Het binnenklimaat in de zomer: Conflict tussen theorie en praktijk?*

The indoor climate in summertime: conflict between theory and practice.

Ing. B. Bronsema*

Samenvatting

Al ruim twintig jaar wordt het thermo-fysiologisch model van Fanger gebruikt als uitgangspunt voor aan het binnenklimaat in de zomer te stellen eisen. Praktijkonderzoek wijst echter uit dat de optimaal behaaglijke conditie – PMV = O – bij een ca. 2,5°C lagere ruimtetemperatuur ligt, dan op basis van het Fangermodel – 'de theorie' te verwachten zou zijn.
Te lage schattingen van het metabolisme en de kledingweerstand zijn waarschijnlijk de oorzaak van deze verschillen. Ook wordt een mogelijke modelfout gesignaleerd.

Summary

For more than twenty years Fanger's thermal-psysiological model has been used as a basis for the summer conditions of the inner climate.
Practical research however shows that the optimal comfort condition –PMV = 0 – lies at an inner-temperature, approx $2^1/_2$°C lower than, based on Fanger's model – the theory –, might be expected.
Probably too low estimates of the metabolism and the resistance of clothing are the cause of this difference.
A possible mistake of the model is mentioned as well.

Inleiding.
In 1970 sloot P.O. Fanger zijn onderzoek inzake thermische behaaglijkheid af met de publikatie van zijn dissertatie. Twee jaar later kreeg deze wereldbekendheid door de Amerikaanse editie "Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering" [1]. Sedertdien is het door Fanger ontwikkelde thermo-fysiologisch model algemeen aanvaard, en zijn op basis hiervan nationaal en internationaal standaards en aanbevelingen ontwikkeld voor het thermisch binnenklimaat. Enkele bekende instituten die zich op dit gebied verdienstelijk hebben gemaakt zijn ISO [2], Ashrae [3], DIN [4], NNI [5] en ISSO [6].

Het thermo-fysiologisch model van Fanger is ontwikkeld op basis van een theoretische analyse en uitgebreid onderzoek in Deense en Amerikaanse proefkamers. De proefpersonen waren jonge studenten. De onderzoeksresultaten zijn goed reproduceerbaar, hetgeen de juistheid van het model bevestigt.

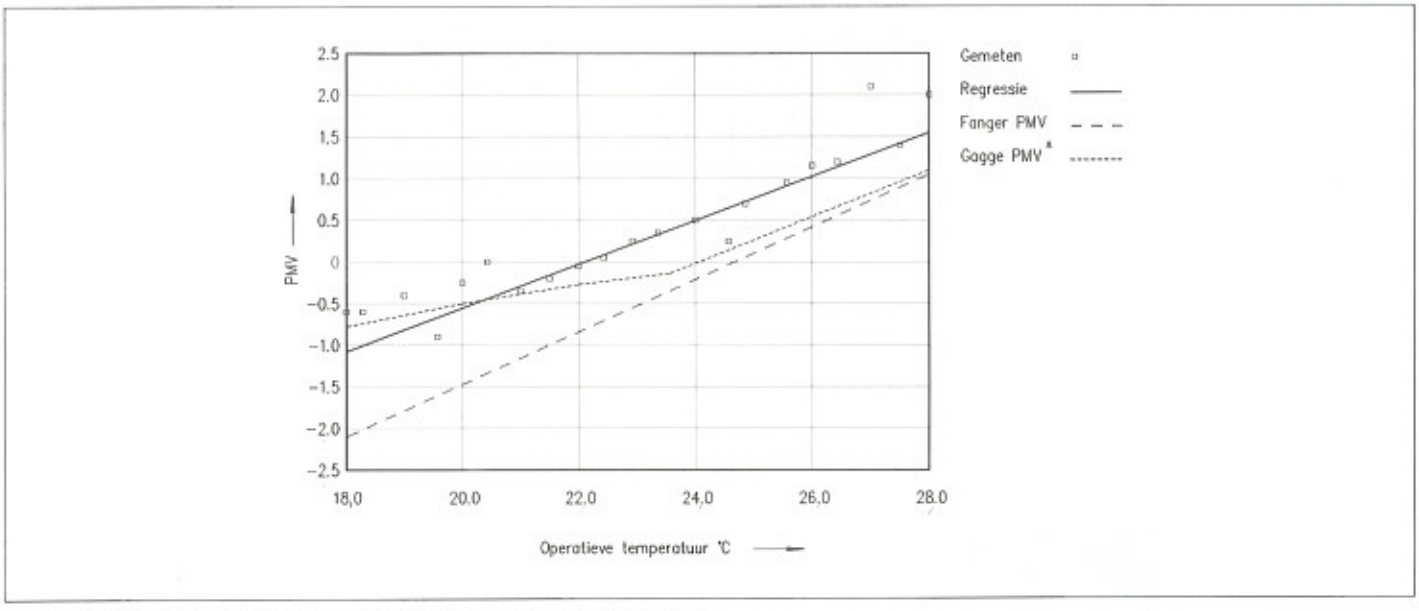
Door verschillende onderzoekers is in de tachtiger jaren ook praktijkonderzoek gedaan inzake het thermisch klimaat in bestaande kantoorgebouwen [7,8,9]. Een samenvattend en zeer leesbaar artikel hierover van de hand van Gail S. Brager verscheen in de Ashrae Journal van april 1992 [10]. De veelzeggende ondertitel van dit artikel luidt: "Current practices for maintaining comfortable thermal enviroments should be reexamined". Het praktijkonderzoek heeft inderdaad nogal grote verschillen aan het licht gebracht tussen de werkelijke waardering van het binnenklimaat en de op grond van het Fanger-model te verwachten waardering. De neutrale conditie – PMV = 0 – lag bij een ca. 2,5 K lagere ruimtetemperatuur. Het aantal potentiële klagers – PPD – was 12% in plaats van de theoretische 5%

Het onderzoek van Gail S. Brager
Het onderzoek werd uitgevoerd in 10 kantoorgebouwen in de regio van San Fransico tijdens het winter- en zomerseizoen van 1987. Totaal werden 2.342 enquêtes gehouden onder 304 employees. Bij elke enquête werden gegevens verzameld over de thermische gewaarwording, thermische voorkeur, behaaglijkheid, stemming, kleding en activiteit. Voor de thermische gewaarwording werd de bekende 7-punts Ashrae schaal gebruikt; zie tabel 1.
Direct na de enquête verliet de employee zijn werkplek en werden met behulp van een mobiele instrumentatieset de relevante omgevingsparameters gemeten: droge- en natte bol temperatuur, globetemperatuur, relatieve luchtsnelheid,

Getalwaarde voor PMV	*Gewaarwording*
+.3	heet
+ 2	warm
+ 1	lichtelijk warm
0	neutraal
- 1	lichtelijk koel
- 2	koel
- 3	koud

Tabel 1. Getalwaarde voor P.M.V. [6]

* Voordracht gehouden tijdens de sluitingsmiddag cursusseizoen 1992-1993 op 25 juni 1993.
** Directeur van Ketel Raadgevende ingenieurs te Delft.



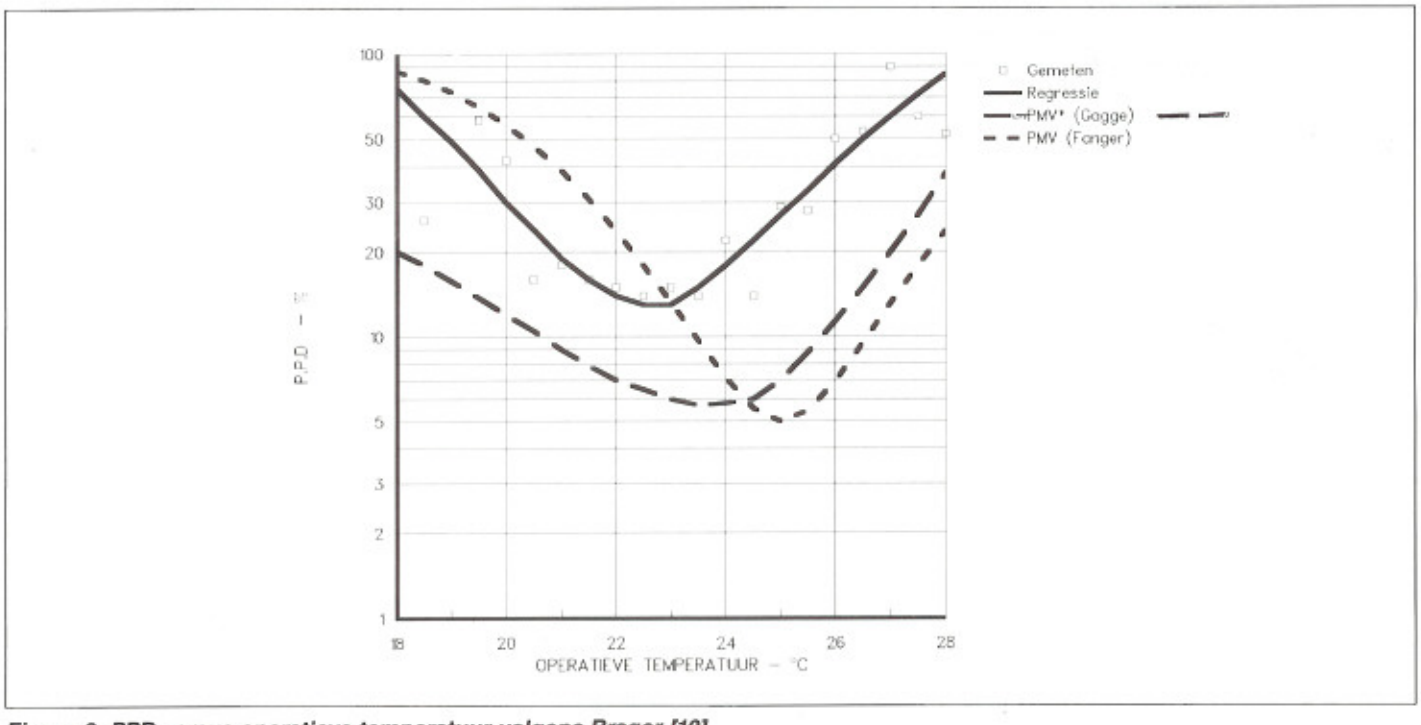
Figuur 1. PMV versus operatieve temperatuur volgens Brager [10]

stralingsassymetrie en lichtintensiteit. De resultaten van het onderzoek zijn weergegeven in figuur 1. Naast de geregistreerde waarden zijn in deze figuur ook de op grond van het Fanger-model te verwachten PMV waarden aangegeven, alsmede een door Gagge gemodificeerde versie hiervan, de PMV* [11]. Deze index houdt volgens Gagge beter rekening met de vochtigheid van het huidoppervlak bij de waardering van het binnenklimaat en geeft een grotere invloed aan verschillen in vochtigheid en dampdoorlatendheid van de kleding. Uit figuur 1 kunnen enkele conclusies worden getrokken:

a) Tussen ca. 19°C en 22°C is er een

Neutrale operatieve temperaturen T	*Winter*	*Zomer*
Gemeten	22,0 °C	22,6 °C
Voorspeld - PMV	24,4 °C	25,0 °C
Voorspeld - PMV*	23,6 °C	24,0 °C
Gemeten gemiddelden voor berekening PMV		
Luchttemperatuur	22,8 °C	23,3 °C
Gemiddelde stralingstemperatuur	23,0 °C	23,6 °C
Luchtsnelheid	0,06 m/s	0,10 m/s
Kledingweerstand	0,58 clo	0,52 clo
Metabolisme	1,12 met	1,14 met
Benodigde waarden om de voorspelde PMV en de gemeten T_o te verkrijgen*		
Kleding	0,80 clo	0,72
Activiteit	1,75 met	1,75 met

Tabel 2. Temperatuur bij PMV = 0 (gemeten en voorspeld)



Figuur 2. PPD versus operatieve temperatuur volgens Brager [10]

goede overeenstemming tussen de geregistreerde waarden en PMV*.

b) Bij temperaturen boven 22°C wordt de thermische gewaarwording zowel door PMV als PMV* met 0,5 à 1,0 schaaleenheid lager gewaardeerd. Mensen zullen de ruimte dus warmer ervaren dan op grond van PMV en PMV* voorspeld. 's Zomers is een 2° à 3°C lagere ruimtetemperatuur nodig om de score "Neutraal" te krijgen.

c) De PMV* index is, vooral bij lagere ruimtetemperaturen, beter in overeenstemming met de onderzoeksresultaten dan de PMV index.

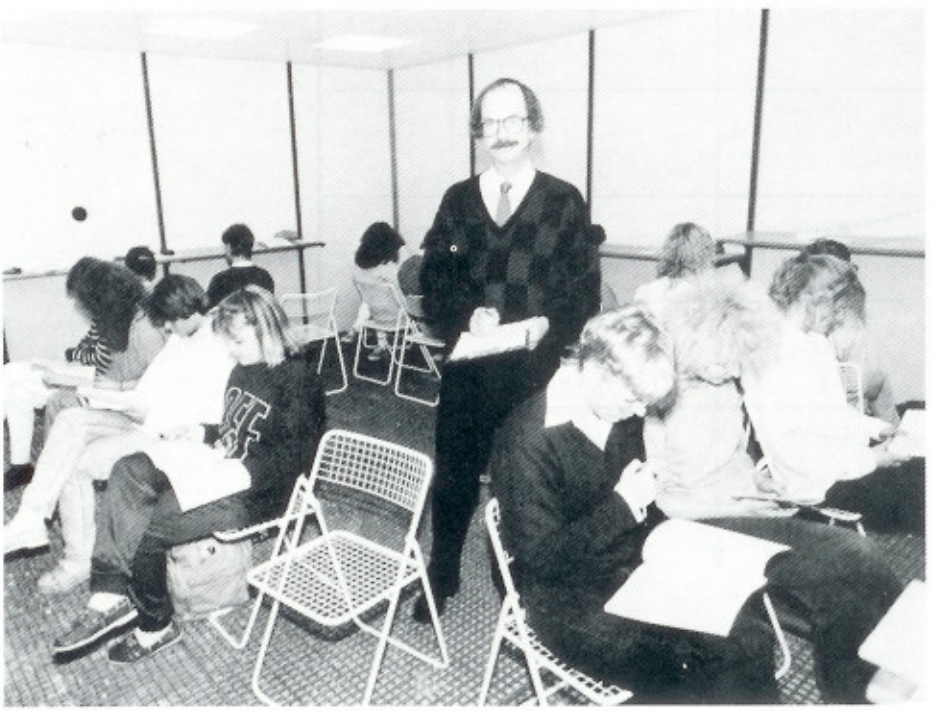
Tabel 2 geeft een overzicht van de gemeten en voorspelde ruimtetemperatuur bij PMV = 0. In de tabel zijn ook de omgevings- en de persoonsgebonden parameters vermeld.

Om de met het PMV* model berekende ruimtetemperaturen in overeenstemming te brengen met de onderzoeksresultaten zou een kledingweerstand van 0,72 clo moeten worden ingevoerd bij een metabolisme van 1,75 met.

Het onderzoek van Brager staat niet alleen, maar wordt bevestigd door verschillende andere onderzoekers [8,9]. Figuur 2 laat het PPD zien versus de operatieve temperatuur, ontleend aan hetzelfde onderzoek. Duidelijk is het verschil te zien tussen de optimale temperatuur uit het onderzoek, ca. 22,0 °C en de voorspelde optimale temperatuur van ca. 25°C bij Fanger (PMV) en ca. 24°C bij Gagge (PMV*). Het gemeten PPD bedraagt ca. 12% terwijl op grond van de modellen ca. 5% zou kunnen worden verwacht. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn de grote spreiding van de clo-waarde in actuele kantoorsituaties tegenover de strikt uniforme clo-waarden in het modelonderzoek.

Kledingstuk	$I_{cl.i.}$	
	[clo]	*[m².K/W]*
Panty	0,01	0,002
Sokken: dunne	0,03	0,005
dikke	0,04	0,006
Ondergoed: bh en slip	0,05	0,008
onderrok	0,13	0,020
slip (man)	0,05	0,008
onderhemd	0,06	0,009
Hemd:		
- T-shirt	0,09	0,014
- dun, met korte mouwen	0,20	0,031
- dun, met lange mouwen	0,28	0,043
- dik, met korte mouwen	0,25	0,039
Rok, dik	0,22	0,034
Japon: dun	0,17	0,026
dik	0,63	0,098
Trui		
- dun, met korte mouwen	0,17	0,026
- dik, met lange mouwen	0,37	0,057
Jas, dik	0,49	0,076
Lange broek:		
- dun	0,26	0,040
- gemiddeld	0,32	0,050
- dik	0,44	0,068
Schoene, licht	0,04	0,006

Tabel 3. Warmteweerstand van afzonderlijke kledingstukken [12]



Figuur 3. Klimaatkameronderzoek door P.O. Fanger

Persoonsgebonden parameters

Bij de geregistreerde en in de berekeningen verwerkte omgevingsparameters is er op grond van de onderzoeksresultaten eigenlijk maar één conclusie mogelijk:

De persoonsgebonden parameters zijn te laag aangenomen.

Deze parameters zijn:

- de warmteweerstand van de kleding = clo-waarde
- de warmte-ontwikkeling in de persoon = metabolisme

Om de gesignaleerde discrepanties tussen theorie en praktijk te verklaren is het verder noodzakelijk goed te kijken naar de condities waaronder het proefkameronderzoek heeft plaatsgevonden en deze te vergelijken met de praktijksituatie.

Warmte weerstand van de kleding: clo-waarde

Een berekening of schatting die het beste inzicht geeft in de clo-waarde gaat uit van de warmteweerstand van de afzonderlijke kledingstukken, waarbij de volgende formule kan worden gebruikt [5,12]:

I_{cl} = 0,82 $\Sigma_{cl.i.}$, waarin

I_{cl} = de intrinsieke warmteweerstand van de kleding in clo

$I_{cl,i}$ = idem van een afzonderlijk kledingstuk

De waarde van $I_{cl,i}$ kan worden ontleend aan tabel 3, ontleend aan [12]. De onnauwkeurigheid van deze schattingsmethode is ca. 25%!

Veronderstel dat een man in de zomerperiode de volgende kleding draagt:

	$I_{cl,i}$
- dunne sokken	0,03
- lichte schoenen	0,04
- hemd	0,06
- slip	0,05
- overhemd, korte mouw	0,20
- lange broek, gemiddeld	0,32
$\Sigma_{cl,i}$ =	0,70

$I_{cl,i}$ = 0,82 x 0,70 = 0,57 clo

- colbert, dun (schatting auteur)	0,40
$\Sigma_{cl,i}$ =	1,10

$I_{cl,i}$ = 0,82 x 1,10 = 0,90 clo

Als richtwaarde voor de gemiddelde kledingweerstand in de zomer wordt normaliter 0,7 clo aangehouden [6]. Dit is opvallend hoger dan in Amerika wordt geadviseerd, nl 0,5 clo [3], maar waarschijnlijk redelijk in overeenstemming met de nederlandse praktijk.

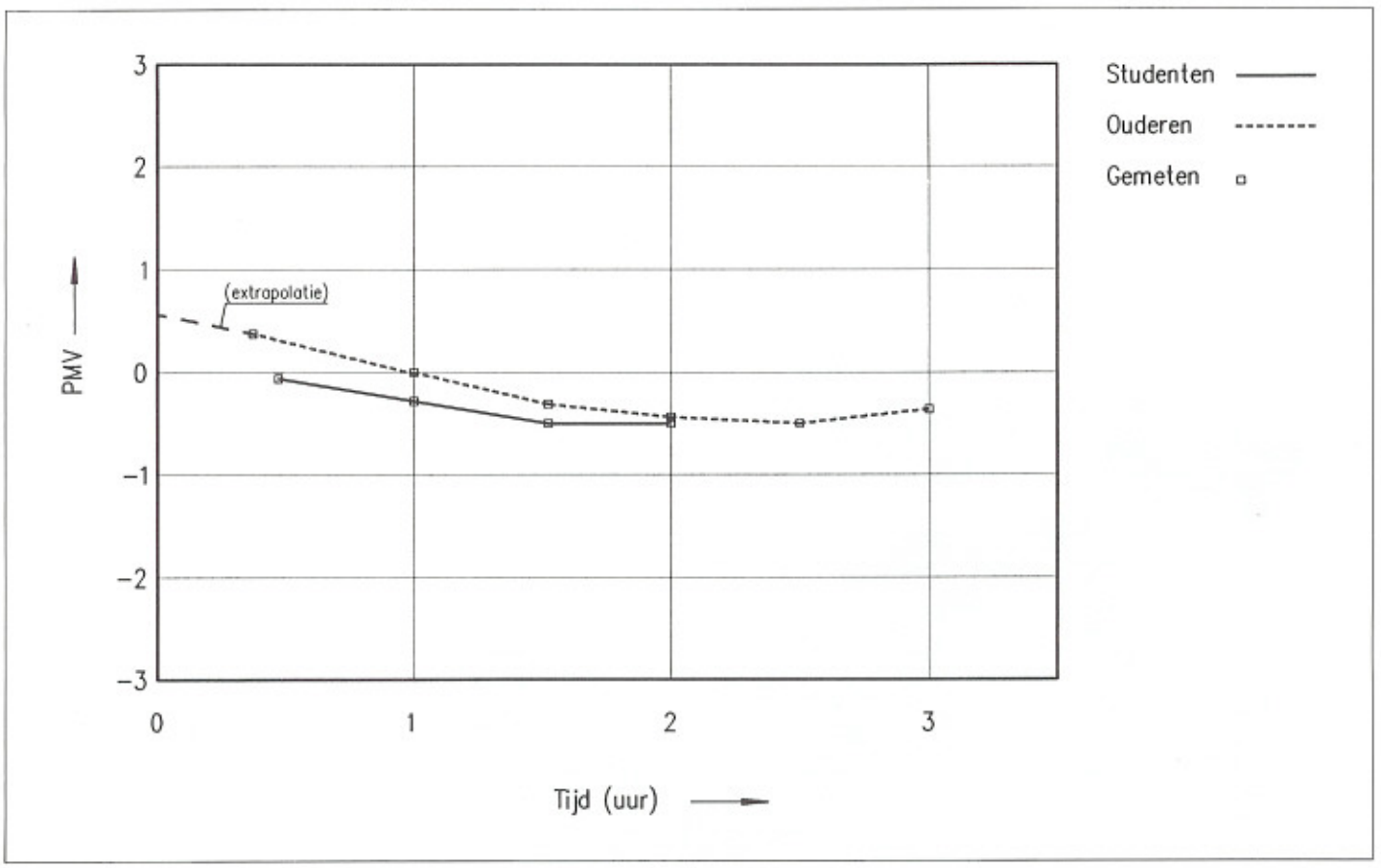
Formele organisaties, of afdelingen daarvan, waarin het "jasje uit" niet gebruikelijk of not-done is, vragen om een hogere clo-waarde. Vrouwen daarentegen dragen meestal kleding met een lagere warmteweerstand. De geïnteresseerde lezer kan hiervoor zelf rekenexercities maken.

Een niet onbelangrijk verschil tussen de proefkamer en de praktijk wordt gevormd door de gebruikte stoelen. Figuur 3 laat P.O. Fanger zien in één van de klimaatkamers van het Danish Institute of Technology. Opvallend zijn de draadstoelen die, in tegenstelling tot de normale bureaustoelen, het zitvlak en de rug niet isoleren, maar vrijhouden. In de praktijk is dit anders, waardoor 15 - 20% van het lichaamsoppervlak nauwelijks warmte aan de omgeving kan afstaan. Volgens Fanger zou dit gecompenseerd kunnen worden door een 0,1 ~ 0,2 hogere clo-waarde in te voeren. Als 20% van het lichaamsoppervlak geen warmte kan afstaan is het overigens gemakkelijk in te zien dat het temperatuurverschil tussen kledingoppervlak en ruimte 1/(1,0 - 0,2) = 1,25 x zo groot zal moeten zijn om dezelfde hoeveelheid warmte af te kunnen staan, ergo een lagere ruimtetemperatuur nodig is.

De warmteweerstand van de kleding heeft grote invloed op de PMV. Onder gemiddelde kantooromstandigheden betekent een verhoging met 0,1 clo een verhoging van de PMV index met 0,14 [6] uiteraard bij gelijkblijvende omgevingsparameters.

Warmteontwikkeling in de persoon: Metabolisme

Voor zittende activiteit wordt in kantoren normaliter een metabolisme van 1,2 met (≙ 70W/m²) aangehouden. Deze activiteit wordt als volgt omschreven [6]: "Moderne kantoorarbeid, zittend werk (schrijven, typen, werken met een PC), tekenen; arbeid met geringe beweging van armen en benen, lichte hand- en armarbeid. Karakteristiek is hier dat tijdens het werk bijna niet wordt gelopen". Dat tijdens het werk bijna niet wordt gelopen gaat in veel kantoororganisaties nauwelijks op. Regelmatig bezoek aan de koffieautomaat (koffiedames dreigen uit te sterven), toiletbezoek (evenredig aan het koffiegebruik), persoonlijk overleg in de organisatie, heen- en weer geloop naar besprekingen en vergaderingen (de vergadercultuur groeit nog steeds), maken veel kantoorwerkers redelijk mobiel. Het hogere metabolisme tijdens deze acitiveiten, stel 1,7 met, neemt slechts langzaam af als het zittende werk weer begint. Ter illustratie hiervan wordt verwezen naar figuur 4 ontleend aan het oorspronkelijke onderzoek van Fanger [1]. Gedurende de test-



Figuur 4. Thermische gewaarwording van studenten en ouderen tijdens de testperiode.

periode van drie uur vonden zes metingen plaats, waarvan slechts de laatste drie in aanmerking werden genomen ter bepaling van de gemiddelde thermische gewaarwording op de PMV-schaal. Duidelijk is te zien dat de eerste metingen hoger scoren en dat pas na twee uur stabiele waarnemingen werden geregistreerd. Op grond van de boven omschreven mobiliteit zou het gemiddelde metabolisme van de betreffende kantoorwerkers wel eens in de ordegrootte van 1,45 met kunnen liggen zijnde het gemiddelde van de actitiveit tijdens het zitten (1,2 met) en tijdens de mobiliteit (1,7 met).
Dat het gemiddelde metabolisme bij kantoorwerk hoger is dan algemeen wordt aangenomen, werd bevestigd door een peiling in een groep arbeidshygiënisten tijdens de voor hen gegeven TVVL-cursus in mei 1993.

Er zijn echter nog andere factoren, die in een modern kantoor tot een hoger metabolisme (kunnen) leiden. Het is van belang deze niet te onderschatten, omdat het metabolisme grote invloed heeft op de PMV. Onder gemiddelde kantooromstandigheden betekent een verhoging van 0,1 met, een verhoging van de PMV-index met 0,14 [6], uiteraard bij gelijkblijvende omgevingsparameters.
De genoemde factoren zijn de volgende:

Koffiegebruik
Bij een gemiddeld gebruik van 5 koppen koffie tijdens de werkdag stijgt het metabolisme met 10 W/m^2 oftewel 0,12 met [12]. Bij een gebruik van 8 koppen per dag is deze stijging al 0,17 met. Redelijk lijkt om uit te gaan van een gemiddelde verhoging van 0,15 met.

Maaltijden
Na gebruik van een maaltijd is, afhankelijk van de overvloedigheid en samenstelling dan wel soberheid hiervan, het metabolisme gedurende enkele uren 0,1 tot 0,25 met hoger [12]. Omdat de lunch in Nederland meestal vrij sober is, en de uitwerking op het metabolisme ongeveer even lang duurt als het normale interval tussen de maaltijden, wordt ervan uitgegaan dat de invloed van maaltijden begrepen is in het normale metabolisme. [1]

Kantoorwerkers versus Proefpersonen
De in het modelonderzoek gebruikte proefpersonen waren gezonde, uitgeruste en goed gevoede jonge mensen, ontspannen en niet gestressed. Een dergelijk panel blijkt niet erg representatief voor de gemiddelde kantoorwerker.

Stress
Het leven van de werkende mens is vaak een aaneenschakeling van stresssituaties. De eisen qua productiviteit en effectiviteit leiden in veel organisaties tot een steeds grotere werkdruk, die lang niet iedereen aankan.
Stress is in principe een uitstekend drukmiddel voor het leveren van grotere prestaties. Langdurige stress, zonder voldoende ontspanning, werkt echter ziekmakend. De eerste symptomen hiervan zijn a-specifiek, d.w.z. het zijn algemene symptomen die mogelijk ook andere oorzaken kunnen hebben. Voorbeelden hiervan zijn koorts, algemeen ziektegevoel, moeheid, gebrek aan eetlust, hoofdpijn, transpiratie e.d.
Bij het optreden van een stressprikkel gaat het hart sneller slaan, de bloeddruk stijgt, de huid wordt oververhit door de toegenomen bloeddoorstroming van de onderliggende spieren en men gaat transpireren [13]. Volgens het thermofysiologisch model van Gagge speelt de vochtigheid van het huidoppervlak een belangrijke rol bij de beoordeling van het binnenklimaat. Een natte huid in geval van stress zou dus grote invloed kunnen hebben op de thermische gewaarwording.

Aangezien er een lineair verband bestaat tussen hartslag, frequentie en zuurstofopname, en deze laatste weer bepalend is voor het metabolisme [12], mag worden aangenomen dat werken onder stress het metabolisme behoorlijk zal verhogen. Over de mate hiervan is de auteur echter niets bekend.

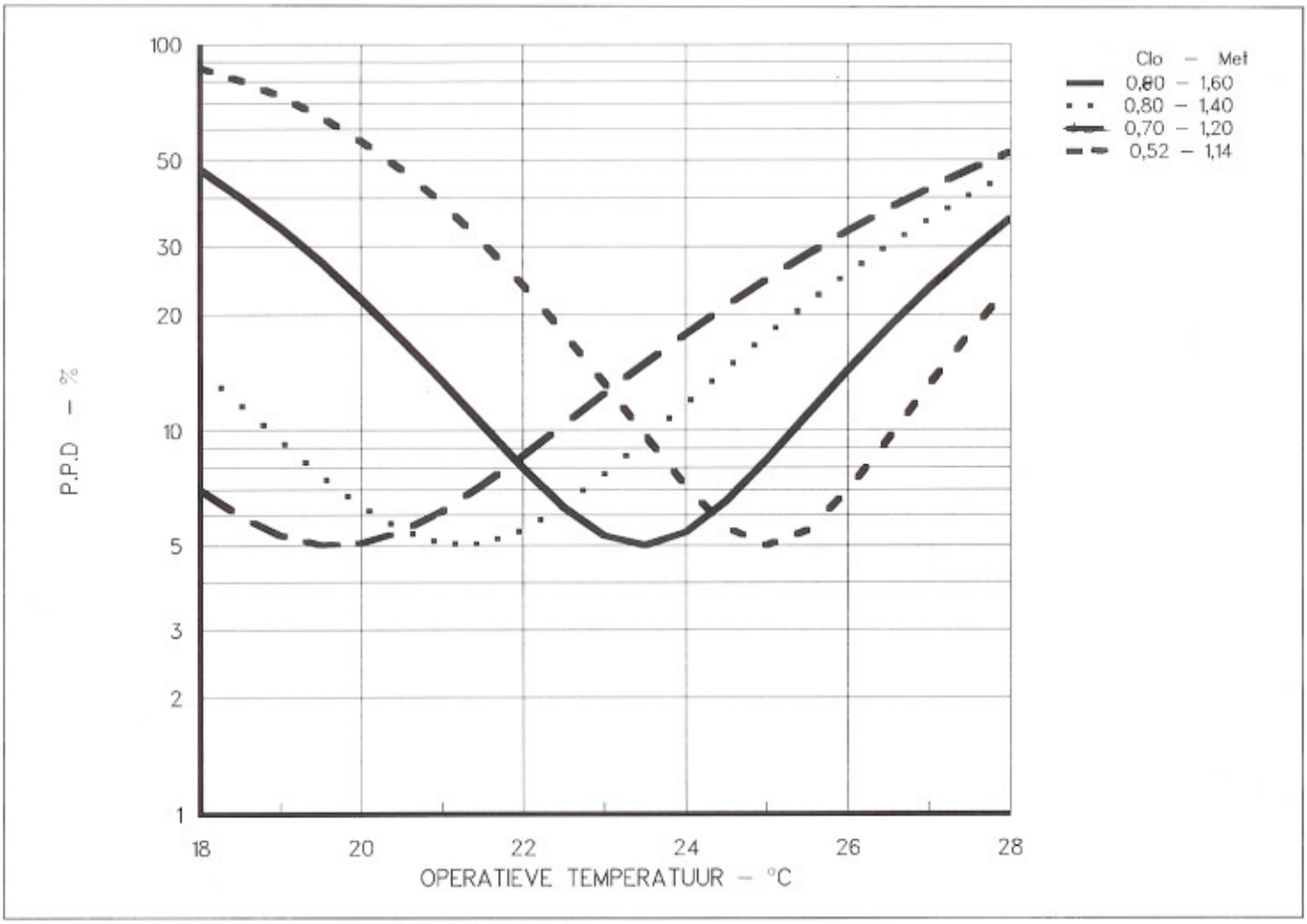
Kleding, Metabolisme en Binnenklimaat
Bij de gangbare PMV/PPD berekeningen wordt meestal uitgegaan van de in [12] aanbevolen waarden van 0,7 clo voor de kledingweerstand en 1,2 met voor het metabolisme. In figuur 5 is aangegeven hoe de optimale operatieve ruimtetemperatuur verschuift wanneer hiervoor hogere waarden in de modelberekening worden ingevoerd. Aangegeven zijn de combinaties
0,52 clo/1,14 met (Brager), 0,7 clo/1,2 met, 0,8 clo/1,4 met en 0,8 clo/1,6 met. De optimale operatieve temperatuur verschuift hierbij van 25°C naar 20°C.

Conclusie:
De kop boven dit artikel is een vraag, die weliswaar in de tekst niet wordt beantwoord, maar waarop het antwoord zich wel aftekent. De gebruikte thermofysiologische modellen blijken juist, hoewel het Gagge-model waarschijnlijk nauwkeuriger is dan het Fanger-model. Dit zou verklaard kunnen worden door de grotere invloed die Gagge geeft aan de vochtigheid van het huidoppervlak enerzijds, en door de stijgende invloed van de latere warmteafgifte bij hoger metabolismen anderzijds.

Het ziet er echter naar uit, dat de persoonsgebonden parameters, clo-waarde en metabolisme, hoger zijn dan vaak wordt aangenomen, waardoor een te optimistisch beeld ontstaat van de thermische behaaglijkheid in kantoorruimten.
Gesuggereerd wordt modelberekeningen uit te voeren op basis van 0,8 clo/1,4 met, en een gevoeligheidsanalyse te maken voor de combinaties 0,7 clo/1,2 met en 0,8 clo/1,6 met.
Voor de ISSO ligt hier een taak om nader onderzoek te doen naar clo-en met-waarden in praktijksituaties. De TVVL zou aan dergelijke deugdelijk onderbouwde clo- en met-waarden een normatief karakter kunnen geven.

Wetenschap en Techniek
De auteur van dit artikel is geen wetenschapper, maar een geëngageerde technicus, die zich al lange tijd bezighoudt met het opsporen van feiten en gebreken in de gangbare klimaattechniek met als doel het realiseren van een gezond binnenklimaat. Het zit hem flink dwars dat er in zoveel gebouwen zo vaak een miserabel binnenklimaat heerst. De wetenschap heeft ons fraaie en onmisbare modellen geleverd voor de beschrijving van het thermisch binnenklimaat in gebouwen. Laat de wetenschap ons nu ook helpen met de reële bepaling van de benodigde invoergegevens. Dan zijn de uitgangspunten van het ontwerp in elk geval verantwoord en kunnen we ons richten op de overige voetangels en klemmen die ons vakgebied kent.

Slotopmerking
Voor het boven gesignaleerde *miserabele binnenklimaat* zijn uiteraard meer oorzaken aan te geven dan alleen een te lage schatting van de persoonsgebonden parameters. In een volgend artikel zullen enkele andere aspecten worden belicht, waaronder de temperatuuroverschrijdingsberekening, de zgn. "gemiddelde zomer", het "anti-airconditioning virus", en de penny-wise, pound-foolish benadering. Tot dan!



Figuur 5. Invloed van clo/met combinaties op de PMV-indices

Referenties:

[1] P.O. Fanger (1972)
"Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering"
McGraw - Hill Book Company

[2] ISO 7730 (1984)
"Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort"
International Standards Organisation, Genève.

[3] Ashrae Standard 55-1992 (1992)
"Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy"
American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.

[4] DIN 1946 Teil 2 - Entwurf August 1991
"Raumlufttechnik - Gesundheitstechnische Anforderungen"
Deutsches Institut für Normung, Berlin

[5] NEN ISO 7730 (1989)
"Gematigde thermische binnencondities. Bepaling van de PMV en PPD-waarde en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid"
Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

[6] ISSO Publikatie 19 (1991)
"Thermisch binnenklimaat, aanbevelingen"
Instituut voor Studie en Stimulering van Onderzoek op het gebied van gebouwinstallaties, ISSO, Rotterdam.

[7] Gail E. Schiller, e.a. (1988)
"A field study of thermal environments and comfort in office buildings"
Ashrae Transactions no. 3164 - research project RP-462
(NB Gail Schiller is thans Mrs. Gail Brager - zie [10]

[8] C.C. Benton e.a. (1990)
"A field measurement system for the study of thermal comfort"
Ashrae Transactions Vol. 96 Pt1 (nr. 3372 RP-462)

[9] R.J. Dedear e.a. (1985)
"Validation of the Predicted Mean Vote model of thermal comfort in six Australian Field Studies"
Ashrae Transactions Vol. 91, Pt. 2 (nr. HI-85-09 no.2)

[10] Gail S. Brager (1992)
"Using laboratory based models to predict comfort in office buildings"
Ashrae Journal, April 1992

[11] A. Gagge e.a. (1986)
"A standard predictive index of human response to the thermal environment".
Ashrae Transactions Vol. 92 Pt. 2.

[12] ISSO researchrapport 5 (1990)
"Ontwerp Binnencondities en Behaaglijkheid in gebouwen"
Instituut voor Studie en Stimulering van Onderzoek op het gebied van gebouwinstallaties, ISSO, Rotterdam.

[13] G.P.M. Feller (1992)
"Bijbels omgaan met spanningen"
Uitgeverij "Heno", Overbeek B.V., Oudewater.