

Binnenklimaat - meer dan een ontwerprandvoorwaarde

Loomans, M.G.L.C.; Hensen, J.L.M.; Kort, H.S.M.

Published in:
Bouwfysica

Gepubliceerd: 06/05/2017

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 author's 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](#)

Citation for published version (APA):
Loomans, M. G. L. C., Hensen, J. L. M., & Kort, H. S. M. (2017). Binnenklimaat - meer dan een ontwerprandvoorwaarde. *Bouwfysica*, 2017(1), 26-30.

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 ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Binnenklimaat – meer dan een ontwerprandvoorwaarde

Dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans, prof.dr.ir. J.L.M. (Jan) Hensen en prof.dr. H.S.M. (Helianthe) Kort

TU Eindhoven

In dit artikel wordt een overzicht gegeven van recente onderzoeksactiviteiten op het gebied van het binnenklimaat binnen de Building Performance Group (Unit Building Physics and Services) van de faculteit Bouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven. De aandacht gaat daarbij uit naar de positie van het binnenklimaat als randvoorwaarde in het ontwerpproces van gebouwen, relevante prestatie indicatoren en de prestatie in de praktijk. Met enkele voorbeelden wordt aangegeven hoe we met een andere blik naar dat binnenklimaat kunnen kijken. Door het binnenklimaat als méér te zien dan slechts een randvoorwaarde kunnen we er ook beter en effectiever naar ontwerpen. Dat biedt ook kans op innovaties!

Het vertrekpunt

Gebouwen worden in principe nog steeds ontworpen vanuit standaarden en richtlijnen met als doel om te komen tot een ‘goed’ gebouw. Maar wat is ‘goed’ hierbij? Naast de minimale richtlijnen van het bouwbesluit, lijkt energie vooralsnog de leidende gedachte te zijn en het binnenklimaat wordt als een randvoorwaarde aangeduid om vervolgens de energiebehoefte te bepalen. Maar waarom zouden we niet verder kijken?

Daarnaast krijgt het in gebruik zijnde gebouw ook nog relatief weinig aandacht. Als die er al is dan is het vaak negatieve aandacht. In plaats van het energiegebruik lijkt die aandacht zich, opvallend genoeg, toch veelal te concentreren op het binnenklimaat. Dit terwijl het energiegebruik overigens ook vaak niet helemaal aan de verwachtingen voldoet. Waarom werken we nog steeds volgens het hetzelfde denkpatroon?

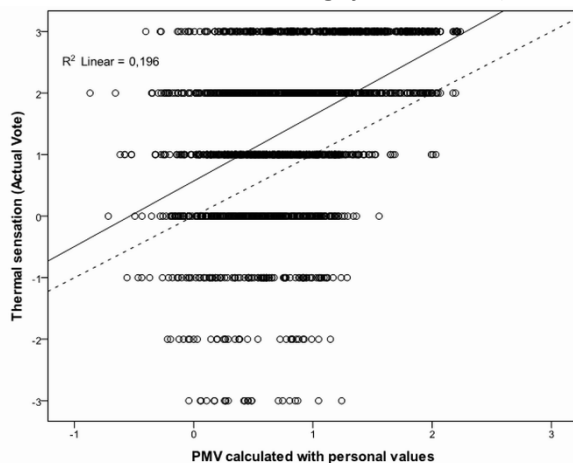
Natuurlijk zijn er velerlei oorzaken aan te wijzen waardoor klachten in gebouwen ontstaan. Maar is het mogelijk om met een beetje meer aandacht voor het binnenklimaat, in het ontwerp en in het gebruik, los te komen van die klachten en gewoon echt ‘goede’ gebouwen te ontwerpen en beheren? Goede gebouwen die de gebruikers ondersteunen in hun functioneren en bij hun uit te voeren taken [1].

In dit artikel willen we een kort overzicht geven van onderzoek dat in de afgelopen jaren is uitgevoerd binnen de Building Performance groep aan de Technische Universiteit in Eindhoven (Departement of the Built Environment; Unit Building Physics and Services) om hier wat meer grip op te krijgen. Het betreft afstudeer- en promotieonderzoek waarin we een nieuwe blik hebben geworpen op thermisch comfort, maar dan niet voor de gemiddelde gebruiker in een gemiddeld kantoor. Op het gebied van luchtkwaliteit is geprobeerd om los te komen van de voorgeschreven debieten of het ventilatievoud en verder is het in gebruik zijnde gebouw als uitgangspunt genomen om de complexiteit van de werkelijkheid niet uit het onderzoek weg te laten. Het bestaande en in gebruik zijnde gebouw is daarbij in veel onderzoek als ‘living lab’ ingezet.

Een nieuwe blik op indicatoren – Thermisch comfort

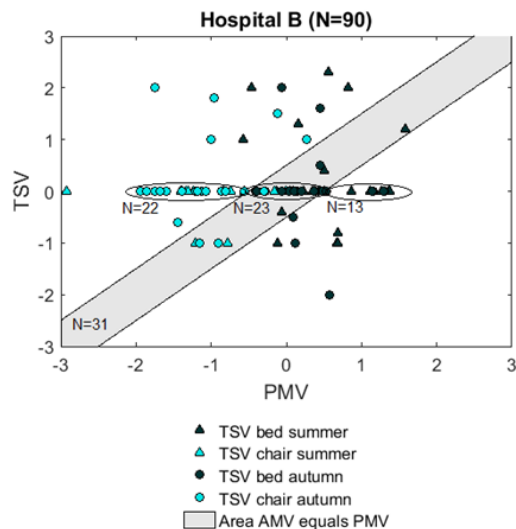
Predicted Mean Vote (PMV) en Adaptive Thermal Comfort (ATC; middels de operationele temperatuur) zijn de twee meest gebruikte prestatie indicatoren die als uitgangspunt worden gebruikt voor het ontwerp van gebouwen wanneer we er voor willen zorgen dat het thermische binnenklimaat voldoet. De waarde van PMV en ATC is in vele studies onderzocht en vergeleken. Met de

kantoorfunctie als belangrijk referentiekader zien we de toepassing van PMV en ATC zich uitstrekken over vele andere gebouwfuncties. Niet altijd tot ieders tevredenheid. Dat laten de resultaten voor een klaslokaal in een basisschool bijvoorbeeld zien [2]. De studie van Sander ter Mors toont het effect aan van het vereenvoudigen van de ontwerprandvoorwaarden voor het binnenklimaat. Daardoor worden in dit geval hogere luchttemperaturen toegestaan als ontwerppuitgangspunt. Het resultaat is desastreus voor de ervaring van de gebruikers, in dit geval de leerlingen (Figuur 1). Met die ervaring komt overigens ook dat leerlingen en docenten daardoor minder goed kunnen presteren op school. Daar zouden we ons misschien nog wel meer zorgen om moeten maken. Het bewustzijn lijkt er langzamerhand te komen en de Frisse Scholen eisen bieden al een veel betere basis, maar ook hier blijft financiering toch nog leidend en prevaleren ‘harde’ Euro’s (lees besparingen) boven nog relatief ‘zachte’ maar belangrijke winsten (lees betere prestaties, beter gezondheid, etc.).



Figuur 1. Voorbeeld vergelijking tussen PMV op basis van metingen en perceptie van leerlingen van een lagere school [1].

Een andere complexe omgeving is het ziekenhuis. Verplegend personeel, patiënten en bezoekers lijken drie volledig verschillende eisen te stellen. Onderzoeken van Manon Derks [3], Mike van Osta [4] en Larissa Ottenheijm [5] laten zien dat de patiënten wel redelijk tevreden zijn en dat PMV als ontwerppuitgangspunt daar kan werken (Figuur 2). Maar zij hebben vaak ook meer mogelijkheden om zich aan te passen aan de situatie dan de verpleging. Het gevolg is nu dat het verplegend personeel het vaak te warm vindt en dat een optimale situatie eigenlijk zou worden bereikt bij koelere condities. De tegenstrijdige wensen op het gebied van thermisch comfort vraagt om kritische aandacht en niet het eenvoudigweg vertrouwen op richtlijnen. Dit kan leiden tot effectievere en wellicht innovatievere oplossingen. Opnieuw kan het effect op de productiviteit erbij worden gehaald. Een medische fout door verplegend of behandeld personeel kan verder gaande gevolgen hebben dan een fout gemaakt door een leerling op de basisschool...



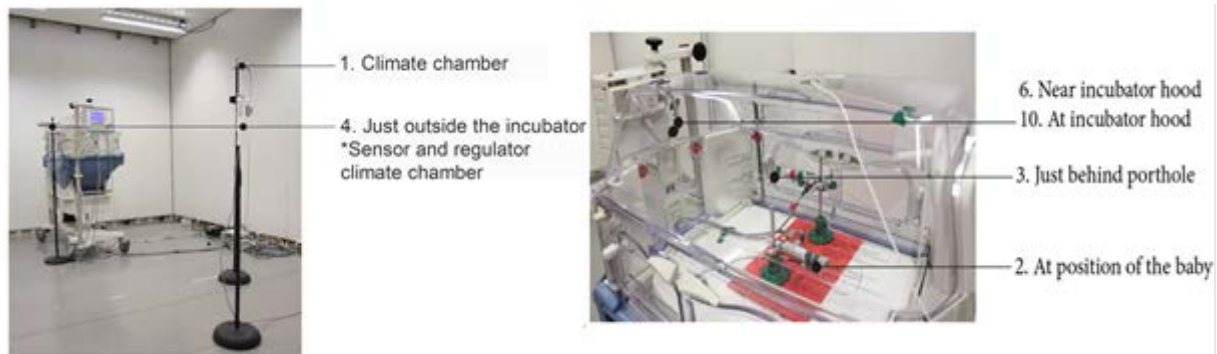
Figuur 2. Vergelijking van PMV (op basis van metingen) en TSV (Thermal Sensation Vote; op basis van questionnaire) voor patiënten in een ziekenhuis [4].

Waar we bij ontwerpuitgangspunten vaak denken aan een gemiddelde temperatuur en een uniforme situatie laat Lisje Schellen [6] zien dat niet-uniformiteit niet altijd een probleem is en dat de gestelde eisen wellicht wat strikt zijn. Misschien moeten we er wel naar streven wat meer variatie toe te staan in gebouwen. Uit een literatuurstudie hiernaar blijkt dat hier zeker nog mogelijkheden zijn [7]. Studies naar het thermisch comfort in een museum [8] en van de thermische comfort beleving in een collegezaal op de campus [9] [10] laten zien dat de thermische ervaring mede wordt bepaald door de ervaring voor de transitie. Dus we zouden wellicht wat flexibiliteit kunnen inbouwen. Interessant in een smart grid tijdperk?

Een interventiestudie van Lotte Kooi [9] en Manon Derks [10] waarbij een ongeveer twee graden lagere temperatuurconditie wordt aangeboden laat zien dat dit even goed wordt gewaardeerd. Hoewel het metabolisme niet varieert biedt de mogelijkheid tot variatie in de kleding blijkbaar voldoende ruimte om dit temperatuurverschil 'op te vangen'. Met lokale en persoonlijke klimatisering wordt de ontwerpruimte nog verder vergroot. Atze Boerstra [11] laat zien dat deze optie vele winnaars kan hebben. Anderzijds geeft een interessante uitkomst van een laboratoriumstudie van Atze Boerstra en Marije te Kulve [12] aan dat voor productiviteit een automatisch ingesteld optimaal thermisch klimaat mogelijk wordt geprefereerd boven een zelf geregelde situatie.

Automatische regelingen kennen we natuurlijk al lange tijd in gebouwen. Thermostaten en gebouwbeheersystemen dragen hier aan bij. Echter ook hier wordt toch vooral gekeken naar eenvoudige randvoorwaarden zoals bijvoorbeeld de temperatuur. En dan laten we nog even in het midden of we het hier over de luchttemperatuur of de operationele temperatuur hebben die wordt gemeten, of iets er tussen in. Maar is die temperatuur eigenlijk wel het meest interessant? Een extreme case van een te vroeg geboren baby in een couveuse biedt een blik op waar we het eigenlijk voor doen. Simone Teuwen [13] (Figuur 3) onderzocht in een klimaatkamer het effect van het openen van de deurtjes van een couveuse op de temperatuur in de couveuse. Het spreekt voor zich dat die daalt, maar hoeveel? En is dat erg? In dit geval werd het in een echte couveuse (in de klimaatkamer) gemeten temperatuureffect van het openen van deurtjes (voor een medische handeling) gebruikt als randvoorwaarde in een relatief eenvoudig thermofysiologisch model. Het resultaat daarvan was informatie over de variatie in de huid- en kerntemperatuur. Het is uiteindelijk die variatie die kan aangeven of het openen van de deurtjes een risico oplevert. Dit laat zich

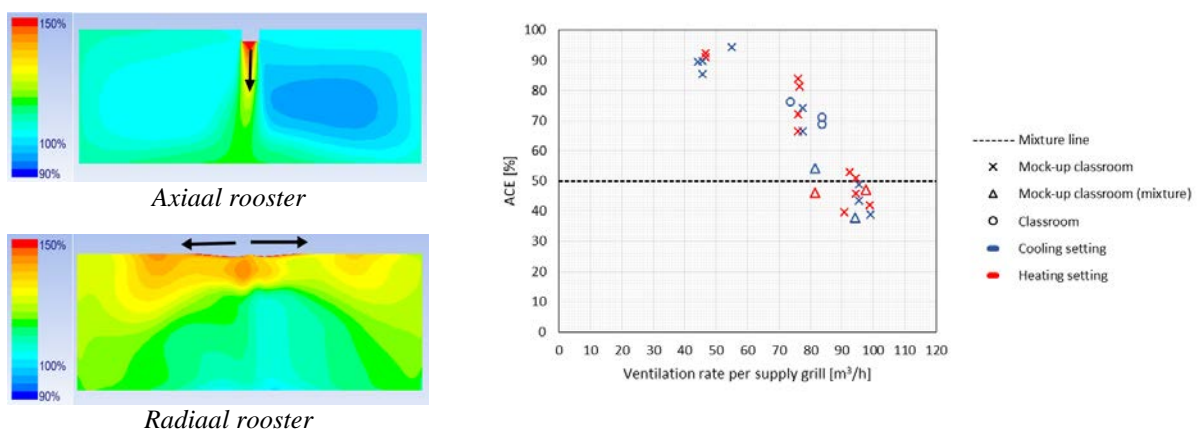
vervolgens vertalen naar welke condities er mogen heersen in een ruimte waar een dergelijke couveuse staat. Daarmee kunnen we dan vervolgens ontwerpen naar condities die optimaal zijn voor het verplegend personeel en de ouders. Hier wordt optimalisatie van de condities dus gevonden vanuit de fysiologische parameters van de baby.



Figuur 3. Foto's van de meetopstelling van een couveuse in de klimaatkamer [13].

Binnenklimaat is een integraal ontwerpresultaat – luchtkwaliteit versus m^3 per uur

Hoewel luchtkwaliteit als uitgangspunt is genomen bij het bouwbesluit en concentratieniveaus als onderlegger zijn gehanteerd bij het afleiden van ventilatiedebieten wordt in het ontwerp uiteindelijk toch vaak het resulterende debiet als leidend gekozen bij het ontwerp. Praktijkrichtlijnen en vuistregels worden daarbij dankbaar ingezet. Maar het debiet zegt weinig over de daadwerkelijke prestatie van ventilatie. Daarvoor komen we al snel uit op indicatoren zoals ventilatie efficiëntie en contaminant removal efficiency. Onder andere onderzoeken naar roosterkeuze [14] (Dirk Dijkstra - ventilatie efficiëntie in woonkamers met balansventilatie; Figuur 4 [links]), toevoer- en bronpositie [15] (Ivo de Visser en Jelle Loogman - lokaal ontwerp voor operatiekamerventilatie) en kennis van bronsterktes [16] (Paul Molenaar – ventilatie efficiëntie in cleanrooms) bevestigen dit. Te veel focus op debieten kan zelfs de positieve effecten van een ventilatieontwerp te niet doen zoals het onderzoek van Johan van der Steen [17] leert (Figuur 4 [rechts]). Hier blijkt bij het vereiste hoge debiet, volgens de richtlijnen, de efficiëntie van de ventilatie negatief te worden beïnvloed. Hoewel ook dit zich laat oplossen door een herontwerp van bijvoorbeeld de roosters worden dergelijke subtiele effecten en verschillen niet altijd van te voren onderkend en herkend. Een focus op enkel het ventilatievoud of debieten helpt daar zeker ook niet bij.



Figuur 4. Voorbeeld van ventilatie efficiëntie voor een woonkamer bij verschillende rooster [14] [links]; air change efficiency (ACE) als functie van het ventilatiedebiet voor een ventilatieontwerp [17] [rechts].

Naast het stromingspatroon is de concentratie van verontreiniging ook een belangrijke indicator. In operatiekamers en andere cleanrooms is de kolonie vormende eenheid (KVE) de referentie. Een

absolute eis voor het aantal KVE/m³ blijft een discussiepunt. Voor operatiekamers waar infectiegevoelige ingrepen worden uitgevoerd wordt een consensus waarde gebruikt. Helaas weten we van veel verontreinigingen nog niet welke effecten deze kunnen hebben, laat staan in welke concentratie dergelijke effecten kunnen optreden. Let op, we zouden hier eigenlijk over blootstelling moeten spreken. Van verschillende stoffen is iets meer bekend. Sommige wil je überhaupt niet terugvinden in het binnenmilieu. In de gebouwde omgeving zien we CO₂ vaak gebruikt worden als representatief voor de luchtkwaliteit in een gebouw of ruimte. Studies laten zien, hoewel niet consistent, dat CO₂ zelf ook als een verontreiniging kan worden gezien en de prestatie van mensen beïnvloedt. Maar waar zou het nog meer invloed op kunnen hebben? In de studie van Aike van Ruitenbeek [18] is middels een interventiestudie gekeken naar de slaapkwaliteit en de invloed van de luchtkwaliteit in de slaapkamer daarop. Ook in dit geval is CO₂ als indicator voor de luchtkwaliteit genomen. Naast de vragenlijsten die beschikbaar zijn om slaapkwaliteit te meten is ook gebruik gemaakt van technieken die het mogelijk maken om objectief fysiologische parameters te meten. De prestatie van het binnenmilieu van een slaapkamer vertaalt zich dus naar de slaapkwaliteit. Hoewel de verschillen subtiel zijn lijkt zich wel af te tekenen dat een CO₂ concentratie onder de 1000 ppm bijdraagt aan een betere nachtrust.

'Mind the gap' – verschil in prestatie tussen ontwerp en gebruik

Binnenmilieu randvoorwaarden worden gesteld bij het ontwerp. Als het goed is wordt vervolgens ook daar naar ontworpen. De praktijk leert echter dat de eisen niet altijd worden gehaald. Deels zit dat ook verstopt in de manier waarop prestatie indicatoren worden afgeleid in het ontwerp én in de praktijk. Het is niet eenvoudig dit op een gelijkwaardige manier te doen, maar wel wenselijk [19]. De gebruikte sensoren en de posities daarvan zijn voorbeelden van oorzaken die tot verschillen leiden, zo laat onder andere Peer van Kemenade [20] zien. Gebruik en gebruikersgedrag hebben daarnaast natuurlijk ook een zeer belangrijke invloed.

Maar zelfs als de gestelde randvoorwaarden worden gehaald lijkt de beleving van het binnenmilieu regelmatig niet te stroken met de objectief gemeten waarden. Dit laat zich deels verklaren doordat we (nog) niet alle fysische parameters standaard meten. Daarnaast zijn interacties in het binnenmilieu en het effect daarvan op de mens (ook fysiologisch) nog maar beperkt onderzocht. Er lijkt soms echter ook meer mogelijk dan volgens de eisen strikt wenselijk, bijvoorbeeld op het gebied van thermisch comfort [7]. Tot slot geldt dat het binnenmilieu meer omvat dan enkel de fysische aspecten. Ook daardoor wordt de beleving van een ruimte beïnvloedt (bijv. aanvullende prestatie indicatoren [19], functioneren van controle middelen [11]).

Het lijkt erop dat we deze complexe vraagstukken niet meer goed (enkel) in een klimaatkamer kunnen onderzoeken maar ook naar de 'werkelijkheid' moeten gaan. De bestaande gebouwen moeten ons 'living lab' worden en een platform om te leren en om te kunnen innoveren. Een lopende studie van Lotte Kooi [21] is een volgende stap hierbij om de ervaring van de gebruikers van gebouwen mee te nemen in de beoordeling van het binnenklimaat. Er zijn echter nog vele stappen te maken.

Op naar een 'energieleverend' binnenmilieu...

De voorbeelden laten zien dat de prestatie van het binnenmilieu volop in ontwikkeling is. Energiereductie heeft in de afgelopen decennia een zeer belangrijke rol gespeeld bij het ontwerp van gebouwen. De effecten daarvan zijn duidelijk zichtbaar in de gebouwen die nu worden ontworpen en gebouwd. Het energiegebruik wordt in veel gevallen tot nul of nog beter gereduceerd. Dit overigens veelal ook door meer gebruik te maken van duurzame opwekkingssystemen. We zien echter nu ontwikkelingen die de waarde van het binnenmilieu steeds meer gewicht geven. Denk bijvoorbeeld

aan de opkomst van Well Building. Dit laat zich relatief eenvoudig verklaren. Een gebouw dat als energiezuinig is ontworpen maar geen goed binnenmilieu kan realiseren is per definitie niet duurzaam. Het is immers heel eenvoudig om geen energie in een gebouw te gebruiken; niet klimatiseren, niet ventileren, alleen daglicht, ...

Daarnaast wordt steeds duidelijker, ook via objectieve metingen, dat een goed binnenmilieu bijdraagt aan de gezondheid en de prestaties die in dat binnenmilieu worden geleverd. De verhoudingen worden steeds vaker genoemd, maar het kan geen kwaad om deze nogmaals te vermelden; wanneer het over productiviteit versus energiekosten gaat hebben we het over een verhouding in de orde van 100:1 (in een kantoor situatie). Ofwel 1% verbetering van de productiviteit staat min of meer gelijk aan alle energiekosten voor het gebouw.

Waar het onderzoek in Eindhoven zich nu steeds meer op probeert te richten, is het helder krijgen van de geschikte prestatie indicatoren voor het binnenmilieu die bijdragen aan de prestatie van zijn gebruikers; slaapkwaliteit, leerprestaties, gezondheid, etc. De fysische parameters, bijvoorbeeld CO₂ bij slaapkwaliteit, zijn hierbij afgeleide parameters. De prestatie van een ontwerp oplossing is meer dan een gemiddelde temperatuur of een perfect gemengde ventilatie. Het direct meten aan de mens hoort hier ook bij, fysiologische metingen, maar voorlopig ook nog in de vorm van (right-now) korte vragenlijsten om de beleving van de gebruikers te meten. De gebouwde omgeving wordt als 'living lab' gezien met een schat aan mogelijkheden. Met deze kennis kunnen we het binnenmilieu beter gaan vastleggen, in het ontwerp onder andere via meer integrale gebouwsimulatie beter meenemen, en uiteindelijk waarmaken in de praktijk. We kunnen gebouwen meer gaan regelen op de mens en niet op de waarde van een temperatuur- of CO₂ sensor en last-but-not-least kunnen we gaan nadenken over innovatieve oplossingen die daarbij aansluiten. Dit alles in lijn met de prestatie gebaseerde gedachte.

Het is duidelijk dat deze aanpak samenwerking vereist met verschillende disciplines. In die samenwerking zit de innovatie waar we naar op zoek moeten. Het zal zeker nog wat tijd kosten om dit daadwerkelijk gerealiseerd te krijgen. Echter niets let ons om vanaf nu hier wel bewuster mee om te gaan. Dat begint met het daadwerkelijk en integraal meenemen van het binnenmilieu in het ontwerp van een gebouw. Zie het binnenmilieu niet te snel als een randvoorwaarde maar laat het juist een startpunt zijn om tot iets moois te komen. Uiteindelijk ontwerpen en bouwen we immers op de eerste plaats voor de mensen in een gebouw...

Dankwoord

In het artikel worden vele onderzoeken van studenten aangehaald. Het is dankzij die bijdragen dat dit overzicht kon worden gecreëerd. Wij danken hen voor hun grote inzet. Veel onderzoek is ook in samenwerking met bedrijven uitgevoerd. Naast het feit dat we daarmee ook relevante vraagstukken uit de praktijk hebben kunnen beantwoorden geeft de praktijkervaring ook richting aan (potentieel) relevante oplossingen. Tot slot is een deel van het onderzoek zoals hier besproken uitgevoerd in samenwerking met A.K. Mishra die is gefinancierd door STW (project nr. 11854), een onderdeel van NWO.

Bronnen

- [1] Kort, H.S.M. (2012). Bouwen voor zorg en gezondheid. Inaugurele rede. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
- [2] Mors, ter, S., Hensen, J.L.M., Loomans, M.G.L.C. & Boerstra, A.C. (2011). Adaptive thermal comfort in primary school classrooms : creating and validating PMV-based comfort charts. Building and Environment, 46(12), 2454-2461

- [3] Derks, M. 2017. Resolving thermal comfort perception amidst spatial transitions - Case study for improving nurses' thermal comfort in a hospital ward work environment. Final Master thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [4] Mike van Osta 2017. Thermal comfort in hospital wards – a comparison between two indoor conditioning systems. Final Master thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [5] Ottenheijm, E.M.M., Loomans, M.G.L.C., Kort, H.S.M. & Trip, A. (2016). Thermal comfort assessment in a Dutch hospital setting – model applicability. Proceedings of the 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2016), 3-8 July 2016, Ghent, Belgium: Ghent University.
- [6] Schellen, L. 2012. Beyond uniform thermal comfort : on the effects of nonuniformity and individual physiology. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [7] Mishra, A.K., Loomans, M.G.L.C. & Hensen, J.L.M. (2016). Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions - An overview. *Building and Environment*, 2016(109), 82-100.
- [8] Mishra, A.K., Kramer, R.P., Loomans, M.G.L.C. & Schellen, H.L. (2016). Development of thermal discernment among visitors : results from a field study in the Hermitage Amsterdam.
- [9] Kooi, L., Loomans, M. and Mishra, A. 2017. Analysis of student thermal perception evolution in a university classroom during class hour. Ingediend voor Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin (PI), 2-5 juli 2017.
- [10] Derks, M., Loomans, M., Mishra, A. and Kort, H. 2017. Resolving the influential parameters of thermal comfort perception amidst indoor-outdoor spatial transitions: Case study in a lecture room. Ingediend voor Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin (PI), 2-5 juli 2017.
- [11] Boerstra, A.C. 2016. Personal control over indoor climate in offices : impact on comfort, health and productivity. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [12] Boerstra, A.C., te Kulve, Marije, Toftum, J., Loomans, M.G.L.C., Olesen, B.W. & Hensen, J.L.M. (2015). Comfort and performance impact of personal control over thermal environment in summer : results from a laboratory study. *Building and Environment*, 2015(87), 315-326.
- [13] Teuwen, S., Mishra, A., Loomans, M., Vaan, C. de en Kort, H. 2017. Contradictory thermal comfort requirements in a neonatal intensive care units: exploring middle grounds. Ingediend voor Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin (PI), 2-5 juli 2017.
- [14] Dijkstra, D., Loomans, M.G.L.C., Hensen, J.L.M. & Cremers, B.E. (Bart) (2016). Ventilation efficiency in a low-energy dwelling setting – a parameter study for larger rooms. Proceedings of the 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2016), 3-8 July 2016, Ghent, Belgium: Ghent University
- [15] Loomans, M.G.L.C., de Visser, I.M., Loogman, J.G.H. & Kort, H.S.M. (2016). Alternative ventilation system for operating theaters: parameter study and full-scale assessment of the performance of a local ventilation system. *Building and Environment*, 102, 26-38
- [16] Molenaar, P.C.A. 2017. Ventilation efficiency improvement in pharmaceutical cleanrooms for energy demand reduction. Final Master thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [17] Steen, J. vd, Loomans, M., Schellens, N. en Hensen, J.L.M. 2017. Full-scale performance assessment of an innovative climate system for a classroom environment. Ingediend voor Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin (PI), 2-5 juli 2017.
- [18] Ruitenbeek, A. van. 2016. Indoor environment of sleeping rooms and sleep quality - A research on the influence of carbon dioxide levels on sleep quality in an intervention study. Final Master thesis. Eindhoven University of Technology.
- [19] Loomans, M.G.L.C., Huovila, A., Lefebvre, P.-H., Porkka, J., Huovila, P., Desmyter, J. & Vaturi, A. (2011). Key Performance Indicators For The Indoor Environment. In P. Huovila (Ed.),

Proceedings World Sustainable Building Conference SB11 (pp. 1666-1675). Helsinki:
Technische Universiteit Eindhoven.

- [20]Kemenade, van, P.L.W., Loomans, M.G.L.C., Opschoor, S. & Hensen, J.L.M. 2014. Building comfort performance assessment using a monitoring tool. Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2014), 7-12 July 2014, Hongkong, China (pp. 1-7). Technische Universiteit Eindhoven.
- [21] Kooi L. 2017. Optimization of Indoor Climate Quality assessment. Lopend afstudeeronderzoek. Technische Universiteit Eindhoven