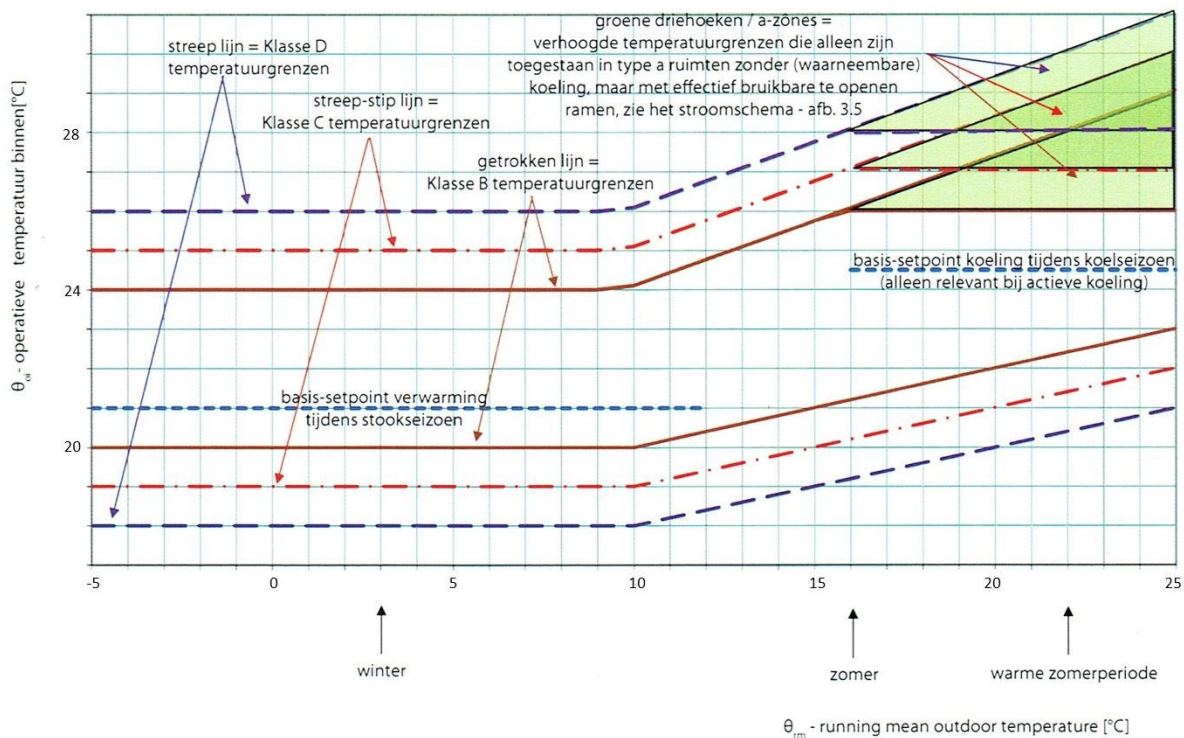


Bij het installatieontwerp wordt veelal nog uitgegaan van het binnen nauwe grenzen regelen van de binnentemperatuur voor maximaal thermisch comfort.

In een nieuw boek "Binnenklimaat en Adaptief Thermisch Comfort" [1] laten Stanley Kurvers en Joe Leijten zien dat zorgen voor adaptatie mogelijkheden veel belangrijker is. Aan de hand van de boeiende geschiedenis van onderzoek naar thermisch comfort, de principes van thermische adaptatie, comfort en productiviteit en komen ze tot ontwerpaanbevelingen. In dit artikel wordt de hoofdconclusie van dit nieuwe boek [1] zo goed mogelijk weer gegeven. Het boek zelf geeft natuurlijk een veel meer genuanceerde onderbouwing.

Fanger [2] deed onderzoek in klimaatkamers. Dit leidde tot de nu al zo'n 50 jaar bij veel ontwerpen gevolgde opvatting dat handhaven van de binnentemperatuur van gebouwen binnen nauwe grenzen tot de meest comfortabele situatie voor de gebruikers leidt.

Ook in publicaties zoals ISSO-74 "Thermische behaaglijkheid" [3], het "Handboek Bouwfysische Kwaliteit Gebouwen" [4] en het "Programma van Eisen Gezonde Kantoren 2021" [5] wordt ervan uitgegaan dat nauwere grenzen (klasse A, B, C) ook tot een hogere tevredenheid met het binnenklimaat leiden. Niettemin wordt daarin echter ook al aangegeven dat de gewenste binnentemperatuur mede afhankelijk is van de buitentemperatuur en de mogelijkheden die de gebouwgebruikers hebben om zelf hun comfort te beïnvloeden, bijvoorbeeld aan het gebouw (te openen ramen, per kamer te bedienen klimaatinstallaties) én aan hun kleding.



Figuur 1: Eisen (grenzen) voor de operationele temperatuur binnen, in relatie tot de running mean outdoor temperature (zie ISSO 74) [3], met aanvullend een weersafhankelijke setpointindicatie.

De klasse A-grenzen zijn niet apart aangegeven in deze afbeelding omdat ze gelijk zijn aan de grenzen van klasse B. Bij klasse A geldt echter als aanvullende eis dat er een mogelijkheid is tot persoonlijke beïnvloeding van het binnenklimaat (thermostaatknop of dergelijke).

Om onevenredig grote installaties en onnodig energiegebruik te voorkomen is het verstandig om tijdens en vlak na een hittegolf (één tot twee dagen) gedurende een paar uur per dag een overschrijding van de β -bovengrenzen (horizontale lijnen rechts in figuur 1, bij de groene driehoeken) toe te laten [3, 4]. Een hittegolf wordt hier gedefinieerd als meerdere dagen met een running mean outdoor temperature van meer dan 22 °C. De running mean outdoor temperature is gebaseerd op het gewogen gemiddelde van dagmaxima en dagminima van de dag zelf en een aantal voorgaande dagen.

In het programma van eisen moet dit punt, als men hiervan wil uitgaan, expliciet worden opgenomen. Primair gelden de temperatuurgrenzen zoals die in de figuur zijn gegeven.

Zoals hierna wordt aangegeven blijkt de werkelijkheid echter toch nog minder makkelijk tussen lijnen te vangen.

Veldonderzoek en theorie van adaptief thermisch comfort

In het boek "Binnenklimaat en Adaptief Thermisch Comfort" [3] wordt de hele geschiedenis van de ontwikkeling van richtlijnen voor het thermisch binnenklimaat van de afgelopen 50 jaar geschetst. Met name wordt gekeken naar de veldonderzoeken [6, 7] die in de laatste 25 jaar hebben plaats gevonden waarbij het gaat om onderzoek naar thermisch comfort en het principe van thermische adaptatie tussen mens en gebouw.

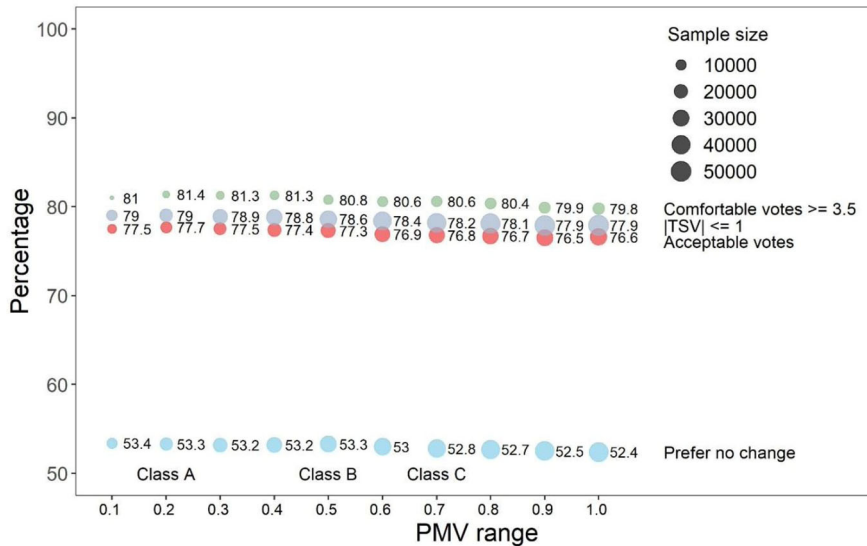
Uit de veldonderzoeken blijkt dat van alle omstandigheden (temperatuur, licht, geluid, enz.) waarmee gebruikers van kantoren, scholen, woningen, ziekenhuizen en zorginstellingen te maken krijgen de temperatuur, of beter gezegd het thermisch comfort, doorgaans het belangrijkste is. Mensen zijn thermisch comfortabel wanneer zij tevreden zijn met de temperatuur van dat moment en geen hogere of lagere temperatuur wensen. De invloed van andere binnenklimaatfactoren, zoals relatieve vochtigheid is gering, zolang deze geen extreme waarden aannemen.

Je zou kunnen denken dat, om vast te stellen of een situatie thermisch comfortabel is, het voldoende is om de temperatuur te meten en te kijken of deze binnen bepaalde grenswaarden ligt.

In werkelijkheid ligt het ingewikkelder. Thermisch comfort wordt niet alleen bepaald door de fysische omgevingsvariabelen, de thermische isolatie van de kleding en het inspanningsniveau van mensen. Minstens zo belangrijk zijn de ervaringen en verwachtingen die mensen in bepaalde omgevingen hebben en hun daarmee samenhangend gedrag om zich thermisch comfortabeler te voelen. Dat betekent dat tevredenheid met het klimaat voorspellen door een indeling in klimaatklassen op basis van temperatuur niet tot een goede kijk op de werkelijkheid leidt.

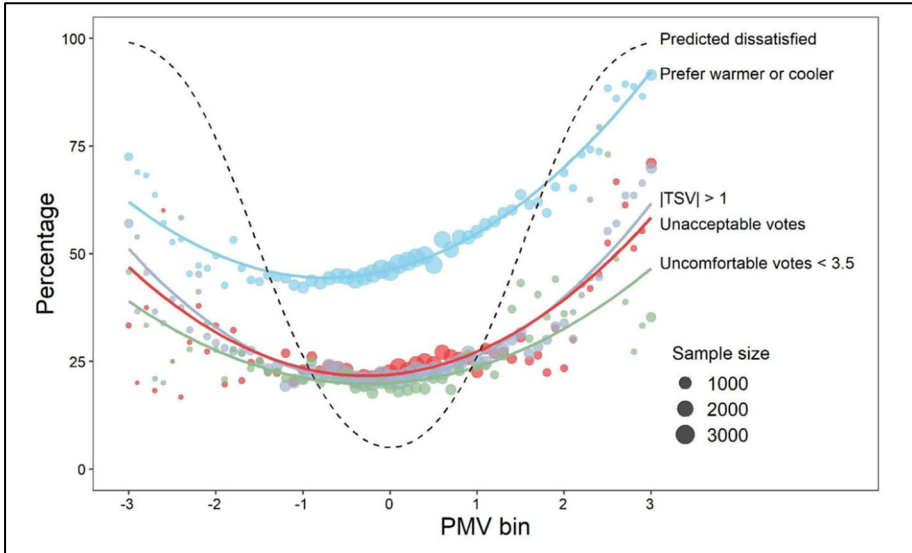
Ter illustratie worden in figuur 2 en 3 resultaten van veldonderzoek uit de ASHRAE Global Thermal Comfort Database II getoond. De huidige database bestaat op het moment van de nieuwe analyses (2019) uit ruim 107.000 *records*¹ verdeeld over 29 landen op 6 verschillende continenten en 16 klimaatzones [8]. Duidelijk is te zien (figuur 2) dat de acceptatie (comfortbeleving) uitgedrukt in meer en minder strakke klimaatklassen uitgedrukt in een PMV-range (PMV = Predicted Mean Vote; behaaglijkheidsscore) in werkelijkheid geen significante verschillen laten zien in acceptatie of comfort.

¹ Een *record* is een rij in de database bestaande uit de responsen van een gebouwgebruiker op vragen over bijvoorbeeld thermische sensatie en comfort, berekende thermische indexen en de bijbehorende meetwaarden als binnenluchttemperatuur, luchtsnelheid, luchtvochtigheid, buitenklimaatgegevens en schattingen van de kledingsisolatie en het metabolisme.



Figuur 2: Werkelijke percentages comfort (groene stippen), thermische sensatie (TSMV) (grijze stippen), acceptatie (rode stippen) en “prefereer geen verandering” (blauwe stippen) vergeleken met de PMV-klasse (Klasse A: +/- 0.2; Klasse B: +/- 0.5; Klasse C: +/- 0.7) [8].

Uit figuur 3 blijkt verder dat het vrij “steile” verband tussen de behaaglijkheidsscore (PMV) en het (voorspelde) percentage ontevredenen (PPD) in de werkelijkheid veel flauwer verloopt. Ook blijkt het percentage van ontevredenen bij PMV = 0 in de praktijk rond de 20% te liggen. Het optimum van 5% bij PMV = 0 dat Fanger [2] vindt treedt alleen op in met laboratorium omstandigheden te vergelijken situaties.



Figuur 3: Waargenomen percentage ontevredenen (observed percentage dissatisfied) versus het op basis van PPD voorspelde percentage ontevredenen (stippellijn). Iedere stip geeft het percentage ontevredenen en de lijnen zijn gewogen naar steekproefgrootte. De X-as is de berekende PMV, verdeeld in bins. De blauwe lijn geeft de voorkeur voor een warmere of koelere omgeving, de grijze lijn is de absolute waarde voor de TSMV>1, de rode lijn geeft aan dat de thermische omgeving als onacceptabel wordt beoordeeld en de groene lijn zijn de “oncomfortabele” stemmen <3,5 op de schaal van 1 tot 6 [8].

Bij elkaar laten dit soort onderzoeksresultaten zien dat het afwijken van de “optimale situatie” van een berekende PMV = 0 niet snel tot een toename van de stemmen voor “oncomfortabel” of “onacceptabel” leiden. Wel blijken veel mensen iets warmer of koeler te prefereren, maar ook de relatie tussen dat aantal en de afwijkingen van PMV = 0 zijn gering.

In de praktijk [9] blijken mensen indien mogelijk, de ramen te openen, of hun kleding en/of activiteitsniveau aan te passen om zo een thermisch behaaglijke situatie te creëren. Daardoor is het verband met een (statisch) berekende PMV veel minder sterk.

Strakke temperatuurgrenzen aanhouden is daarom niet zinvol. Ook al omdat er een groot verschil is tussen hoe verschillende mensen verschillende thermische omstandigheden ervaren. Van veel meer belang is daarom de mate waarin mensen zelf invloed hebben op de situatie, kleding, activiteit, voorzieningen in het gebouw (instellen verwarming of koeling, openen van ramen, enz.). Het PMV-model blijkt alleen van toepassing op airconditioned gebouwen met een gesloten gevel. Situaties die overeenkomen met de laboratoriumsituatie waarin het PMV-model is afgeleid.

Mogelijkheden scheppen voor adaptief gedrag van gebouwgebruikers

Het is goed om de drie mogelijkheden van adaptief omgaan met het binnenklimaat in gebouwen eens op een rij te zetten.

Gedragmatige adaptatie. Wanneer mensen zich niet comfortabel voelen, zullen zij acties ondernemen om het comfort te herstellen. De belangrijkste hiervan zijn het verhogen of verlagen van de luchtsnelheid, door bijvoorbeeld ramen te openen of in een andere stand te zetten en het aanpassen van de kledingisolatie door kledingstukken aan of uit te trekken [9].

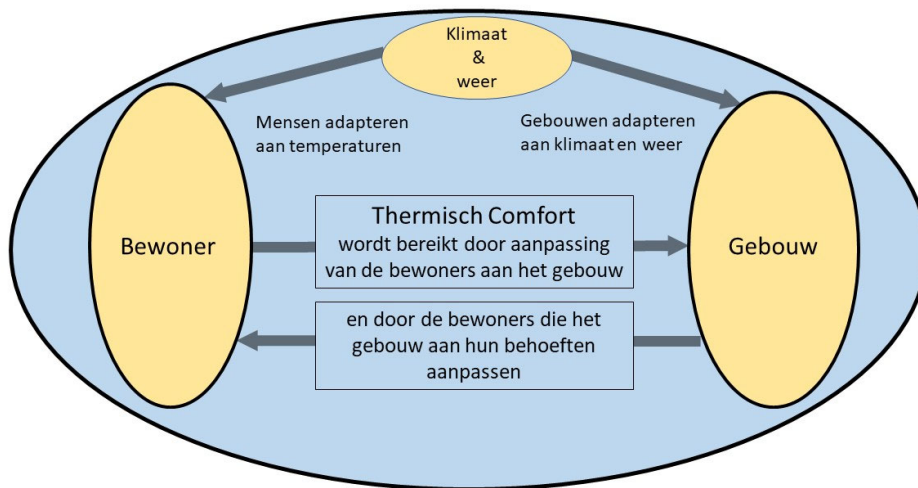
Fysiologische adaptatie. Voor het functioneren van het menselijk lichaam moet de kerntemperatuur op circa 37°C gehouden worden. Wanneer de kerntemperatuur hiervan dreigt af te wijken volgen er autonome fysiologische reacties. De belangrijkste zijn bloedvatvernauwing en rillen bij een te lage temperatuur en bloedvatverwijding en zweten bij een te hoge temperatuur. Mensen die langdurig verblijven in een airconditioned omgeving, verliezen een deel van het fysiologisch adaptatievermogen van het lichaam om adequaat op temperatuurwisselingen, met name hogere temperaturen, te reageren [10].

Psychologische adaptatie. Mensen in gebouwen hebben op basis van ervaringen in het verleden verwachtingen over hogere en lagere temperaturen die zich voordoen in bepaalde situaties. Wanneer gebruikers op grond van eerdere ervaring een grotere spreiding in temperaturen verwachten, zullen zij ook een grotere spreiding van temperaturen acceptabel vinden [11]. In niet volledig geconditioneerde gebouwen worden gebruikers aan een grotere variatie aan binnentemperaturen blootgesteld dan in airconditioned gebouwen. Verder wordt de acceptatie van hogere temperaturen bevorderd, wanneer de binnentemperatuur op een begrijpelijke wijze samenhangt met de buitentemperatuur [6, 10].

Het beïnvloeden van de luchtsnelheid is een belangrijke mogelijkheid in het adaptatieproces tussen mens en gebouw. Door het openen van een raam bij hogere temperaturen, dragen hogere luchtsnelheden bij aan het thermisch comfort, omdat de hogere luchtsnelheid tot een grotere warmteafgifte door convectie leidt. Door de relatief hoge temperaturen in deze situatie wordt de luchtstroom niet als tocht, maar eerder als verkoelend ervaren. In situaties met lagere binnentemperaturen wordt een te sterke luchtbeweging ervaren als tocht. Zie bijvoorbeeld ISSO 74 [4] waarin toelaatbare luchtsnelheden worden gegeven bij verschillende binnenluchttemperaturen.

De essentie van adaptief thermisch comfort is het principe dat mensen altijd proberen thermisch comfortabel te zijn. Dit doen ze door de hierboven omschreven gedragsaanpassingen. Alles dat dit adaptieve proces in de weg staat, zoals een gebouw waar de ramen niet open kunnen, een binnenklimaat dat ontkoppeld is van het buitenklimaat of een kantoortuin waar de gebruikers de temperatuur niet kunnen instellen, kan leiden tot discomfort en kan uiteindelijk tot klachten over het binnenklimaat leiden, of zelfs tot onvrede over het gebouw als geheel.

In figuur 4 worden de verschillende aspecten van “Adaptief Thermisch Comfort” samengevat.

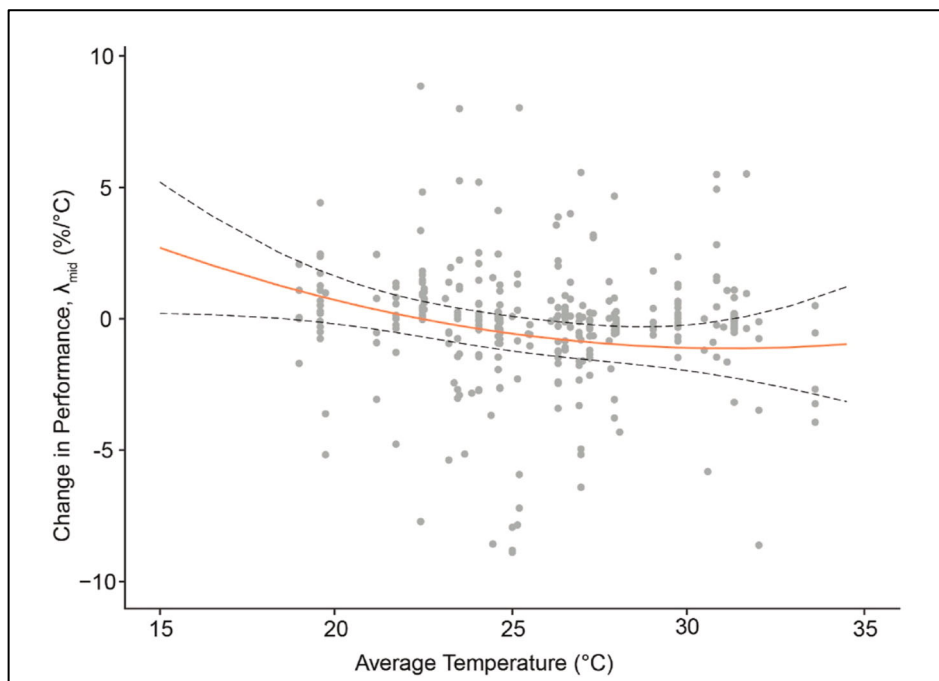


Figuur 4: Interactie van gebouw en gebouwgebruikers [1].

Thermisch Comfort en arbeidsproductiviteit

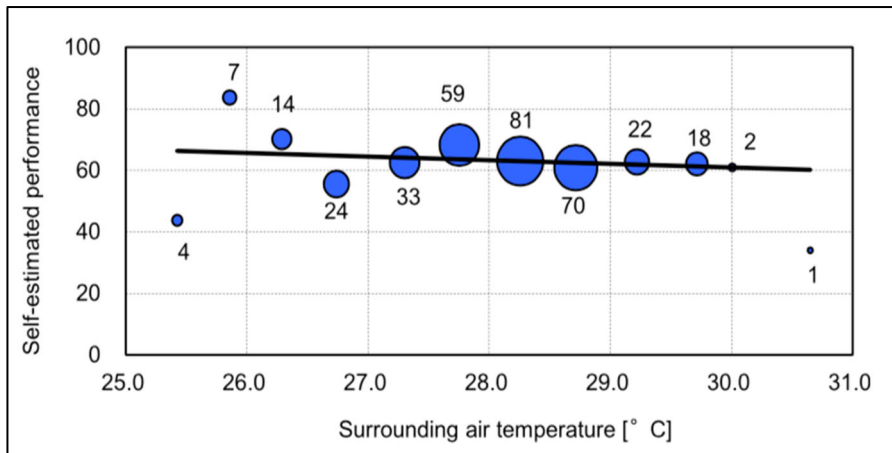
Wat betreft de invloed van thermisch comfort op de werkprestatie blijkt dat de werkprestatie het hoogst is wanneer de gebruikers hun omgeving als maximaal behaaglijk ervaren en dat de prestatie afneemt naarmate zij de omgeving als minder behaaglijk ervaren. Dat betekent dat niet de op basis het PMV-model berekende behaaglijkheidstemperaturen maatgevend zijn, maar de door de mens ervaren thermische behaaglijkheid die van veel meer dan alleen de temperatuur af hangt, met name ook, zoals hiervoor aangegeven, van de eigen mogelijkheden om de situatie te beïnvloeden.

Figuur 5 laat zien dat het verband tussen de binnentemperatuur en de arbeidsprestatie niet erg sterk is [12]. De grootte op de y-as, λ_{mid} , is de verandering in arbeidsprestatie in % per 1°C temperatuurstijging, waarbij een positieve λ_{mid} een toename van de prestatie bij stijgende temperatuur aangeeft, terwijl een negatieve λ_{mid} een afname van de prestatie bij stijgende temperatuur aangeeft.)

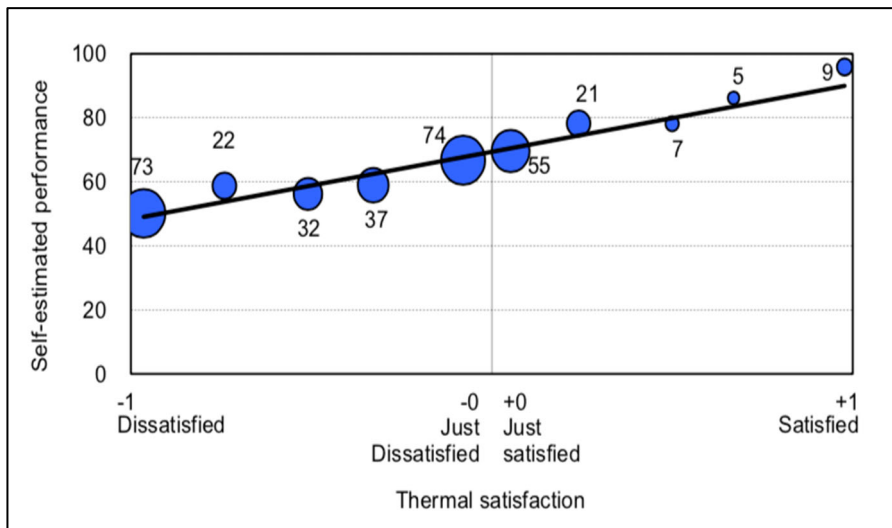


Figuur 5: Het verband van verandering in prestatie met de gemiddelde temperatuur. De rode lijn geeft het verband weer, de gestippelde lijnen het 95% betrouwbaarheidsinterval. De grijze stippen zijn de oorspronkelijke datapunten [12].

Maar interessanter is het nog om te kijken naar relatie tussen de “zelfgerapporteerde arbeidsprestatie” en de “binnentemperatuur” respectievelijk de “thermische behaaglijkheid”, zoals weergegeven in figuur 6 en 7 [13].



Figuur 6: Het verband tussen de omgevingsluchttemperatuur en de zelfgerapporteerde prestatie [13].



Figuur 7: Het verband tussen de thermische tevredenheid en de zelfgerapporteerde prestatie [13].

Het verband met de binnentemperatuur blijkt veel minder sterk dan dat met het ervaren thermisch comfort. En dat laatste op zijn beurt hangt weer voornamelijk af van de adaptieve mogelijkheden die het gebouw de gebruikers biedt.

ASHRAE Global Thermal Comfort Database II

Met de uitgebreidere en geografisch beter verdeelde ASHRAE database II kunnen, zoals hiervoor getoond, nog weer nauwkeuriger analyses van adaptief thermisch comfort worden gemaakt.

Database II is te vinden op <https://cbe-berkeley.shinyapps.io/comfortdatabase/>
Daar kun je als geïnteresseerde zelf ook enkele analyses doen.

Conclusies en aanbevelingen

Adaptatie blijkt een *natuurlijke biologische lichaamsreactie* van de mens om de omgeving en het lichaam zo goed mogelijk op elkaar aan te passen en de thermische belasting zoveel mogelijk te beperken. Daarom zullen ontwerpers, ontwikkelaars en beheerders van gebouwen zich moeten inspannen om de gebruikers zoveel mogelijk adaptieve mogelijkheden te bieden. Dit betreft bedieningsmogelijkheden van de installatie op de werkplek: ruimtethermostaten, thermostatische ventielen, enz., maar met name te openen ramen. Naast de ontwerper van het gebouw heeft ook de organisatie die er in is gehuisvest invloed op de adaptieve mogelijkheden van de gebruikers. Denk daarbij aan een vrij gebruik van de ruimte en géén dress code. In het boek “Binnenklimaat en Adaptief Thermisch Comfort” [3] worden basale ontwerpprincipes gericht op adaptieve mogelijkheden beschreven en enkele voorbeelden getoond. Doel is om voor zoveel mogelijk mensen een comfortabel binnenklimaat te realiseren waarbij de kans op discomfort en klachten zo veel mogelijk wordt beperkt en waarbij mensen die omgeving ook als aangenaam, stimulerend en productief ervaren, dit alles op een zo energie-efficiënt mogelijke wijze. Deze maatregelen zijn zowel kwalitatief als kwantitatief:

- Prestatie-eisen voor comfortabele binnentemperaturen voor verschillende gebouwtypen;
- Binnentemperaturen beheersen door bouwfysische ontwerp oplossingen gericht op vorm, ramen, daglicht, beschaduwning, thermische massa, ventilatie;
- Klimaatinstallatietypes gericht op comfort en gezondheid;
- Bevorderen van verschillende vormen van adaptatie.

Er zal in de toekomst onderscheid gemaakt worden tussen acceptabele temperaturen voor onder andere kantoren, scholen, woningen en instellingen voor ouderen, omdat juist de adaptieve mogelijkheden hier zeer verschillend kunnen zijn. Voor scholen lijken de gemiddelde comforttemperaturen iets lager dan huidige normen voorschrijven, maar de bandbreedte van acceptabele temperaturen rond het gemiddelde is groter, wat duidt op een ruim adaptatievermogen bij kinderen. Hoewel er minder onderzoek naar thermisch comfort in woningen beschikbaar is lijken de acceptabele temperatuurbreedtes voor woningen ruimer te kunnen worden dan de huidige normen, dat op kantooronderzoek is gebaseerd. Er is bijzondere aandacht nodig voor ouderen, omdat zij gevoeliger zijn voor koude en warmte en ouderen een heterogene groep zijn met uiteenlopende thermische behoeften [14, 15].

Wat betreft de invloed van thermisch comfort op de werkprestatie blijkt dat de werkprestatie het hoogst is wanneer de gebruikers hun omgeving als maximaal behaaglijk ervaren en dat de prestatie afneemt naarmate zij de omgeving als minder behaaglijk ervaren.

Naschrift

Dit artikel is gebaseerd op het boek Binnenklimaat en Adaptief Thermisch Comfort van Stanley Kurvers en Joe Leijten (2021). Het boek is online te raadplegen op www.Klimapedia.nl, kijk onder publicaties in het hoofdmenu. Ook kan het boek daar in gedrukte vorm worden besteld.

Binnenkort komt het boek ook in het Engels beschikbaar.

In dit artikel worden conclusies uit het boek rechtstreeks neergezet, ondersteund met enkele figuren. In het boek staat nog veel meer informatie en worden nog veel meer onderzoeksresultaten getoond die op een genuanceerde wijze laten zien hoe de schrijvers op basis hiervan tot hun conclusies komen. Het boek is ook voorzien van een zeer uitgebreide literatuurlijst.

Literatuur

1. Kurvers, S.R. en J.L. Leijten, Binnenklimaat en Adaptief Thermisch Comfort. Stichting Kennisbank Bouwfysica en Delft Digital Press, 2021. ISBN 978905291343 (zie ook www.klimapedia.nl onder "Publicaties").
2. Fanger, P.O. Thermal comfort – Analyses and Application in Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York, ISBN0-07-019915-9, 1970.
3. ISSO 74, Thermisch binnenklimaat – Eisen en achtergronden betreffende het thermisch binnenklimaat in kantoren, scholen en vergelijkbare utiliteitsbouw, 2014. ISBN: 978-90-5044-264-0.
4. Handboek Bouwfysische Kwaliteit Gebouwen, Versie 2.30, Nederlands Vlaamse Bouwfysica Vereniging, 2018.
5. Programma van eisen gezonde kantoren, Platform Gezond Binnenklimaat TVVL-connect, 2021.
6. de Dear, R., Brager, G., & Cooper, D., Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference: Final Report on RP-884. ASHRAE Trans, 104, 1997.
7. Nicol, F., & Humphreys, M., Adaptive comfort in Europe: results from the SCATs survey with special reference to free running buildings. Proceedings of the international conference on EPBD Energy Performance of Buildings Directive: Implementation in practice, Session 4.5. - pp 14, 2005.
8. Li, P., Parkinson, T., Brager, G., Schiavon, S., Cheung, T. C., & Froese, T., A data-driven approach to defining acceptable temperature ranges in buildings. Building and Environment, 153, 302-312, 2019.
9. Nicol, J. F., & Roaf, S., Rethinking thermal comfort. Building Research & Information, 45(7), 183-193, 2017.
10. Yu, J., Ouyang, Q., Zhu, Y., Shen, H., Cao, G., & Cui, W., A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments. Indoor air, 22(2), 110-118, 2012.
11. Wagner A., Moosman, C., Gropp T., Gossauer E., Thermal comfort under summer climate conditions- Results from a survey in an office building in Karlsruhe, Germany, Proceedings of congress Comfort and energy use in buildings – Getting it right, Windsor, 2006.
12. Porras-Salazar, J. A., Schiavon, S., Wargocki, P., Cheung, T., & Tham, K. W., Meta-analysis of 35 studies examining the effect of indoor temperature on office work performance. Building and Environment, 108037, 2021.
13. Tanabe, S. I., Haneda, M., & Nishihara, N., Workplace productivity and individual thermal satisfaction. Building and environment, 91, 42-50, 2015.
14. Blatteis, C. M., Age-dependent changes in temperature regulation—a mini review. Gerontology, 58(4), 289-295, 2012.
15. Martins, L. A., Williamson, T., Bennetts, H., Zuo, J., Visvanathan, R., Hansen, A., ... & Soebarto, V., Individualising thermal comfort models for older people: the effects of personal characteristics on comfort and wellbeing In Windsor Conference 2020, 2020.

Over de auteur van dit artikel:

Kees van der Linden is werkzaam als zelfstandig adviseur op het gebied van bouwfysica, binnenklimaat en installaties in de context van duurzaamheid onder de naam AaCee Bouwen en Milieu (www.aacee.nl/bouw).