor gebruikers om zelf hun omgeving te kunnen beïnvloeden naar eigen voorkeur is een kritische factor voor de tevredenheid van de mensen [Isalque et al. 2006]. Dit leidt tot de noodzaak om de regelingen voor het comfort te optimaliseren in relatie tot de energie die daarvoor nodig is. In diverse publicaties is gebleken dat energiereductie mogelijk is door automatisch

geregelde comfortinstallaties met een smalle bandbreedte volgens algemene definities van thermisch comfort, zoals de BS EN ISO 7730 en ANSI/Ashrae 55-92 [Daum et al. 2011]. In plaats van te zoeken naar efficiëntere manieren om traditioneel comfort te realiseren is het verstandig om ook een debat over de betekenis van thermisch comfort te voeren [Chappells en Shove 2005]. In de afgelopen tien jaar heeft er een paradigmaverschuiving in het begrip van thermisch comfort plaats gebonden volgens de Dear [de Dear 2011] en het 'thermisch comfort mantra' is ter discussie gesteld. Als gevolg daarvan worden er nieuwe benaderingen ontwikkeld voor individuele comfort op basis van de fysiologische effecten [Kingma

2012, Schellen 2012]. Sommige oude en nieuwe technologieën en benaderingen voor comfortlevering in gebouwen moeten worden heroverwogen door het ter discussie stellen van de algemeen aanvaarde comfortuitgangspunten [de Dear 2011]. In plaats van een algemeen gemiddeld comfort is het wellicht beter en efficiënter om een meer individuele benadering te kiezen. Individueel geregelde comfortsystemen zijn onderzocht [Filippini 2009, Wanatabe et al. 2010]. Ze kunnen deels omgaan met de individuele verschillen bij mensen. Deze systemen richten zich op die lichaamsdelen (handen, voeten en hoofd) die het thermische ongemak in licht koele of warme kantooromgevingen hoofdzakelijk bepalen.

■ MENSELIJK COMFORT EN KLIMAATBEHEERSING

Een van de hoofddoelstellingen van een verwarmings-, ventilatie- en airconditioningsysteem is het bewerkstelligen van een thermisch comfortabele omgeving. Een comfortabel binnenmilieu voor alle mensen in een gebouw is moeilijk te bereiken doordat personen individueel veel van elkaar verschillen. In de literatuur wordt geconcludeerd dat individuele verschillen, waaronder: leeftijd [Oeffelen 2007], geslacht [Karjalainen 2007, Choi et al. 2010], percentage lichaamsvet [Zhang et al., 2001], metabolisme [Havenith et al., 2002] en kledingweerstand [De Carli et al. 2007], van belang zijn voor het individueel ervaren thermisch comfort. Het recente onderzoek op menselijke comfort kijkt naar lokale sensaties van individuele lichaamsdelen [Zhang et al. 2010] en thermoregulatie met voorspellingen van huidtemperatuur [Munir et al. 2009]. De interactie tussen binnencondities en huidtemperatuur wordt bij normale kantoren grotendeels bepaald door de gemiddelde stralingstemperatuur en er is een groot effect van de gemiddelde stralingstemperatuur op het energiegebruik in een comfort gecontroleerd kantoor [Kang et al. 2010]. Energiebesparingen van ongeveer 25% zijn mogelijk door lokale individuele verwarming toe te passen. De energievoorziening van een gebouw moet worden gerelateerd aan de werkelijke, dynamisch veranderende comfortbehoeften, gedrag van de gebruikers van het gebouw en het gedrag van het gebouw zelf vanwege de weersomstandigheden. Daarvoor is meer feitelijke informatie nodig. De toepassing van goedkope draadloze sensoren biedt nieuwe praktische mogelijkheden [Neudecker 2010, Gameiro Da Silva et al. 2010]. Het meten van de stralingstemperaturen door een goedkope infraroodcamera moet het mogelijk maken de energiestromen en temperatuurverdeling te bepalen. Juiste tem-

Field of view/min. focus distance	24°x18°/0,3 m
Spatial resolution (IFOV)	1,3 mrad
Image frequency	60 Hz
Thermal sensitivity @ 50/60 Hz	0,08°C at 30°C
Electric zoom function	2,4 interpolating
Focus	automatic or manual
Digital image enhancement	normal and enhanced
Detector type	Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer 320x240 pixels
Spectral range	7,5 to 13 µm

-Tabel 1- Eigenschappen van de gebruikte infraroodcamera's

peratuurverdelingen kunnen worden berekend door externe cameracontrole en thermografische parametercorrectie [Revel en Sabbatini 2010]. Thermisch comfort voor iedereen kan alleen worden bereikt wanneer gebruikers effectieve controle over hun eigen thermische omgeving hebben [Van Hoof 2008]. Dit leidde tot de ontwikkeling van individueel gecontroleerde systemen (ICS) met verschillende opties voor lokale verwarming en koeling [Filippini 2009, Wanatabe et al. 2010]. Er is een experimentele werkplek ontworpen met een individueel gecontroleerd verwarmings/koelingspaneel voor het testen van een specifieke benadering van comfort en energiebeheer.

■ ANALYSE VAN ERVAREN COMFORT

Bij het ontwerpen van een nieuw soort aansturing voor een comfortstelsel is het van belang om eerst te definiëren wat het te monitoren onderwerp moet zijn en welk doel daarmee bereikt moet worden. [Daum et al. 2011]. In eerder onderzoek is aangetoond dat de handen de meest gevoelige delen van het lichaam zijn voor wat betreft de thermoregulatie [Zhang 2003]. De huidtemperatuur van de vinger is een gevoelige indicator voor de thermische toestand van het lichaam in een mild koele omgeving [Wang et al. 2007]. Ook onderzoek naar thermisch comfort in auto's heeft aangetoond dat de huidtemperatuur gebruikt kan worden als maat voor de totale thermische sensatie [De Oliveira et al. 2009]. De handen en het gezicht zijn meestal onbedekt en de huidtemperatuur ervan kan dus op afstand bepaald worden. Er zijn individuele comfort systemen ontwikkeld, die zich richten op specifieke lichaamsdelen (handen, voeten en hoofd) om zo het thermische ongemak in voornamelijk licht koele kantooromgevingen te compenseren. Een directe conditionering van deze lichaamsdelen zou de meest effectieve manier kunnen zijn om lokaal het thermisch comfort te ver-

beteren. Een opzet voor een dergelijk concept is weergegeven in figuur 1. De metingen van huidtemperatuur van het gezichts- en handoppervlak (en daarmee de fysiologische reactie van het thermofysiologisch systeem) zijn uitgevoerd met behulp van twee infraroodcamera's (FLIR ThermoCAM S65-HS/S40), beide met een thermische gevoeligheid van 0,08 °C bij 30°C en een ruimtelijke resolutie van 320 x 240 pixels. Een infrarood spectraal bereik van 7,5-13 µm is toegepast en het object stralingsvermogen was ingesteld op 0.98. De camera's waren geplaatst voor de persoon. De eigenschappen van beide camera's zijn weergegeven in tabel 1.

De fysieke afmetingen hebben betrekking op de metingen van de lokale comfortparameters, zoals temperatuur van de lucht, luchtsnelheid en straling temperatuur én relatieve vochtigheid. Deze variabelen werden gemeten volgens ISO 7726. Op systeemniveau werden de oppervlaktetemperatuur van de stralingspanelen gemeten én die als geprogrammeerd in LABview [Vissers 2012] aan het algoritme van de Vermogenssturing verstrekt. Het energiegebruik van de stralingspanelen werd ook gemeten. ThermoCAM researcher [ThermoCAM 2004] werd gebruikt om de gegevens te verwerken. De infraroodbeelden werden geanalyseerd met behulp van matrixoperaties in Matlab (zie fig. 2, volgende pag.). Het menselijk lichaam kan zijn temperatuur met warmtestromen regelen door het vergroten of verkleinen van de doorbloeding van de huid. Bij een gematigd koele omgeving is vasoconstrictie het belangrijkste thermoregulatie effect, dat duidelijk kan worden waargenomen bij de bovenste ledematen en het gezicht. De variaties in de huidtemperatuur van het gelaat geven bovendien ook aan dat een persoon het steeds warmer of koeler krijgt. De uitdaging voor een automatische regeling van verwarming is om het omslagpunt te ontdekken van een neutrale thermisch beleving naar een koele thermische beleving, voordat

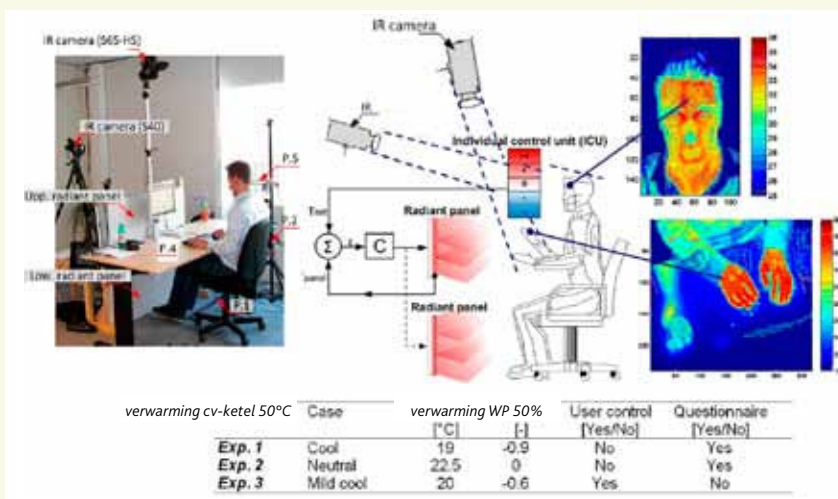
de gebruiker zich daarvan bewust is. Het feit dat de huidtemperatuur binnen een temperatuursgebied kan fluctueren zonder problemen te geven voor de thermische sensatie (dat wil zeggen, in de thermoneutrale zone) is hierbij erg nuttig.

EXPERIMENT I Gebruiker geregelde instelling eerste 'proof-of-principle experiment'

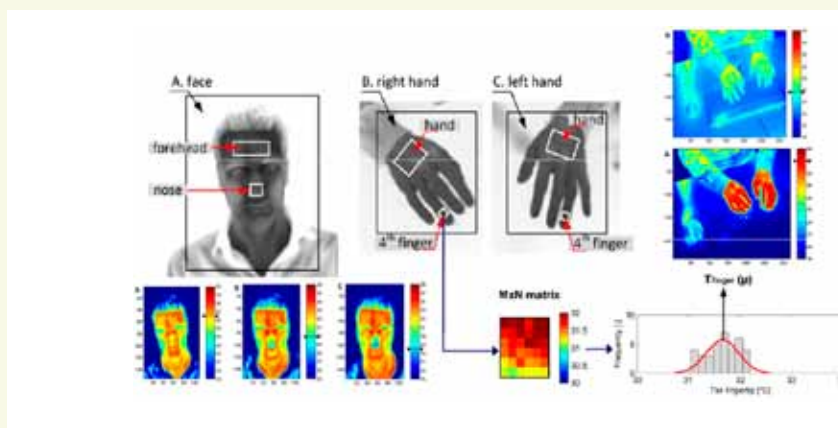
Er is een aantal experimenten uitgevoerd waarbij de gebruiker in licht koele omgeving ($T_a = 19 \sim 20^\circ\text{C}$) zelf de instelling van de stralingspanelen regelde. Dit is gedaan om te bepalen of een dalende trend in huidtemperatuur van de handen of het gezicht kon worden waargenomen voordat de gebruiker de verwarming bediende. De enige interventie in het individuele thermische klimaat vond plaats door middel van de stralingspanelen. De panelen waren verticaal geplaatst voor het bureau en dus niet echt geoptimaliseerd voor verwarming van de handen, zie fig. 1. Twee proefpersonen namen deel aan dit onderzoek, een man en een vrouw. In dit experiment werd aangetoond dat de huidtemperatuur van de ringvinger een kritische indicator is van de thermische behaaglijkheidstoestand van een lichaam in een licht koele omgeving. Het meten van de stralingstemperaturen met een goedkope infraroodcamera moet het mogelijk maken een inschatting te maken van de energiestromen en temperatuurdistributie, en daarmee kan een voorspelling worden gedaan van het ervaren comfort. De temperatuurdistributie kan worden berekend door de camera-beelden te analyseren na een thermografische parametercorrectie [Revel en Sabbatini 2010].

EXPERIMENT II Automatische comfortaansturing

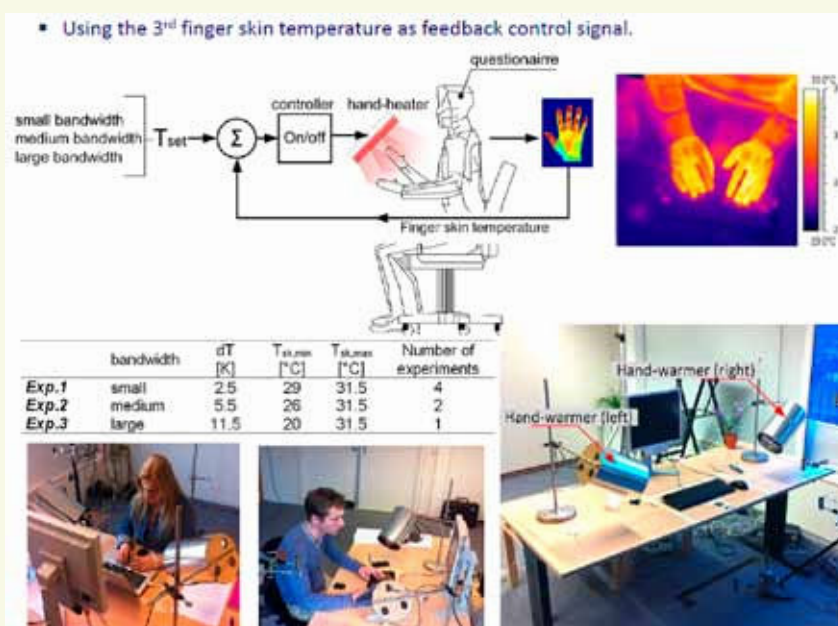
In een volgend experiment werd een verbeterd verwarmingssysteem toegepast dat de warmte geconcentreerd op de handen straalt. Het bestond uit twee Reflectorlampen (Philips R125 IR250) elk aan een kant naar beneden gericht, zie fig. 3. De temperatuur van de vinger, gemeten door IR-thermografie, werd als feedback signaal voor automatische regeling van het handstralingsverwarmingssysteem gebruikt bij het testen bij een kleine, middelgrote en grote temperatuursbandbreedte. De bandbreedte werd hierbij gedefinieerd aan de hand van de huidtemperaturen van de vingers. Bij het regelen van de vingertemperatuur binnen een kleine bandbreedte ($T_{sk} = 29\text{--}31.5^\circ\text{C}$), kon de regeling feed-forward reageren op de gebruikersvoorkeuren voor het thermisch comfort, terwijl de luchttemperatuur in de klimaatkamer werd verlaagd van 22 tot 19.5°C (fig. 4). Dus voordat



--Figuur 1- Experimentele opstelling van verwarming voor individueel thermisch comfort. Het lokale klimatiseringssysteem bestaat uit twee verticale straling panelen.



--Figuur 2- De kleuren van de afbeelding geven de transformatie in huidtemperaturen



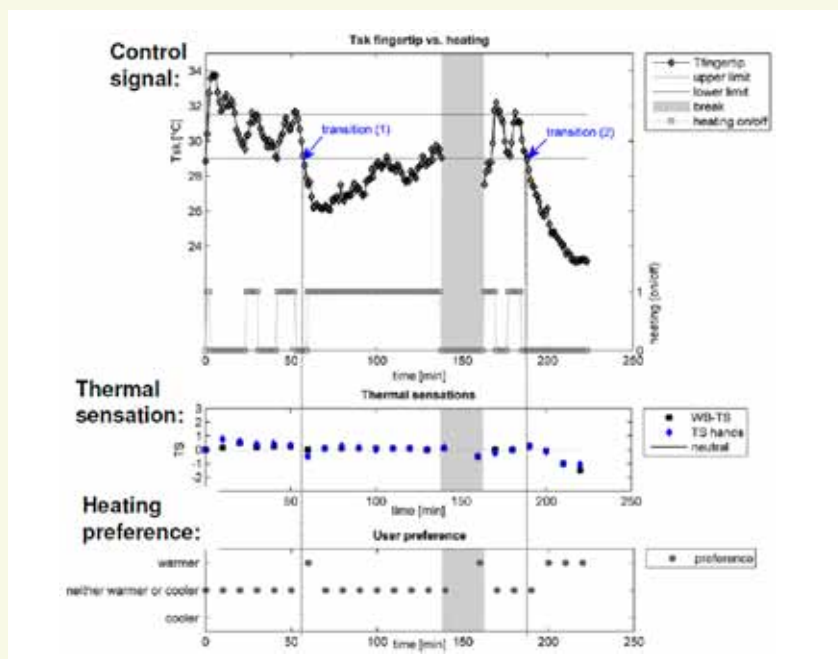
--Figuur 3- Lokale gecontroleerde verwarming door het gebruiken van de bovenste extremiteit huidtemperatuur als feedback-sigitaal. Gecontroleerde experimentele opstelling voor het meten van het effect van individueel extra radiatieve verwarming.

dat de proefpersoon zich koud voelde, dus voordat ongemak werd ondervonden, werd de verwarming ingeschakeld. Dit gebeurde op het moment dat de huidtemperatuur van de vinger een specifieke hellingsgraad naar beneden aangaf. De lokale en algehele thermische sensatie van de proefpersonen kon zo op het neutrale niveau of een iets hoger niveau gehouden worden en de personen verstelden de instellingen niet. Alleen bij overgangspunt 1 (transition (1), fig. 4) was de temperatuurdaaling te snel, waardoor de regeling niet snel genoeg reageerde. Bij punt 2 (transition (2), fig. 4) werd de verwarming uitgezet om te kijken naar het effect van het ontbreken van een extra individueel verwarmingssysteem. Een correlatie tussen de vingertemperatuur en de algehele sensatie is gevonden ($r^2 = 0,45$, $P < 0,05$). De persoonlijke voorkeuren, afgeleid uit de interactie van de regeling met de gebruiker, zijn gemodelleerd en zouden bij deze kleine bandbreedte van temperatuurregeling ook kunnen gelden voor andere personen.

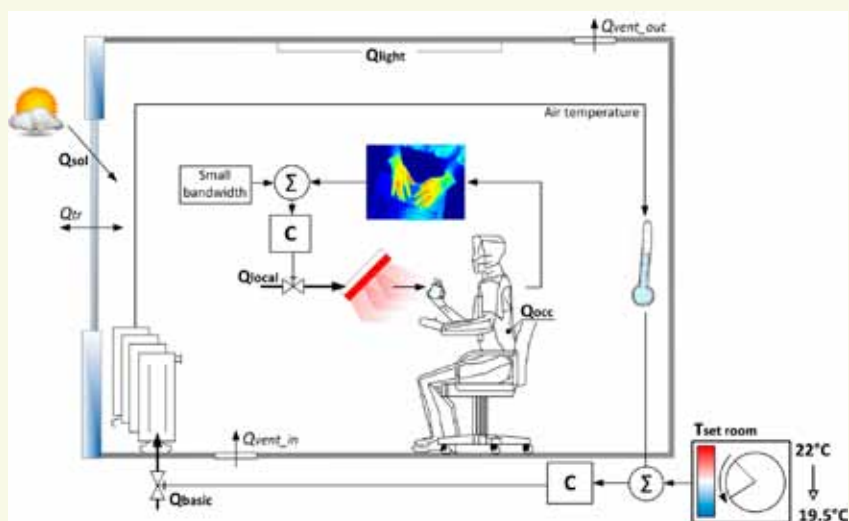
Wanneer het set-point voor de luchttemperatuur in de kamer kan worden verlaagd van 22 tot 19,5°C als lokale individuele verwarming wordt toegepast, is er minder energie nodig om de hele ruimte te verwarmen. Een simulatie is uitgevoerd met behulp van een gebouwmodel geprogrammeerd in de Matlab HAMBBase-omgeving voor het berekenen van het potentieel van energiebesparing. Als voorbeeld werd een typische modern kantoorgebouw in Nederland gekozen. De simulatieresultaten toonden een energiebesparingspotentieel van 17% voor verwarming door het verlagen van het set-point van de binnenlucht met inachtneming van een lokale stralingsverwarming van 98 W per werkplek (fig. 5).

CONCLUSIES

Gepresenteerd is een nieuwe strategie voor het automatisch regelen van individueel stralingsverwarming in licht koele kantooromgevingen door het menselijk lichaam als sensor te gebruiken. De oppervlaktehuidtemperatuur, op afstand geregistreerd met behulp van infraroodthermografie, wordt voorgesteld als feedback besturingsignaal. Het doel van deze nieuwe regelstrategie voor thermisch comfort is om het energiegebruik te verminderen, met het handhaven van thermisch comfort van de individuele gebruikers in een kantoorgebouw. Door te starten vanuit het menselijk perspectief en door nieuwe technologie te gebruiken, is het mogelijk om meer te sturen op kritische randvoorwaarden van de comfortbeleving van gebruikers. Met de aanpak van 'Human-in-the-loop' kan de energiebehoefte voor verwarmen met 17% worden verminderd. De resultaten



-Figuur 4- Bovenste extremititeit huidtemperatuur gecontroleerd in een kleine comforttemperatuurbandbreedte met twee overgangen uit de bandbreedte. Vingerooppervlakte huidtemperaturen (voortschrijdend gemiddelde) versus whole-body en lokale thermische sensatie en verwarmingsvoorkeuren.



-Figuur 5- Opzet van de regeling als gebruikt bij de simulatie

voor de berekende vermindering van de benodigde hoeveelheid energie zijn in lijn van de resultaten van [Hoyt et al. 2009]. De toepassing van nieuwe, draadloze sensoren maakt het mogelijk om op een slimmere manier met energie om te gaan. Deze zogenaamde Smart Energy Systems zullen in de toekomst verder ontwikkeld worden en op grote schaal worden toegepast.

DANKWOORD

Dit project wordt financieel ondersteund in

het kader van het NWO-STW programma Smart Energy Systems, alsmede door Kropman Installatietechniek.

REFERENTIES

Scan de QR-code voor de referentielijst.

