# Thermisch comfort in gebouwen

Kennisbank Bouwfysica

Auteurs: S.R.Kurvers en J.L. Leijten

# Inhoud

**1 INLEIDING ..... 3**

**2 THERMISCH COMFORT ..... 5**

2.1 THERMOFYSIOLOGISCHE BENADERING VAN THERMISCH COMFORT ..... 5
2.2 ADAPTIEVE BENADERING VAN THERMISCH COMFORT ..... 8

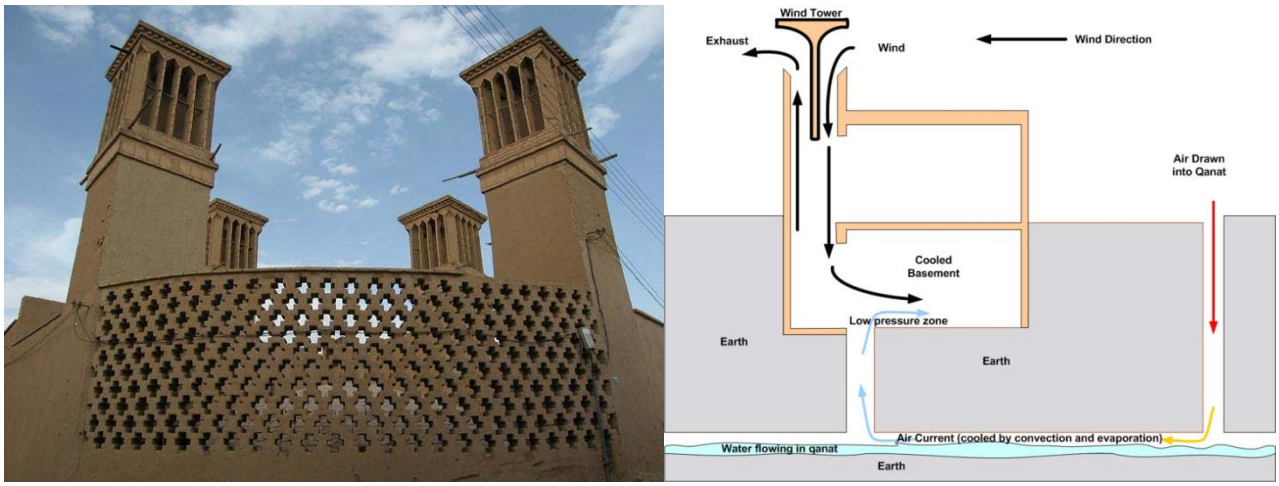
**3 NORMEN EN RICHTLIJNEN VOOR THERMISCH COMFORT ..... 16**

3.1 NORMEN EN RICHTLIJNEN GEBASEERD OP KLIMAATKAMERONDERZOEK ..... 16
3.2 NORMEN EN RICHTLIJNEN GEBASEERD OP ADAPTIEF THERMISCH COMFORT ..... 17

**4 LITERATUUR ..... 23**

# 1 Inleiding

Het binnenklimaat in gebouwen het resultaat van het buitenklimaat, het ontwerp en de fysische eigenschappen van het gebouw en het gedrag van de bewoners. Van oudsher hielden ontwerpers rekening met het heersende buitenklimaat, bij de keuze van de oriëntaties van de gevels werd rekening gehouden met de zonbelasting, met de afmetingen van de ramen, de gevel bevatte neggen die schaduw op de ramen wierpen, luiken werden toegepast, er werd massa aan de constructie gegeven die de warmte kon opnemen en een doordachte natuurlijke ventilatie zorgde voor het afvoeren van de warmte en voor afkoeling in de nacht. In het Midden Oosten zijn prachtige voorbeelden te vinden van eeuwenoude ontwerpen die in een heet klimaat toch behaaglijk binnenklimaat mogelijk maken.




*Figuur 1: Windvangers in Iran*

Architecten voelden aan dat een goed binnenklimaat grotendeels afhankelijk was van de keuzes die ze in hun ontwerp maakten. Verder werd zodanig ontworpen dat de bewoners mogelijkheden hadden zich aan te passen door het gebruiken van luiken, ramen, zonwering of door in andere delen van gebouw of woning te verblijven, bijvoorbeeld een binnenplaats. En verder pasten de bewoners zich ook aan door kleding te variëren en zich wat rustiger te houden tijdens warmste uren van de dag. Het klimaat beïnvloedde dus het sociaal-cultureel gedrag en de bouwkunst.

Dit veranderde langzaam toen in de 1$^{e}$ helft van de 20$^{e}$ eeuw airconditioning werd uitgevonden. Vooral na de Tweede Wereldoorlog werd airconditioning veel toegepast in bioscopen en winkelcentra in warme delen van de Verenigde Staten. De omzet steeg hierdoor dramatisch. Door de mogelijkheden die het mechanisch koelen van de lucht boden en omdat energie destijds nauwelijks iets kostte kon iedere gewenste binnentemperatuur worden gerealiseerd, vrijwel onafhankelijk van architectonische keuzes. Lichte constructies, grote glasoppervlakken, vlakke, gesloten gevelconstructies, gebouwen boven snelwegen, extreme hoogbouw, steden in woestijnen, bijna alles werd mogelijk op het gebied van vormgeving en functies, tot aan skibanen in Dubai.

Architecten gingen zich meer en meer concentreren op de vormgeving van een gebouw en het binnenklimaat werd overgelaten aan gespecialiseerde adviseurs en installateurs. Deze adviseurs moeten hun werk in de meeste gevallen doen binnen de grenzen die de architect hun biedt. Door alle technologische ontwikkelingen ontstond de behoefte aan concrete

gegevens wat nu comfortabele binnentemperaturen zijn. In de volgende hoofdstukken wordt dieper ingegaan op het begrip thermisch comfort, op de achtergronden hiervan, op de normen en richtlijnen voor thermisch comfort, en hoe de inzichten in de loop van de jaren veranderd zijn. Deze veranderingen zijn mede het gevolg van het schaars en duur worden van fossiele brandstoffen, waardoor de kosten voor het binnenklimaat en de gevolgen voor comfort en productiviteit een steeds belangrijker rol gaan spelen. Daarnaast bleek dat de gebruikers zich in veel gebouwen niet comfortabel en gezond voelden. Energiegebruik en comfort zijn zo dus steeds dominantere factoren geworden in het ontwerp van een gebouw.

## 2 Thermisch comfort

Wat is nu eigenlijk thermisch comfort? Hiermee bedoelen we niet alleen een bepaalde temperatuur die mensen behaaglijk of comfortabel vinden, maar het gaat om het warmte- of koude*gevoel* van mensen, de perceptie. Dit hangt af van de fysische omgeving, maar ook van persoonlijke factoren en is aan veranderingen onderhevig. Dit maakt dat thermisch comfort in de praktijk niet eenvoudig te realiseren is.

Thermisch comfort wordt in normen gedefinieerd als ”*een gemoedstoestand die tevredenheid uitdrukt met de thermische omgeving*”. Thermisch comfort beschrijft dus de psychologische toestand van een mens die aangeeft of iemand het in een bepaalde mate warm of koud heeft. Er moet dus inzicht zijn in de fysische omgeving, zoals de temperaturen, luchtsnelheden en luchtvochtigheid, de mate en snelheid waarin deze variëren, in menselijke aspecten als het activiteitenniveau, kleding en ervaringen en verwachtingen.

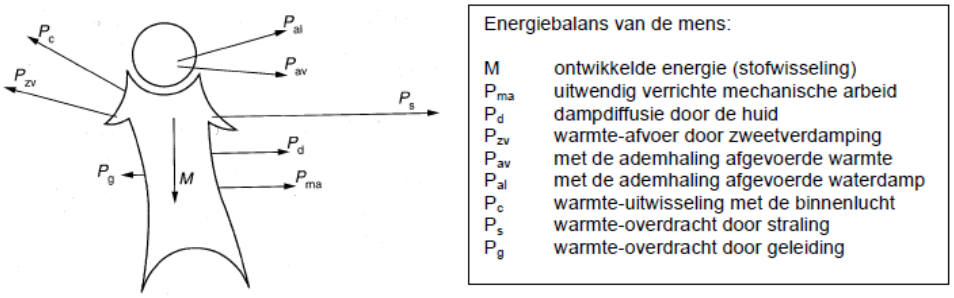
Thermisch comfort is belangrijk omdat ontevredenheid over de thermische omgeving, zeker als dat structureel en langdurig is, invloed heeft op het moreel en de prestatie. Verder beïnvloed de temperatuur de chemische samenstelling en activiteit van de lucht en heeft de luchtkwaliteit invloed op de gezondheid. En niet in de laatste plaats heeft thermisch comfort grote invloed op het energiegebruik. Onvoldoende begrip van thermisch comfort leidt in de praktijk tot een onnodig hoog energiegebruik door bijvoorbeeld te hoge temperaturen in de winter en te lage temperaturen in de zomer.

Het onderzoek naar thermisch comfort wordt uitgevoerd in klimaatkamers en in werkelijke situaties (veldonderzoek). Aanvankelijk werden de resultaten van klimaatkameronderzoek populair en vormde de basis van normen en richtlijnen. Vanaf circa 1990 werd veldonderzoek weer populair, toen bleek dat de resultaten van klimaatkameronderzoek afweken van werkelijke omstandigheden. Vooral de laatste jaren is duidelijk geworden dat er meer gebruik gemaakt moet worden van de aanpassingsmogelijkheden van mensen (adaptatie) en dat hiermee het comfort kan worden vergroot en het energiegebruik verminderd.

### 2.1 Thermofysiologische benadering van thermisch comfort

Door de mogelijkheden die airconditioning bood is in de jaren 60 van de vorige eeuw de behoefte ontstaan om inzicht te hebben in welke temperaturen door mensen als behaaglijk of comfortabel worden ervaren. Hiervoor is gebruik gemaakt van kennis die is ontwikkeld in klimaatkamers. In klimaatkamers zijn de fysische omstandigheden volledig beheersbaar en kunnen uitgebreide metingen aan mensen en poppen (manikins) worden uitgevoerd. Zo kunnen fysiologische reacties, zoals huiddoorbloeding, vasodilatatie (bloedvatverwijding) en vasoconstrictie (bloedvatvernauwing), waarmee de warmteafvoer uit het lichaam kan worden geregeld, gedetailleerd worden bestudeerd. Door ook tijdens de experimenten naar het warmtegevoel te vragen ontstaat inzicht hoe de mens een bepaalde thermische omgeving ervaart. In de jaren 60 van de vorige eeuw ontstonden diverse thermofysiologische modellen (Stolwijk & Gagge, 1971). De Deense onderzoeker *Fanger* verwierf de grootste bekendheid met zijn onderzoek waarbij hij in een klimaatkamer het thermisch comfort onderzocht van 1300 studenten (Fanger, 1970).

Het model gaat uit van de thermoregulatie van het menselijk lichaam, die de lichaamstemperatuur op circa 37°C probeert te houden (energiebalans).



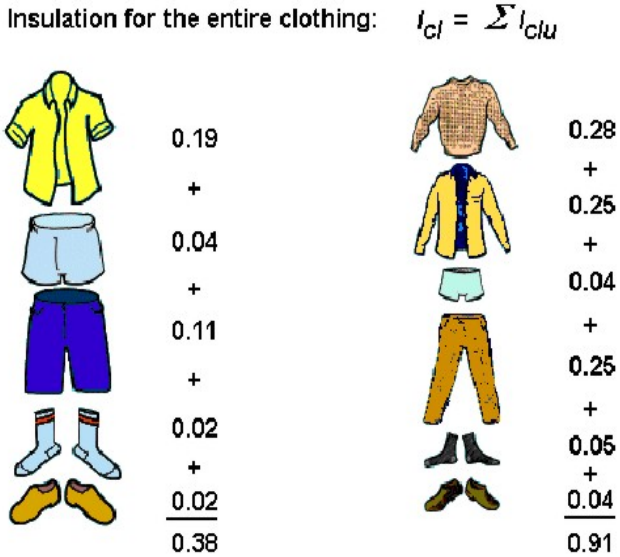

*Figuur 2: Energiebalans van de mens (Van der Linden, 2006)*

Door middel van straling, convectie en geleiding wordt warmte met de omgeving uitgewisseld en door ademhaling en zweetverdamping wordt warmte aan de omgeving afgestaan. In de klimaatkamer werden experimenten uitgevoerd waarbij

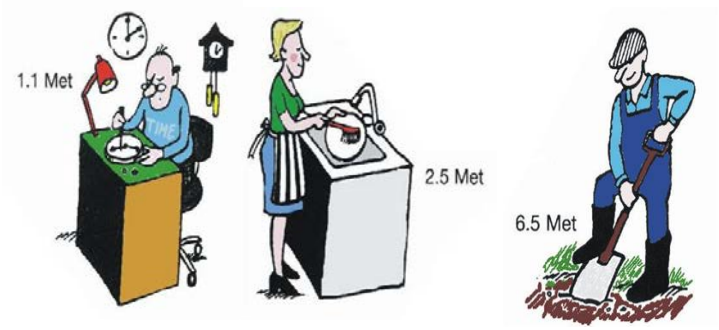
- de luchttemperatuur,
- de gemiddelde stralingstemperatuur,
- de luchtvochtigheid,
- de luchtsnelheid

werden gevarieerd én

- de warmteweerstand van de kleding (figuur 3),
- het activiteitenniveau (metabolisme) werden gemeten en vastgesteld (figuur 4).




*Figuur 3: Voorbeelden van kledingisolatie in clo.*




*Figuur 4: Voorbeelden van activiteitenniveaus in Met*

Aan de proefpersonen werd in de klimaatkamers gevraagd om aan te geven hoe ze zich thermisch voelden, uitgedrukt op een 7-puntsschaal:

| | |
|---|---|
| +3 | Heet |
| +2 | Warm |
| +1 | Enigszins warm |
| 0 | Neutraal |
| –1 | Enigszins koel |
| –2 | Koel |
| –3 | Koud |

*Figuur 5: De thermische sensatie- of ASHRAE-schaal*

De formule voor de energiebalans ziet er als volgt uit:

$$M = P_{ma} + P_d + P_{zv} + P_{av} + P_{al} + P_c + P_s + P_g$$

Hierin is:
M = de door stofwisseling in het lichaam ontwikkelde energie in W
$P_{ma}$ = uitwendig verrichte mechanische arbeid in W
$P_d$ = door dampdiffusie afgegeven energie via de huid in W
$P_{zv}$ = warmteafvoer door zweetverdamping in W
$P_{av}$ = met ademhaling afgevoerde voelbare warmte in W
$P_{al}$ = met ademhaling afgevoerde latente warmte in W
$P_c$ = convectief afgegeven warmte in W
$P_s$ = door straling aan de omgeving afgegeven warmte in W
$P_g$ = door geleiding afgegeven warmte in W

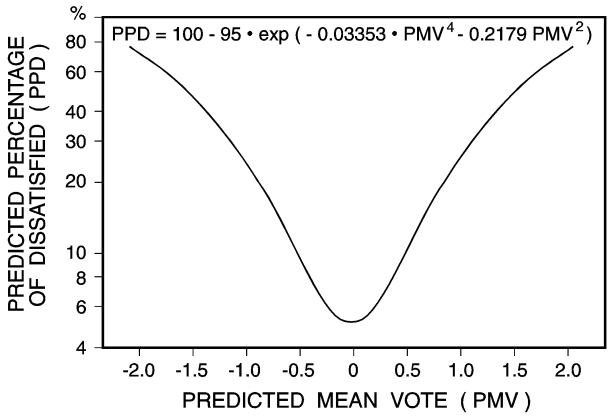
Bovenstaande vergelijking wordt verder bewerkt door het toevoegen van comforteisen voor de huidtemperatuur en zweetproductie. Het verschil tussen interne warmteproductie en warmteverliezen van het lichaam (afwijking van de evenwichtssituatie) is een maat voor de thermische behaaglijkheid. In onderstaande formule voor de PMV (Predicted Mean Vote) is dit de uitdrukking tussen de vierkante haken. De daarvoor geplaatste uitdrukking is het verband tussen de afwijking van de evenwichtssituatie bepaald in klimaatkameronderzoek.

$$PMV = (0{,}303.e^{-0{,}031.M^*} + 0{,}028).\ [RM^* - 3{,}05.10^{-3}.\ (5733 - 6{,}99.\ RM^* - p_i) - 0{,}42\ .\ (RM^* - 58{,}15) - 17.10^{-6}.\ M^*.\ (5867 - p_i) - 1{,}4.10^{-3}.\ M^*.\ (34 - T_i) - 39{,}6.10^{-9}.\ f_{kl}\ .((T_{kl} + 273)^4 - (T_s + 273)^4) - f_{kl}\ .\ \alpha_c.\ (T_{kl} - T_i)]$$

Hierin is:

| | |
|---|---|
| $M^*$ | metabolisme M per $m^2$ lichaamsoppervlak in $W/m^2$ |
| $RM^*$ | metabolisme per $m^2$ lichaamsoppervlak minus uitwendig verrichte arbeid in $W/m^2$ |
| $p_i$ | dampspanning van de binnenlucht in Pa |
| $T_i$ | temperatuur van de binnenlucht in ºC |
| $T_{kl}$ | oppervlaktetemperatuur van de kleding in ºC |
| $T_s$ | gemiddelde stralingstemperatuur van de wanden in ºC |
| $\alpha_c$ | warmte-overgangscoëfficiënt voor convectie in $W/m^2K$ |
| $f_{kl}$ | verhouding tussen de oppervlakte van het geklede en het ongeklede lichaam (-) |

Door aan te nemen dat de proefpersonen die -2, -3, +2 en +3 stemden “ontevreden” waren, kon het theoretisch percentage ontevredenen worden berekend, de PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Figuur 6 geeft de onderlinge relatie weer.



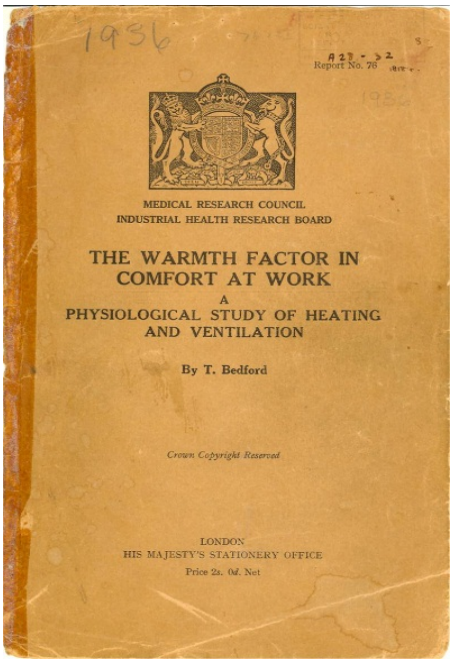

*Figuur 6: Relatie tussen de PPD-index en de PMV-index (NEN-EN-ISO 7730)*

De methode van Fanger werd vanaf 1970 populair en vormde de basis voor normen en richtlijnen die temperatuurgrenzen voor gebouwen aangeven en waarmee, tot op de dag van vandaag, het binnenklimaat van gebouwen in grote delen van de wereld en in zeer uiteenlopende klimaatzones en culturen wordt ontworpen. De reden voor de populariteit was onder andere het verband dat Fanger legde tussen het percentage ontevredenen en de PMV-index. Door het metabolisme en de kleding weerstand te bepalen kon het te verwachten thermisch comfort worden voorspeld, afhankelijk van de fysische omstandigheden.

## 2.2 Adaptieve benadering van thermisch comfort

Naast de thermofysiologische benadering van thermisch comfort werd er al voor de 2e wereldoorlog op verschillende plaatsen in de wereld veldonderzoek gedaan naar het verband tussen de thermische omgeving en de menselijke perceptie. Maar in plaats van het onderzoek in klimaatkamers onder gecontroleerde omstandigheden uit te voeren, werden de onderzoeken in werkelijke omgevingen uitgevoerd, waarbij het natuurlijke gedrag van mensen en de interactie tussen mens en omgeving deel uitmaakte van het onderzoek.

Het eerste grote onderzoek dateert van 1936 en werd in Groot Brittannië uitgevoerd door Bedford. In zijn boek “The warmth factor in comfort at work” onderzocht hij in een winter het thermisch comfort van 3085 vrouwen die in 12 fabrieken werkten (Bedford, 1936).



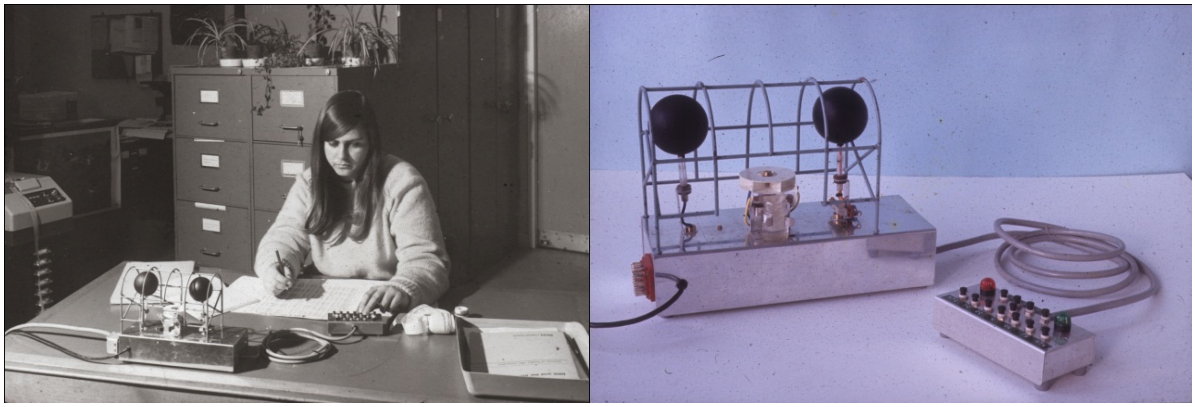

Er werden temperaturen gemeten en er werd met behulp van vragenlijsten gevraagd of de vrouwen zich thermisch gezien comfortabel voelden. Bedford gebruikte hiervoor een schaal met 7 categorieën, waarop aangegeven kon worden hoe warm of koud mensen het op een bepaald moment hebben (zie figuur 7). De optimale comforttemperatuur bleek 18°C te zijn.

The Bedford scale of thermal comfort.

1 Much too cool
2 Too cool
3 Comfortably cool
4 Comfortable and neither cool nor warm
5 Comfortably warm
6 Too warm
7 Much too warm

*Figuur 7: De Bedford schaal voor het registreren van de thermische sensatie.*

In de jaren vijftig en zestig werd door Webb veldonderzoek gedaan in werkplaatsen en kantoren, in Singapore, Bagdad, India en Groot Brittannië (Webb, 1959). Hij gebruikte hiervoor de eerste dataloggers voor automatische registratie van de gegevens (figuur 8).

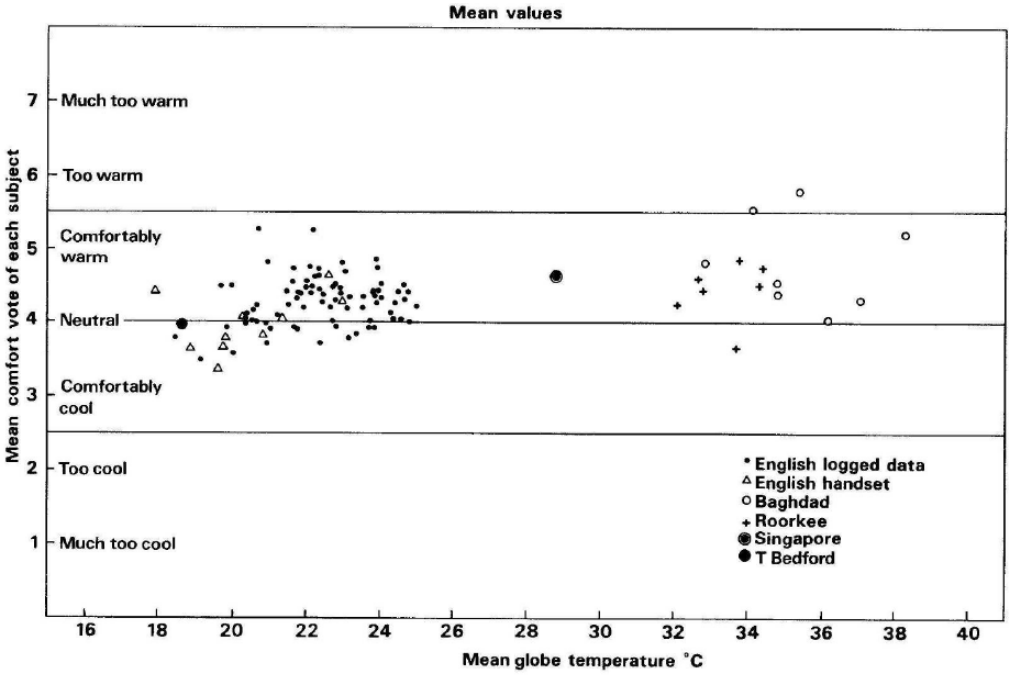


*Figuur 8: De datalogger voor het meten van de binnentemperaturen en het registreren van de comfortstemmen op de 7-puntsschaal. De temperaturen werden gemeten met een geventileerde droge- en natteboltemperatuur en een verwarmde en onverwarmde globetemperatuurmeter.*

Webb constateerde dat de bewoners van deze gebouwen zich comfortabel voelden bij temperaturen die in de gebouwen het meeste voorkwamen. Bij deze onderzoeken waren dat temperaturen tussen 16°C en 30°C. Webb concludeerde dat mensen *geadapteerd* waren aan de gemiddelde condities waaraan ze waren blootgesteld. Hij kan worden gezien als de

grondlegger van de theorie van adaptief thermisch comfort. Zijn onderzoeken dateren van de jaren zestig, maar het zou nog 30 jaar duren voordat de theorie algemeen geaccepteerd zou raken.

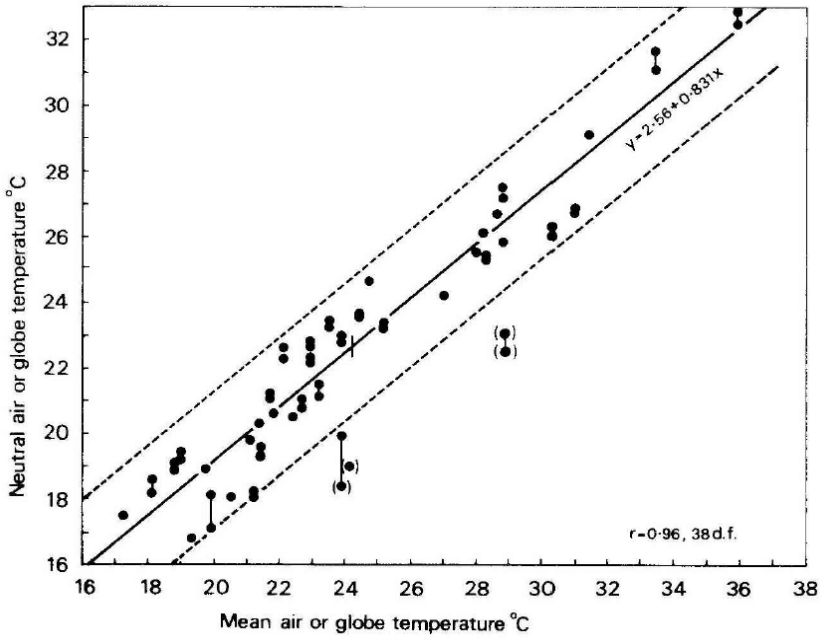
In de volgende figuren worden enkele resultaten van het onderzoek van Webb getoond. In figuur 9, waarin de resultaten van de onderzoeken van Webb en Bedford zijn samengevoegd, is te zien dat thermisch comfort weinig met de ruimtetemperatuur correleert. Mensen blijken over een grote bandbreedte van temperaturen comfortabel te kunnen zijn.




*Figuur 9: Het gemiddelde maandelijkse thermisch comfort, uitgedrukt op de 7-puntsschaal van Bedford, afgezet tegen de gemiddelde temperatuur. Comfort werd bereikt tussen 18 en 38°C. In deze figuur zijn de resultaten van onderzoeken Webb uit de periode 1966-1969 samengevoegd met de resultaten van Bedford (Humphreys & Nicol, 1970).*

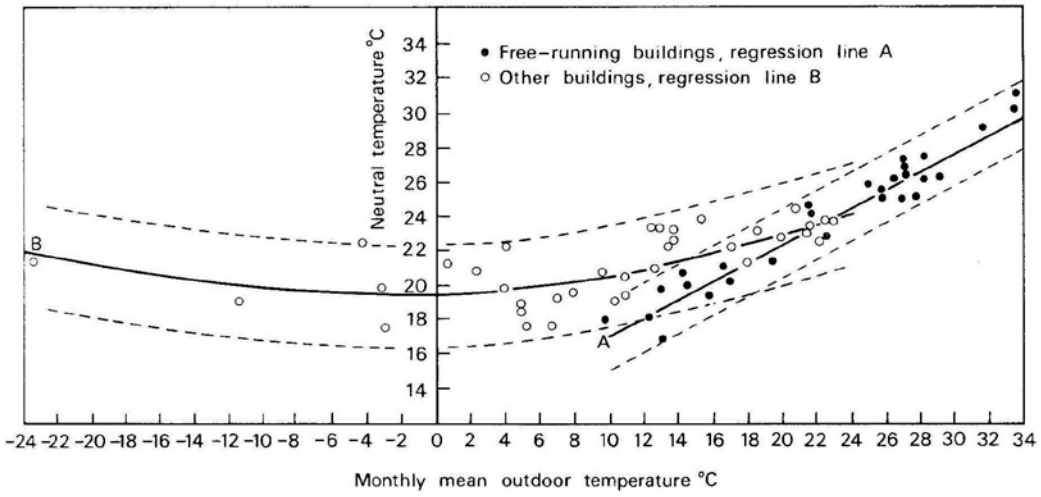
Begin jaren zeventig werden 35 onderzoeken, die in verschillende delen van de wereld waren uitgevoerd in de periode 1938-1974, samengevoegd en werd er een meta-analyse uitgevoerd op de 200.000 verzamelde “comfort votes” (Humphreys & Nicol, 1975).

De onderzoekers Humphreys en Nicol stelden dat als mensen zouden adapteren aan hun alledaagse omgeving, hun optimale comforttemperatuur gecorreleerd zou moeten zijn met de gemiddelde temperatuur van de ruimte waarin ze verbleven. In figuur 10 is te zien dat dit het geval is.



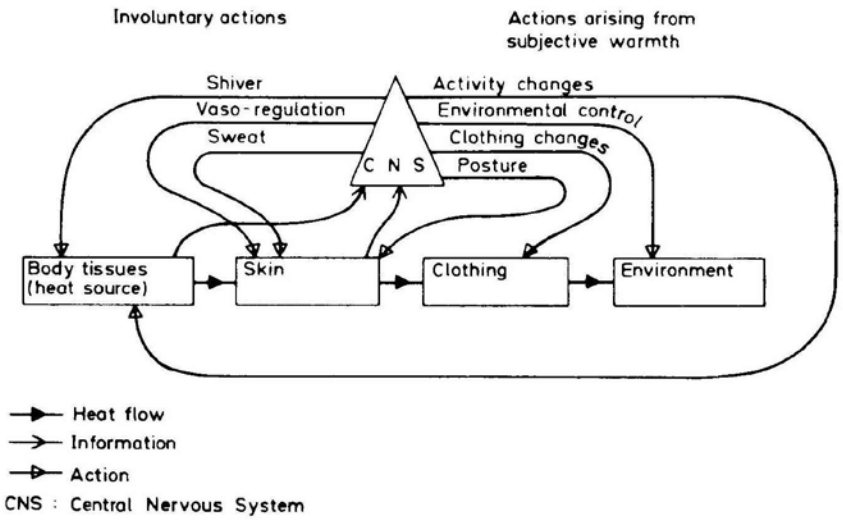

*Figuur 10: De neutrale luchttemperatuur (verticaal) uitgezet tegen de gemiddelde ruimteluchttemperatuur (Humphreys, 1975).*

Verdere analyses lieten zien dat de neutrale temperaturen sterk gecorreleerd waren met de buitentemperatuur en dat de sterkste relatie gold voor gebouwen die niet verwarmd of gekoeld (free-running) waren (zie figuur 11).




*Figuur 11: De neutrale temperatuur is gecorreleerd aan de gemiddelde maandtemperatuur Voor "free-running" gebouwen is het verband sterker dan voor gebouwen met verwarming en/of koeling.*

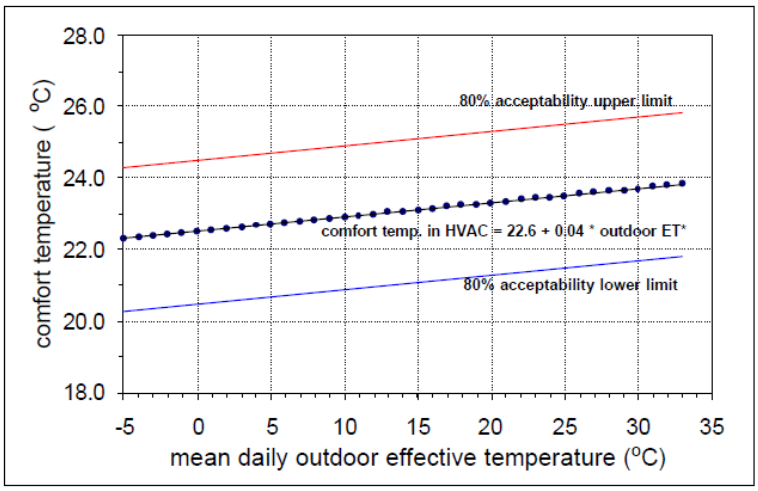
Op basis van de analyses van de onderzoeksresultaten werd een model ontwikkeld (Nicol, 1973) waarbij thermisch comfort werd gezien als een zelfregelend systeem in de mens, waarin warmtestromen niet alleen fysisch en fysiologisch worden voorgesteld, maar waarbij bewust en onbewust menselijk gedrag, zoals het aanpassen van het activiteitsniveau, het aanpassen van kleding en aanpassingen aan de omgeving zeer belangrijk is voor het bereiken van thermisch comfort (figuur 12).



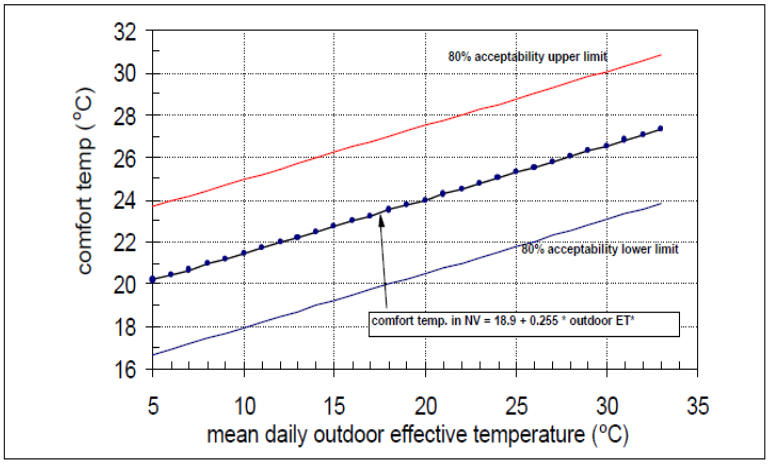

*Figuur 12: Het thermoregulatiesysteem van de mens volgens Nicol (1973). Dit bestaat uit bewuste en onbewuste regelkringen. Bij de onbewuste regelkring geven de huid en de kern van het lichaam, waar de warmte wordt geproduceerd, het centraal zenuwstelsel informatie, zodat actie kan worden ondernomen in de vorm van rillen, bloedvatverwijding en bloedvatvernauwing en zweten, om de kerntemperatuur op circa 37°C te houden. Door het subjectieve warmtegevoel wordt het gedrag aangepast, door de kleding aan te passen, door de omgevingstemperatuur aan te passen of door de mate van inspanning aan te passen.*

Halverwege de jaren negentig ontstond het inzicht dat de comfortbeleving van mensen in praktijkomstandigheden niet altijd overeen kwam met de voorspellingen van het PMV-model of andere thermofysiologische klimaatkamermodellen. Een belangrijk onderzoek dat het denken over thermisch comfort sterk heeft beïnvloed is een heranalyse van onderzoek in 161 gebouwen verspreid over verschillende delen van de wereld (de Dear, 1997). Figuur 13en 14 zijn afkomstig uit dit onderzoek en laten zien dat:

- de comforttemperatuur samenhangt met de gemiddelde buitentemperatuur: hoe warmer het buiten is hoe hoger de comforttemperatuur binnen. Gebouwbewoners wennen en adapteren aan temperaturen die met de buitentemperatuur mee variëren.
- de comforttemperatuur in natuurlijk geventileerde, niet gekoelde gebouwen, hangen sterker samen met de buitentemperatuur dan in airconditioned gebouwen.

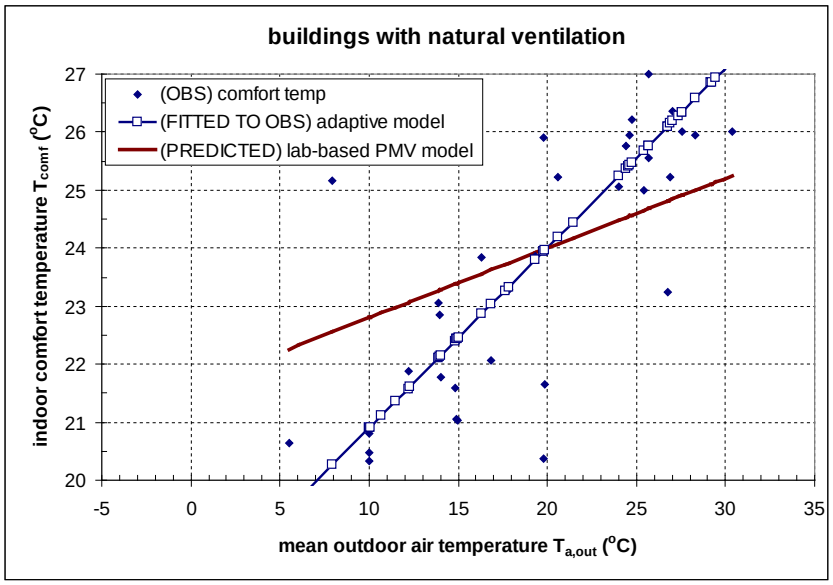



*Figuur 13: Comforttemperatuur in relatie tot de buitentemperatuur in gebouwen met centrale airconditioning.*



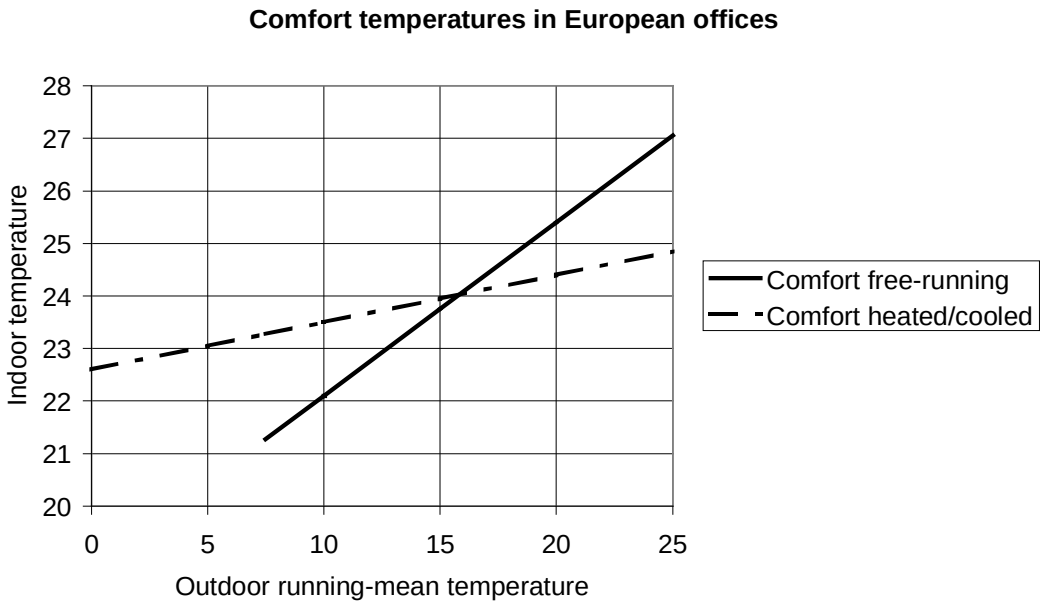

*Figuur 14: Comforttemperatuur in relatie tot de buitentemperatuur in gebouwen met natuurlijke ventilatie.*

In figuur 15 zijn de comforttemperaturen die met het PMV-model zijn voorspeld, vergeleken met de werkelijk waargenomen comforttemperaturen voor de “natuurlijk geventileerde” gebouwen. Hoewel het PMV-model enigszins “adaptief” is als de juiste waarden voor kledingweerstand worden gebruikt, afhankelijk van de gemiddelde buitentemperatuur, blijkt het PMV model het thermisch comfort niet goed te voorspellen. Dit komt doordat de comforttemperatuur die mensen onbewust verwachten, afhankelijk zijn van de comforttemperaturen van de afgelopen dagen. Hierdoor hangen de comforttemperaturen in werkelijkheid sterker samen met de buitentemperatuur, dan uit het PMV-model blijkt (de Dear, 2002).




*Figuur 15: Waargenomen (OBS) en voorspelde comforttemperaturen voor natuurlijk geventileerde gebouwen (de Dear, 2002).*

In een later onderzoek in 25 gebouwen in West-Europa (Nicol, 2005) werd onderscheid gemaakt tussen “free-running” en “verwarmde en gekoelde” omstandigheden (figuur 16). Ook hier is goed te zien dat mensen in zekere mate wennen of *adapteren* aan de gemiddelde temperaturen die in gebouwen voorkomen. In “free running” omstandigheden is de binnentemperatuur en comforttemperatuur sterker gecorreleerd dan in omstandigheden waar wordt verwarmd en/of gekoeld. Een gebouw kan in verschillende periodes verschillende binnenklimaatomstandigheden of “modussen” hebben, bijvoorbeeld “free-running” bij een buitentemperatuur 12 en 25 °C, verwarmd bij temperaturen beneden 12°C en gekoeld bij buitentemperaturen boven 25°C.




*Figuur 16: Gemiddelde comforttemperaturen voor “free-running” (getrokken lijnen) en verwarmde en gekoelde gebouwen (streepjes lijn), afhankelijk van de “running mean outdoor temperature” (Nicol, 2005).*

De gemiddelde comforttemperatuur wordt als volgt berekend:

$T_c = 0{,}33\ T_{rm} + 18{,}8$

Op de horizontale as staat een gewogen gemiddelde buitentemperatuur over de voorgaande 5 dagen waarbij gisteren zwaarder weegt dan eergister, etcetera:

$t_{rm} = (1- 0{,}8).\{t_{od-1} + 0{,}8.t_{od-2} + 0{,}8^2 t_{od-3}.....\}$

$t_{od-1}$ = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur gisteren
$t_{od-2}$ = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur eergisteren
$t_{od-3}$ = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur eereergisteren
$t_{od-4}$ = etc.

of vereenvoudigd:

${}_n t_{rm} = (0{,}2).t_{od-1} + 0{,}8.{}_{n-1}t_{rm}$

${}_n t_{rm}$ = de ‘running mean outdoor temperature’ op dag n, en ${}_{n-1}t_{rm}$ is running mean outdoor temperature van de dag ervoor.
$t_{od-1}$ = gemiddelde van de maximum en minimum buitentemperatuur gisteren.

Bovenstaande onderzoeksresultaten zijn de basis voor de ontwikkeling van adaptieve normen en richtlijnen (zie hoofdstuk 3.2).

# 3 Normen en richtlijnen voor thermisch comfort

De nationale en internationale normen en richtlijnen voor thermisch comfort zijn aanvankelijk allemaal gebaseerd op het PMV/PPD-model. Meer recent zijn ook richtlijnen toegevoegd gebaseerd op adaptief thermisch comfort, hoewel deze nog het karakter hebben van een alternatieve methode. De verwachting is dat naarmate duurzaamheid een grotere rol gaat spelen in normen en richtlijnen, adaptief comfort een prominentere rol gaat spelen.

## 3.1 Normen en richtlijnen gebaseerd op klimaatkameronderzoek

De belangrijkste normen, gebaseerd op klimaatkamer onderzoek, zijn:

- NEN-EN-ISO 7730: 2005 'Klimaatomstandigheden – Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV- en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid'.
- NEN-EN 15251: 2007 'Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek'.
- ASHRAE standard 55: 2004 'Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy'.

Als voorbeeld worden in tabel 1 enkele grenswaarden, gebaseerd op het PMV-model, uit NEN-EN-ISO 7730 gegeven.

*Tabel 1: Grenswaarden voor ruimtetemperatuur in zomer en winter voor 2 verschillende activiteitenniveaus*

| ***Activiteit*** | ***Ruimtetype*** | **Klasse** | ***Operatieve temperatuur (ºC)*** | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ***Zomer (0,5 clo)*** | ***Winter (1,0 clo)*** |
| Voornamelijk zittend (1,2 met) | Kantoor, vergaderruimte, restaurant, klaslokaal | A | 23-26 +IB | 20-24 +IB |
| | | B | 23-26 | 20-24 |
| | | C | 22-27 | 19-25 |
| Voornamelijk staand (1,6 met) | Laboratorium, winkel | A | 21-25 +IB | 16-22 +IB |
| | | B | 21-25 | 16-22 |
| | | C | 20-26 | 15-23 |

+IB = individuele beïnvloeding van de temperatuur (zomer en winter)

In de tabellen wordt onderscheid gemaakt tussen 3 binnenklimaatklassen. Er wordt gesteld dat klasse A tot meer comfort leidt dan klasse B en C, terwijl klasse B weer beter is dan klasse C.

*Temperatuursoverschrijdingsberekeningen*

Op basis van het PMV-model zijn richtlijnen en normen ontwikkeld. Eind jaren zeventig is in Nederland (door de Rijksgebouwendienst en de toenmalige Rijks Geneeskundige Dienst) vastgelegd dat een "goed" binnenklimaat moet voldoen aan -0,5 < PMV < 0,5 (10% ontevredenen). Een overschrijding van deze grenzen mocht onder bijzondere omstandigheden plaatsvinden tot -1,0 < PMV < 1,0 (25% ontevredenen), gedurende maximaal 10% van de tijd (100 uur in de zomer). Onder bijzondere omstandigheden werden onder andere verstaan sporadisch voorkomende hitte- of koudepieken en storingen aan klimaatinstallaties. Later resulteerde dit in de zogenaamde temperatuursoverschrijdings (TO)-methode van de Rijksgebouwendienst waarin werd gesteld dat 25°C maximaal 100 uur per jaar mag worden overschreden en 28°C maximaal 10-20 uur. Dit werd berekend met een

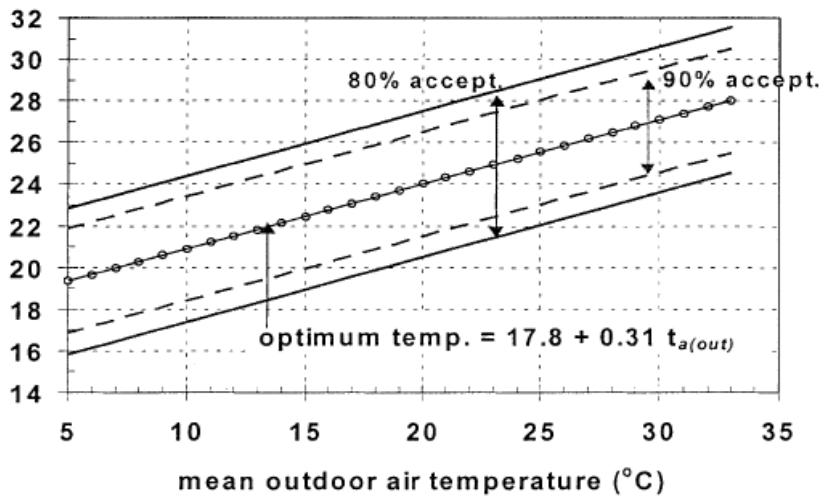
referentie klimaatjaar, meestal 1964 (Dit jaar kan echter, in het licht van de zich tekenende klimaatverandering, niet meer worden aangemerkt als een representatief jaar. In warmere jaren zullen de overschrijdingen talrijker zijn. Er is daarom ook een nieuw referentiejaar ontwikkeld, NEN-5060, dat beter de huidige klimaatsituatie weergeeft). Omdat in gebouwen met veel thermische massa minder hoge temperaturen voorkomen met minder fluctuatie dan in gebouwen met weinig massa en dit onvoldoende tot uitdrukking kwam in de TO-methode ontwikkelde de Rijksgebouwendienst een methode waarbij de mate van overschrijding van de grens PMV = 0,5 wordt beoordeeld door middel van een ‘weegfactor’ die was afgeleid van de PMV/PPD-relatie. Grotere overschrijdingen worden strenger beoordeeld dan kleinere overschrijdingen. Een weegfactor kreeg bij PMV=0,5 (PPD=10%) de waarde 1. Op basis van computersimulaties werd vastgesteld dat in een gebouw met middelzware thermische massa de PMV bij een 100-urige overschrijding van de grenswaarde (PMV = 0,5), gemiddeld circa 0,7 bedraagt. Hierbij is de PPD 15% en de weegfactor dus 1,5, wat weer leidt tot 150 weeguren. Dit werd de Gewogen Temperatuur Overschrijdingsmethode (GTO) genoemd (Van der Linden, 2001).

## 3.2 Normen en richtlijnen gebaseerd op adaptief thermisch comfort

De resultaten van de vele veldonderzoeken hebben geleid tot nieuwe richtlijnen en de aanpassing van normen.

In de Amerikaanse ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2010) is het adaptieve model (figuur 21) een “optionele methode”, naast de PMV-PPD-methode, die alleen kan worden toegepast onder de volgende omstandigheden:

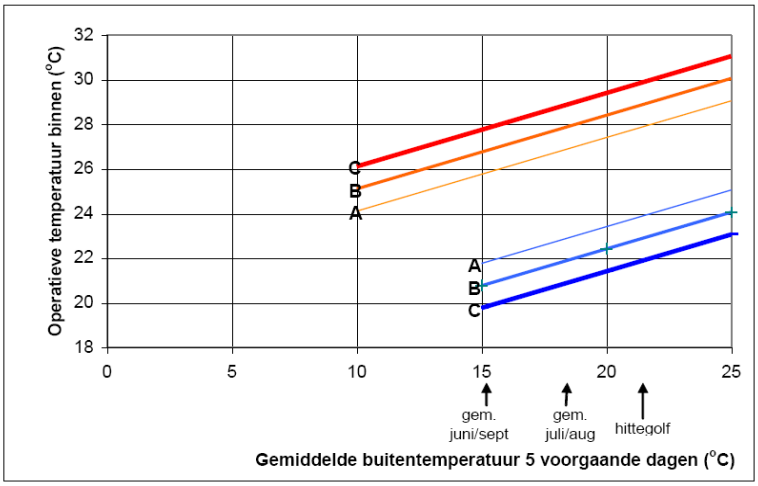
- Natuurlijk geventileerde gebouwen waar de thermische condities hoofdzakelijk worden geregeld door de gebruikers door het openen en sluiten van de ramen. De ramen moeten gemakkelijk bereikbaar en bedienbaar zijn.
- De ruimtes hebben soms verwarming, maar de methode is niet van toepassing als de verwarming functioneert.
- Ruimtes kunnen geen mechanische koeling hebben (zoals gekoelde lucht, stralingskoeling).
- Ruimtes kunnen van mechanische ventilatie, zonder koeling, voorzien zijn, maar het openen en sluiten van de ramen is de voornaamste methode voor het regelen van de thermische condities.




*Figuur 17: The adaptive comfort standard in naturally ventilated spaces as a function of prevailing outdoor air temperature. ta(out) is simply an arithmetic average of the mean monthly minimum and maximum daily air temperatures for the month in question.*

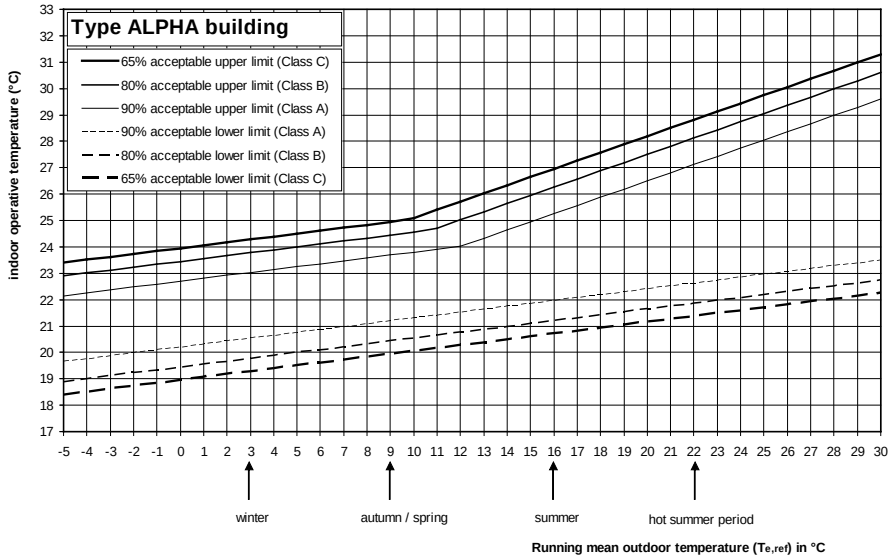
Ook in Europese NEN ISO 15251(NEN ISO, 2007) is de mogelijkheid aanwezig om te ontwerpen op basis van de adaptieve benadering. Deze norm geeft aan dat onder bepaalde voorwaarden de adaptieve temperatuurbandbreedte (zie figuur 18) kan worden aangehouden. De voorwaarden zijn:

- Er is voorzien in te openen ramen;
- Er is niet voorzien in een systeem voor actieve, mechanische koeling;
- Gebouwgebruikers mogen naar eigen inzicht hun kledingisolatie aanpassen (geen “dresscode”).

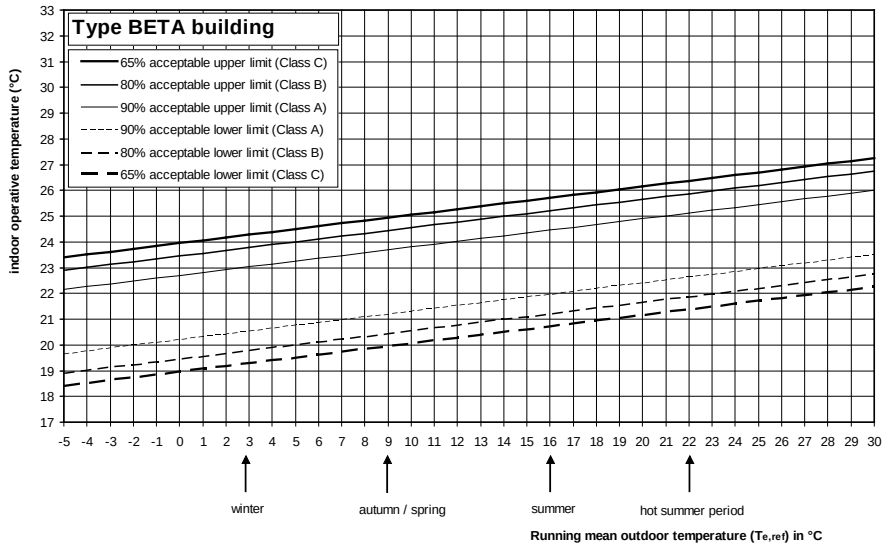



*Figuur 18: Maximum en minimum temperatuur in gebouwen met een hoge mate van gebruikersinvloed (geen dresscode, te openen ramen, geen actieve koeling) voor de zomerperiode zoals vastgelegd in NEN-EN 15251.*

In Nederland is een richtlijn ontwikkeld op basis van de onderzoeksgegevens van veldonderzoek (de Dear, 1997). Dit wordt de Adaptieve Temperatuurgrenzen (ATG)-methode genoemd (ISSO 74, 2004). Figuur 19 toont de temperatuurgrenzen voor een binnenklimaat zonder mechanische koeling (type Alpha genaamd) en figuur 20 geeft de grenzen voor een binnenklimaat met mechanische koeling (type Beta).




*Figuur 19: type Alpha building/climate. Limits of operative indoor temperatures for 90%, 80% and 65% acceptability, as a function of the weighted outdoor temperature $T_{e,ref}$.*



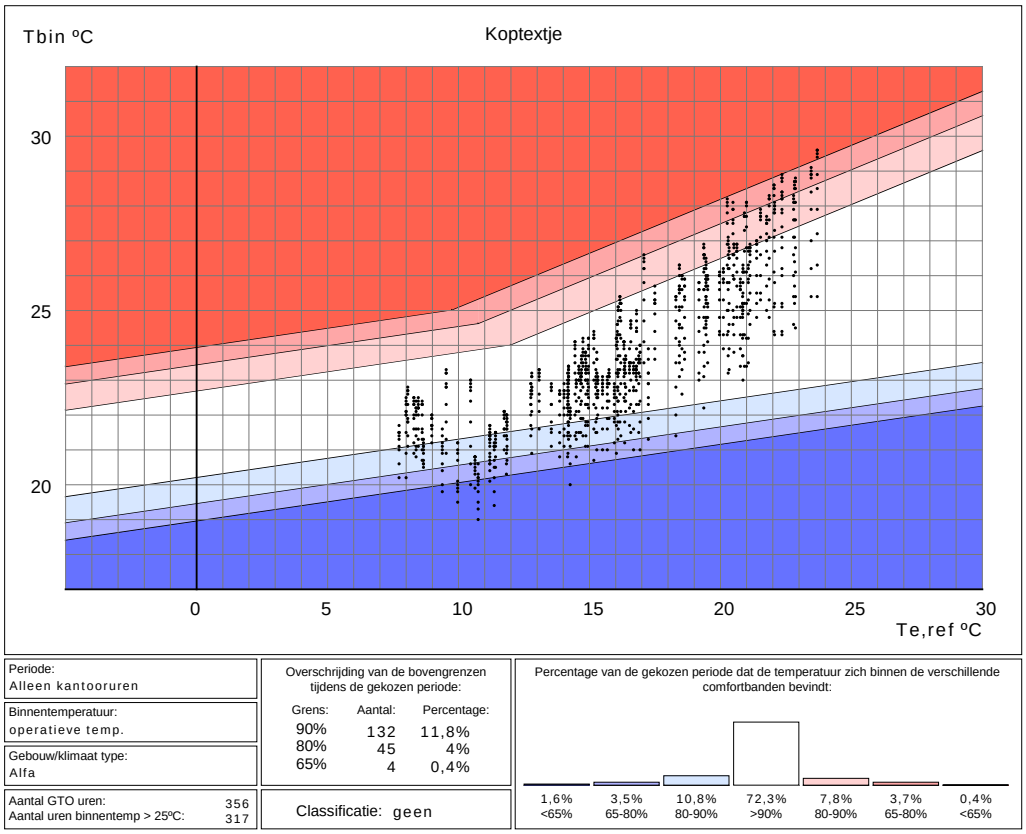

*Figuur 20: type Beta building/climate. Limits of operative indoor temperatures for 90%, 80% and 65% acceptability, as a function of the weighted outdoor temperature $T_{e,ref}$.*

Het onderscheid tussen een Alpha- en Betaklimaat wordt in ISSO74 gemaakt met behulp van een keuzeschema, waarin keuzes moeten worden aangegeven over de mogelijkheden om de temperatuur te beïnvloeden door bijvoorbeeld te openen ramen, aanpassing van kleding en de aanwezigheid van mechanische koeling. Voor bovenstaande figuren geldt verder:

- De verticale as geeft de comforttemperatuur weer, uitgedrukt als de *operatieve temperatuur*, hier aangenomen als het rekenkundig gemiddelde van de luchttemperatuur en de stralingstemperatuur.
- Langs de horizontale as staat de $T_{e,ref}$, de Running Mean Outdoor Temperature. Deze wordt bij de ATG-methode berekend uit het gemiddelde van de maximale en minimale buiten(lucht)temperatuur van de beschouwde dag en de 3 dagen daaraan voorafgaand, volgens de onderstaande formule:

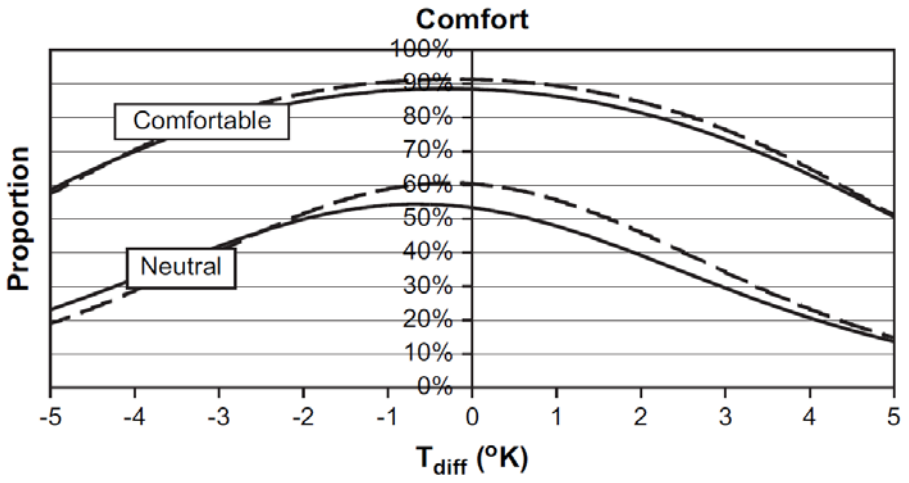
$$T_{e,ref} = \frac{(1 \cdot T_{vandaag} + 0{,}8 \cdot T_{gisteren} + 0{,}4 \cdot T_{eergisteren} + 0{,}2 \cdot T_{eer\text{-}eergisteren})}{2{,}4}$$

In figuur 21 is een voorbeeld gegeven van een uitvoervisualisatie van het simulatieprogramma VA114. De methode wordt meestal zo geïnterpreteerd dat zodra berekende temperaturen een grens overschrijden, bijvoorbeeld de 90% of klasse A grens, het klimaat als 80% of klasse B wordt gekenmerkt, als de 80% of klasse B grens niet ook wordt overschreden. In bovengenoemd voorbeeld het voldoet de simulatie zelfs niet aan Klasse C.




*Figuur 21: Voorbeeld van een uitvoervisualisatie van VA114 (berekend met klimaatjaar 1964). De uren dat een bepaalde grens wordt overschreden worden opgeteld en bepaalt de klimaatklasse.*

Voorzichtigheid is geboden bij het interpreteren van simulaties. De bandbreedte voor comfortabele temperaturen (figuur 21) geeft aan dat bijvoorbeeld minimaal 80% van de bewoners de thermische omgeving acceptabel vindt, maar hierbij wordt geen aanwijzing en maat gegeven hoe overschrijdingen van de bandbreedte moet worden beoordeeld. De bandbreedte van het comfortgebied wordt aangeven door middel van lijnen. In de praktijk worden deze lijnen als scherpe grenzen geïnterpreteerd, maar dat zijn het niet. Het is een verdeling van comforttemperaturen en het ligt in de natuur van verdelingen dat ze geleidelijk verlopen en niet nauwkeurig of scherp zijn (figuur 22).




*Figuur 22: Percentage mensen dat comfortabel en neutraal aangeeft voor free running (getrokken lijn) en airconditioned (gestippelde lijn) gebouwen, afhankelijk van de afwijking met de gemiddelde neutrale temperatuur (Nicol, 2010).*

Een stukje onder of boven de “grenslijn” heeft dus weinig effect op de mate van comfort. Als tijdens het ontwerp  temperatuursimulaties worden uitgevoerd zullen verschillen en onnauwkeurigheden in bijvoorbeeld bouwfysische gegevens en installatietechnische invoerparameters, verschillen in weerbestanden, verschillen in simulatiesoftware en bijvoorbeeld verschillen in aanwezigheidsuren leiden tot berekende temperaturen die net binnen of net buiten de “grens” liggen. De norm suggereert dat er binnen de bandbreedte geen oververhitting zal worden ervaren en erbuiten wel, maar in werkelijkheid kunnen er klachten zowel binnen, als buiten het comfortgebied zijn. De berekende temperaturen hebben een verdeling met een bepaalde waarschijnlijkheid, dus is een genuanceerde beoordeling hier op zijn plaats. Er is dus duidelijk behoefte aan een nieuwe, wetenschappelijk gefundeerde benadering voor het bepalen van de “overschrijdings” uren.

**Tot slot**

De evolutie van de mens kenmerkt zich door het vermogen tot aanpassing aan veranderende omstandigheden. Gebouwen die zich wat het binnenklimaat betreft min of meer onafhankelijk van de buitenomstandigheden gedragen zorgen ervoor dat de bewoners gaan wennen aan een binnenklimaat dat weinig relatie met het buitenklimaat heeft. Hierdoor verliezen de bewoners hun adaptieve vermogens en zullen onverwachte temperatuurveranderingen tot ontevredenheid over het binnenklimaat kunnen leiden. Bovendien zullen dergelijke gebouwen gemiddeld meer energie gebruiken dat gebouwen waarin het binnenklimaat wel gerelateerd is aan het buitenklimaat.

Klimaat adaptieve gebouwen daarentegen geven zo veel mogelijk bewoners de mogelijkheid te adapteren doordat deze aan een aantal essentiële voorwaarden voldoen (Humphreys, 2007, 2010; Nicol 2011):

- *Gebruikelijke en voorspelbare temperaturen*. Bewoners adapteren aan de temperaturen waaraan ze gewoonlijk worden blootgesteld. Dit komt omdat enerzijds de binnentemperaturen zoveel mogelijk door de gebruikers worden beïnvloed en anderzijds doordat de gebruikers hun kleding en gedrag aan de binnentemperaturen aanpassen. Zo ontstaat een bandbreedte van gebruikelijke temperaturen, die van gebouw tot gebouw of van land tot land een beetje of juist aanzienlijk kunnen verschillen. Dit functioneert goed,

zolang er geen beperkingen bestaan, zoals niet te openen ramen of een niet flexibele dresscode.

- *Veranderende temperaturen en thermische stabiliteit*. De temperaturen zijn niet vast, maar bewegen door veranderingen die binnen en buiten optreden. Dit maakt adaptatie gemakkelijker. Maar te snelle, onvoorspelbare of “onnatuurlijke” veranderingen leiden tot discomfort en klachten, terwijl geleidelijke veranderingen over dagen acceptabel zullen zijn.
- *Adaptieve mogelijkheden.* Gebruikers moeten zoveel mogelijk mogelijkheden hebben om hun omgevingstemperatuur en hun comforttemperatuur met elkaar in overeenstemming te brengen. Hiervoor is het belangrijk dat er te openen ramen, temperatuurinstellingen, zonwering, lichtwering of ventilatoren beschikbaar zijn. Alleen de beschikbaarheid is niet voldoende, de voorzieningen moeten aan eisen voldoen betreffende de instelbaarheid, effectiviteit, gebruikersvriendelijkheid, ergonomie, etc.
- *Kleding*. In een richtlijn of norm zou informatie moeten staan over de invloed van kledinggedrag en dresscodes, omdat niet-flexibele dresscodes het thermisch comfort en het energiegebruik nadelig zullen beïnvloeden. Dresscodes dienen daarom variabel te zijn en rekening te houden met de verschillende seizoenen.

# 4 Literatuur

- ANSI ASHRAE standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2010, ISSN 1041-2336.
- Bedford T.. The Warmth Factor in Comfort at Work. Report No. 76 of the Industrial Health Research Board, issued by the Medical Research Council. . H.M. Stationery Office, 1936. London.
- Borgeson, S., Brager, G., Comfort Standards and variations in exeedance for mixed-mode buildings, Building Research & Information (2011) 39 (2), pp. 118-133.
- de Dear, R., Brager G., “Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and Buildings 34 (2002) 549–561.
- de Dear, R., Brager, G., Cooper, D. (1997), “Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference”, Final report ASHRAE RP-884.
- Fanger, P.O., Thermal comfort – Analyses and Application in Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York, 1970.
- Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., Y. Nishi, An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Transactions 77 (1) (1971) 247–262.
- Hellwig R.T., Brasche S., Bischof W.. Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning, Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right, Winsor 2006.
- Huizenga, C., Abbaszadeh, S., Zagreus, L., Arens, E.A., Air Quality and Thermal Comfort in Office Buildings: Results of a Large Indoor Environmental Quality Survey, Proceedings of Healthy Buildings 2006, Lisbon,Vol. III, 393-397.
- Humphreys M.A., Field studies of thermal comfort compared and applied, Journal of Institution of Heating and Ventilation Engineer 44 (1975) 5–27.
- Humphreys, M.A,, Rijal, H.B., Nicol, J.F., Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors, Proceedings of conference: Adapting to Change: New thinking on Comfort, Cumberlands Lodge, Windsor, UK, 9-11 april 2010. London, Network for Comfort and Energy Use in Buildings.
- Humphreys, M.A,.“Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research”, in *Proceedings of a conference: Thermal comfort: past, present and future*, Building Research Establishment, Garston, 9-10 June 1993.
- Humphreys, M.A., Nicol, J.F., Raja, I.A., Field studies of Indoor Thermal Comfort and the Progress of the Adaptive Approach, in Advances in Building Energy Research, Vol. 1, pp 55-88, 2007.
- ISSO74 74, Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen (2004), ISSO-publicatie 74, Rotterdam, 2004.
- Literatuuronderzoek naar State of the Art Binnenmilieu, S.R. Kurvers, A.K. Raue, E.E. Alders, J.L. Leijten, FACET.
- Mendell, M.J. and Smith, A.H. 1990. Consistent Pattern of Elevated Symptoms in Air-conditioned Office Buildings: A Reanalysis of Epidemiologic Studies, American Journal of Public Health 80 (10), 1193-1199.
- Mendell, M.J., Ventilation systems and building related symptom: An Epidemiological Perspective, NIOSH, USA, Healthy Buildings 2000. Pasanen, e.a. Rehva Guidebook no: 8 Cleanliness of ventilation systems, Rehva, 2007. ISSO Publicatiereeks 100 – e.v., Duurzaam beheer en onderhoud van gebouwen, Rotterdam 2010.

- NEN-EN 15251 (2007), ‘Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek’.
- Nicol J.F., Humphreys M.A., Thermal comfort as part of a self-regulating system, Building Research and Practice (J CIB) 6 (3) (1973) 191–197.
- Nicol, F., Humphreys, M. (2006), 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, Brussels, 2005.
- Nicol, F., Wilson, M., “An overview of the European standard EN 15251”, in Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort, Windsor, UK, 9-11 April 2010.
- Nicol, J.F., Adaptive Comfort, Editorial in Building Research and Information (2011), 39(2), 105-107.
- Nicol, J.F., Wilson, M., A Critique of European Standard EN15251: strength, weaknesses and lessons for future standards, Building Research and Information (1010) 29(a), 183-193.
- Nicol. F.J., Hacker, J., Spires, B., Davies, H., Suggestion for new approach to overheating diagnostics, Building Research and Information 37(4), pp. 348-357, 2009.
- Olesen, B., The philosophy behind EN15251, Energy and Buildings 34(6), pp 537-548, 2007.
- Seppänen, O. and Fisk, W.J. 2002. Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers, Indoor Air, 12 (1), 98-112.
- Shove, E., “Social, architectural and environmental convergergence”, in Environmental Diversity in Architecture, Koen Steemers, Mary Ann Steane (Eds), 2004.
- Stoops, J.L., “A possible connection between thermal comfort and health”, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2004.
- Van der Linden A.C., Boerstra A.C., Raue A.K., Kerssemakers M., Thermisch binnenklimaat als gebouwprestatie”, TVVL Magazine, Jaargang 30, februari 2001, pp 20-25.
- Webb, C.G. ‘An Analysis of Some Observations of Thermal Comfort in an Equatorial Climate’, British Journal of Industrial Medicine 16, 1959.