

Vocht – Waar maken we ons druk om?

Ben Bronsema, *Bronsema Consult – TU Delft, Faculteit der Bouwkunde.*

INLEIDING

“It’s not the heat, it’s the humidity”. Dat was zo’n honderd jaar geleden de overtuiging van de *godfathers* van de airconditioning, Willis Carrier en anderen (Cooper 1998).

In het thermo-fysiologisch model van NEN-ISO 7730, bijna universeel uitgangspunt voor berekeningen van thermisch comfort, lijkt deze stelling te zijn omgekeerd. Alles draait om temperatuur, operationele temperatuur; temperatuurgradiënten, oppervlaktetemperatuur, stralingstemperatuur en relatieve luchtsnelheid. Vochtigheid speelt in de comfortvergelijking een ondergeschikte rol en wordt in de aanbevolen eisen voor thermisch comfort slechts terloops en als informatief genoemd.

Is vochtbeheersing in ons vakgebied terecht zo ondergewaardeerd? Deze vraag zal in de toekomst waarschijnlijk klemmender worden als door het broeikas-effect de temperatuur op de aarde stijgt en de luchtvochtigheid door sterkere verdamping van zeeën en oceanen zal toenemen (Mahlman 2001).

De conclusie van dit artikel luidt dat vochtbeheersing veel belangrijker is dan het thermo-fysiologisch model van NEN-ISO 7730 suggereert. Behaaglijkheid is namelijk meer dan thermisch comfort alleen!

Het beperken van de luchtvochtigheid in de koelperiode levert een grotere behaaglijkheid op en een hogere waardering van de luchtkwaliteit dan wanneer wordt uitgegaan van algemeen geldende normen en richtlijnen. Hierdoor kan in principe de ventilatiecapaciteit worden verlaagd en energie worden bespaard.

Een lage luchtvochtigheid biedt eveneens een grotere behaaglijkheid voor personen met een hoog activiteitsniveau, die werken in voor hen te warme ruimten. Dit is bijvoorbeeld het geval in verpleeg- en ziekenhuizen, waar de ruimtetemperatuur moet worden afgestemd op patiënten.

Voor gezonde mensen is er nauwelijks een ondergrens van de relatieve vochtigheid. Gevoelige mensen zijn echter sterk gebaat bij een minimum relatieve vochtigheid van 35 – 40%.

1. VOCHTBEHEERSING EN KOELING (1)

“Moderne consumenten stellen airconditioning en koeling op één lijn. Voor de ingenieurs die in het prille begin de stoot gaven tot de ontwikkeling van de airconditioning ging het in de eerste plaats om vochtbeheersing. Vanaf het eerste decennium van de twintigste eeuw pleitten airconditioning ingenieurs voor vochtbeheersing als een belangrijk onderdeel van moderne mechanische ventilatie systemen, of die nu bestemd waren voor industriële processen of voor menselijk comfort.

Hun pleidooi had een praktische achtergrond. Veel fabricageprocessen zijn gevoelig voor veranderingen in vochtigheid, en vochtbeheersing leidt tot betere kwaliteit, minder storingen en de mogelijkheid voor een jaar-rond doorlopende productie.

Mensen zijn ook gevoelig voor vocht. Door de hogere luchtvochtigheid in de winter en de drogere condities in de zomer, mogelijk gemaakt door airconditioning, voelen mensen zich behaaglijker”.

Aldus Gail Cooper in haar historiografie over het ontstaan en de ontwikkeling van de airconditioning in Amerika (Cooper 1998). *“It’s not the heat, it’s the humidity”* is de titel van het eerste hoofdstuk van dit boeiende boek, een aanrader voor ieder met iets meer dan gemiddelde belangstelling voor ons vakgebied.

2. VOCHTBEHEERSING EN KOELING (2)

Cooper besteedt in haar boek veel aandacht aan de pioniers op het gebied van klimaatregeling, waarvan Willis Carrier ongetwijfeld één van de grootste was. Carrier was niet alleen ondernemer, maar vooral ook ingenieur, en heeft als zodanig een grote bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van de techniek van airconditioning in de VS.

Door zijn ervaring in de textiel- en voedingsmiddelenindustrie was hij zeer goed bekend met bevochtigingstechnieken. De luchtwater met dauwpuntsregeling, later uitgegroeid tot koelwater, werd een centraal element in zijn klimaatsystemen voor comforttoepassingen.

In tegenstelling tot veel collega’s uit zijn tijd vond Carrier de luchtvochtigheid belangrijker dan de luchttemperatuur. Droge luchtkoelers (koelbatterijen) wees hij eigenlijk af, omdat daarmee de vochtigheid niet goed te regelen was. Pas veel later, toen ook kleine gebouwen en woningen werden voorzien van airconditioning, moest ook Carrier overstap, want koelwassers waren voor deze toepassingen te onpraktisch.

Bovendien kreeg Carrier bij comfortkoeling met het publiek te maken, en voor hen was airconditioning vooral koeling. Bioscopen en theaters maakten reclame met een binnentemperatuur van maximaal 70⁰ F (21⁰ C!), en pleidooien van Carrier c.s. dat een ruimteconditie van 80⁰ F (26,7⁰ C) bij 55% RV voor het publiek behaaglijker zou zijn werden niet gehonoreerd. De ervaring van veel Amerikagangers leert dat in deze situatie tot op heden nog weinig verandering is gekomen.

3. THERMISCH COMFORT EN GEZONDHEID (Sterling 1985)

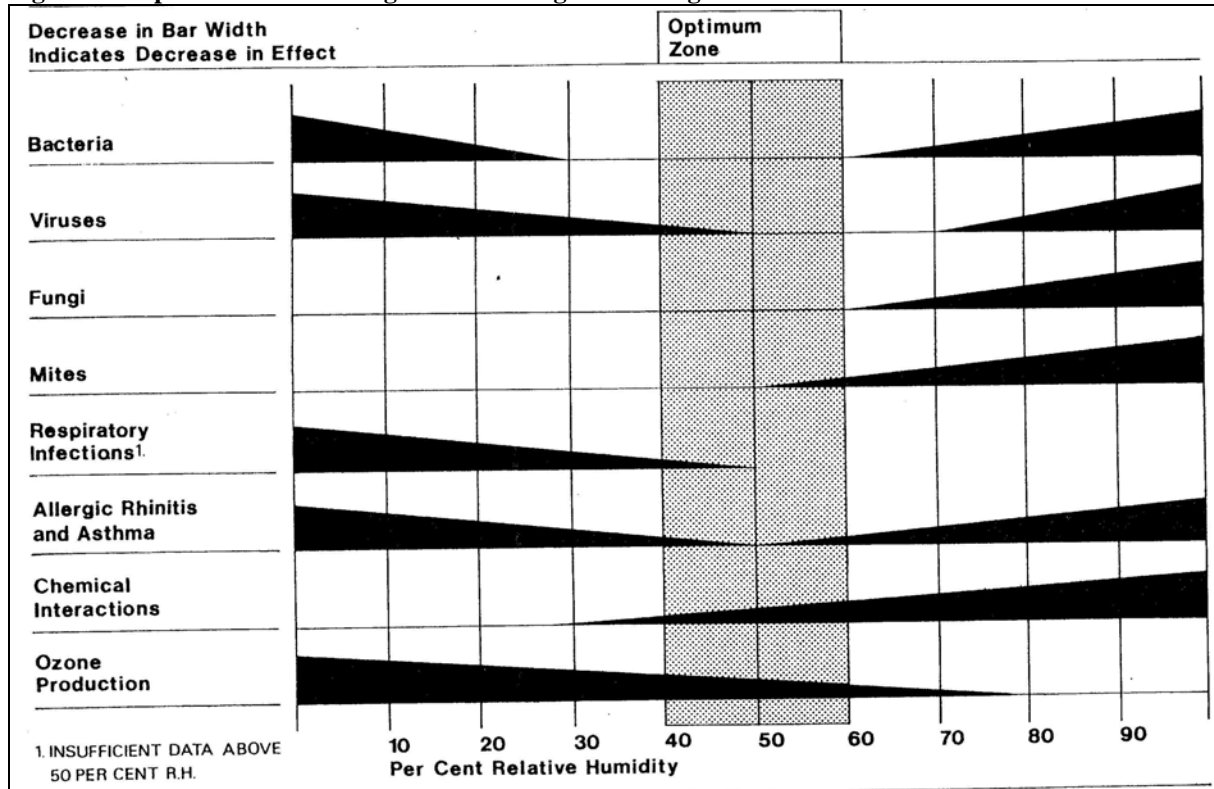
Een bepaalde vochtigheidsgraad van de lucht is nodig ter bevordering van het thermisch comfort en de gezondheid, maar een te lage of een te hoge vochtigheid kan een negatieve invloed hebben.

Een te lage relatieve vochtigheid veroorzaakt uitdroging van de huid en slijmvliezen, waardoor bij gevoelige mensen de kans op huid-, oog-, en luchtwegirritaties wordt vergroot. Een te hoge relatieve vochtigheid belemmert het latente warmteverlies van de mens via de huid, waardoor eerst het thermische comfort wordt bedreigd en in ernstige gevallen oververhitting en uitputting kan optreden.

Naast deze directe invloed op het thermisch comfort heeft luchtvochtigheid ook complexe maar niet minder belangrijke effecten op de gezondheid van mensen. Vocht is gunstig voor de overlevingskansen en de ontwikkeling van biologische verontreinigingen zoals bacteria, virussen, schimmels en mijten. Ziektekiemen kunnen allergische reacties teweegbrengen zoals ademhalingsproblemen, neusverkoudheid, luchtweginfecties en astma. Ozon en sommige chemische stoffen in het interieur reageren met waterdamp in de lucht en kunnen huid-, oog-, en luchtwegirritaties veroorzaken of versterken.

Al deze factoren zijn gecombineerd in figuur 1, waaruit blijkt dat op basis van gezondheidsoverwegingen (Sterling 1985) de optimale relatieve vochtigheid tussen 40% en 60% RV ligt. Sommigen vinden deze grafiek te simplistisch omdat weegfactoren voor de verschillende gezondheidsaspecten ontbreken en de bouwfysische uitvoering van gebouwen in relatie tot het buitenklimaat niet tot uitdrukking worden gebracht (Baughman, Arens 1996). De verrassende eenvoud en de heldere weergave van de samenhang tussen de verschillende factoren heeft deze grafiek echter een grote bekendheid gegeven.

Figuur 1 – Optimale RV voor de gezondheid volgens Sterling



Het is opvallend dat de ondergrens van 40% RV in geen van de bekende klimaatnormen wordt vermeld.

- NEN-ISO 7730 stelt in Annex D (informative): *“It is recommended that the relative humidity be kept between 30% and 70%. The limits are set to decrease the risk of unpleasantly wet or dry skin, eye irritation, static electricity, microbial growth and respiratory diseases”*.
- ASHRAE Standard 55-1992 geeft een bovengrens aan van 60% RV en een ondergrens van ca 4,5 g/kg overeenkomend met 30% RV bij 21^o C
- DIN 1946 Teil 2 stelt een bovengrens van 11,5 g/kg en 60% RV bij een ondergrens van 30%RV, die echter incidenteel mag worden onderschreden.
- NPR-CR-1752 (CEN 1999) houdt zich aan de aanbeveling van NEN-ISO 7730, een RV tussen 30% en 70%.
- ISSO 19 (ISSO 1991) geeft in het geheel geen eisen of richtlijnen inzake de relatieve vochtigheid, hoewel in Research Rapport 5 (ISSO 1990) de aanbeveling van NEN-ISO 7730, een RV tussen 30% en 70%, is overgenomen. Blijkbaar is de overheersende idee in Nederland dat de relatieve vochtigheid in het binnenmilieu niet van belang is.

4. VOCHTBEHEERSING EN GEZONDHEID

Een te lage vochtigheidsgraad van de lucht kan, zoals eerder opgemerkt, voor sommige mensen gezondheidsproblemen tot gevolg hebben. Luchtbevochtiging brengt echter ook risico's met zich mee omdat door een onjuist ontwerp en een onhygiënische bedrijfsvoering in sommige bevochtigingssystemen ziektekiemen tot ontwikkeling kunnen komen die via de luchtbehandeling in een gebouw kunnen worden verspreid. Luchtbevochtiging is daarom in ons land niet erg populair en wordt vaak achterwege gelaten omdat men bevreesd is voor de negatieve gezondheidseffecten (Meer v.d 1985). Als luchtbevochtiging om één of andere reden nodig is wordt meestal gekozen voor stoom, omdat de risico's hierbij kleiner worden geacht.

De publicatie getiteld "*Luchtbevochtiging – Van de regen in de drup?*" (Bronsema 1997) geeft een uitvoerig overzicht van de met luchtbevochtiging samenhangende problemen. De samenvatting van dit artikel luidt als volgt:

"De gewenste vochtigheidsgraad in kantoorruimten en het al dan niet toepassen van luchtbevochtiging in de winter zijn al jaren lang controversiële onderwerpen. Dit artikel belicht het genoemde vraagstuk vanuit verschillende invalshoeken: Gezondheid – Stof in het interieur – Sick Building Syndrome – Thermisch comfort – Luchtkwaliteit – Statische electriciteit en het Gebouw. Geconcludeerd wordt dat gezonde mensen in een schoon en gezond binnenmilieu betrekkelijk ongevoelig zijn voor een lage luchtvochtigheid, en daarom geen luchtbevochtiging nodig hebben. Gezondheid en een gezond binnenmilieu zijn echter niet per definitie constante factoren, waardoor de mogelijkheid voor het aanbrengen van luchtbevochtiging wel open moet blijven. Gebouwen dienen daarom zodanig te worden ontworpen dat ze 's winters 30% à 40% R.V. kunnen "verdragen" zonder vochtschade. Kantoorgebouwen met mechanische ventilatie kunnen beter van meet af aan worden voorzien van luchtbevochtiging. Een uiterst hygiënische uitvoering hiervan is essentieel".

Het artikel geeft verder een "beslissingsschema" dat kan worden gebruikt voor de beantwoording van de vraag of wel of geen luchtbevochtiging moet/kan worden toegepast.

Eén ding moet duidelijk zijn: Luchtbevochtiging heeft niet veel met thermisch comfort te maken maar des te meer met gezondheid!

5. VOCHTBEHEERSING EN THERMISCH COMFORT

5.1 Thermisch comfort algemeen (ASHRAE 1997)

De metabolische activiteit van het menselijk lichaam wordt bijna volledig in warmte omgezet, die continu moet worden afgevoerd om een abnormale lichaamstemperatuur te voorkomen. Het proces wordt geregeld door de hypothalamus, een geniale "PI-regelaar" die ervoor zorgt dat bij stijgende lichaamstemperatuur de bloedtoevoer naar de huid toeneemt, waardoor de voelbare warmteafgifte via de huid naar de omgeving toeneemt. Bij een hoog metabolisme of een hoge omgevingstemperatuur pompen zweetklieren lichaamsvocht naar de huid waar dit door verdamping een buitengewoon effectieve koeling geeft. Bij een lage luchtvochtigheid blijft de huid relatief droog, en ervaart men dit niet als zweten. Bij een hoge luchtvochtigheid wordt de huid nat en verdampt het zweetvocht aan de lucht.

5.2 Voelbaar warmteverlies via de huid

Het voelbare warmteverlies $-Q_v$ via de huid vindt plaats door convectie en straling, en is recht evenredig met het verschil tussen de oppervlaktetemperatuur van de kleding en de operationele ruimtetemperatuur t_{op} .

De oppervlaktetemperatuur van de kleding is afhankelijk van de huidtemperatuur $-t_{huid}$ en de isolerende werking van de kleding, uitgedrukt in Clo^1 . De huidtemperatuur is enigszins afhankelijk van het metabolisme, ca 34^0 C bij $1,0 \text{ met}^2$ dalend naar ca $32,5^0$ C bij $2,0 \text{ met}^2$.

Uit de formule: $Q_v = f(t_{huid} - t_{op})$ blijkt dat het voelbare warmteverlies via de huid maar zeer beperkt regelbaar is en bij een stijgende operationele ruimtetemperatuur sterk afneemt. Als deze gelijk wordt aan de huidtemperatuur wordt het voelbare warmteverlies nul. Dit moet worden gecompenseerd door het latente warmteverlies van verdamping via de huid. Het warmteverlies door ademhaling, voelbaar en latent, speelt slechts een ondergeschikte rol.

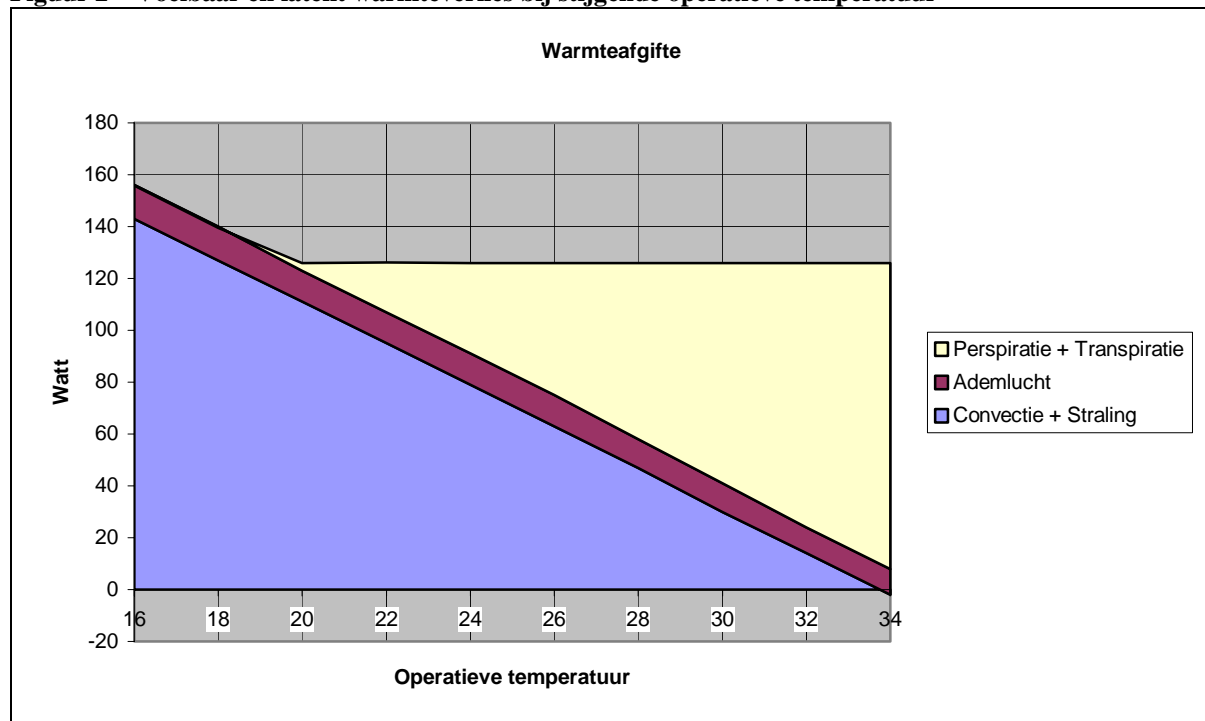
5.3 Latent warmteverlies via de huid

Figuur 2 toont het warmteverlies van een persoon met een metabolische activiteit van 125 W bij een operationele temperatuur van 16^0 tot 34^0 C. Van 20^0 tot 34^0 C wordt de daling van het voelbare warmteverlies geheel gecompenseerd door perspiratie en transpiratie. Of en in hoeverre dit gepaard gaat met zweten hangt af van de luchtvochtigheid.

Interessant is te zien dat bij een operationele temperatuur beneden 20^0 C het latente warmteverlies nul is. Het lichaam moet zelfs meer warmte gaan leveren om het stijgende voelbare warmteverlies te compenseren. Dit gebeurt door samentrekken van spieren en door rillen, waardoor de warmteproductie wordt opgevoerd.

In tegenstelling tot het voelbare warmteverlies heeft de latente warmteregulering via de huid over een groot temperatuurbereik een aanzienlijke capaciteit.

Figuur 2 – Voelbaar en latent warmteverlies bij stijgende operationele temperatuur



¹ $1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

² Eenheid van metabolisme. $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$

6 THERMISCH COMFORT DOOR REGULERING LATENT WARMTEVERLIES

6.1 “It’s not the heat, it’s the humidity”

Ieder weet uit ervaring dat een hoge temperatuur in combinatie met een lage luchtvochtigheid een uitstekend thermisch comfort kan opleveren, en waarschijnlijk is de bovenstaande uitspraak op deze ervaring gebaseerd.

Het latente warmteverlies van het lichaam is, zoals hiervoor uiteengezet, uitstekend en over een groot temperatuurbereik regelbaar. Desondanks wordt van dit gegeven bij de vaststelling van binnenklimaatcondities nauwelijks rekening gehouden. Als daarentegen uitgegaan wordt van een lage luchtvochtigheid, zouden mensen met zeer verschillende activiteitsniveaus en kleding zich in één en dezelfde ruimte toch behaaglijk kunnen voelen. Ook de thermische schok die wordt ondervonden als men vanuit een warme omgeving een geconditioneerde ruimte betreedt, zou tot het verleden behoren.

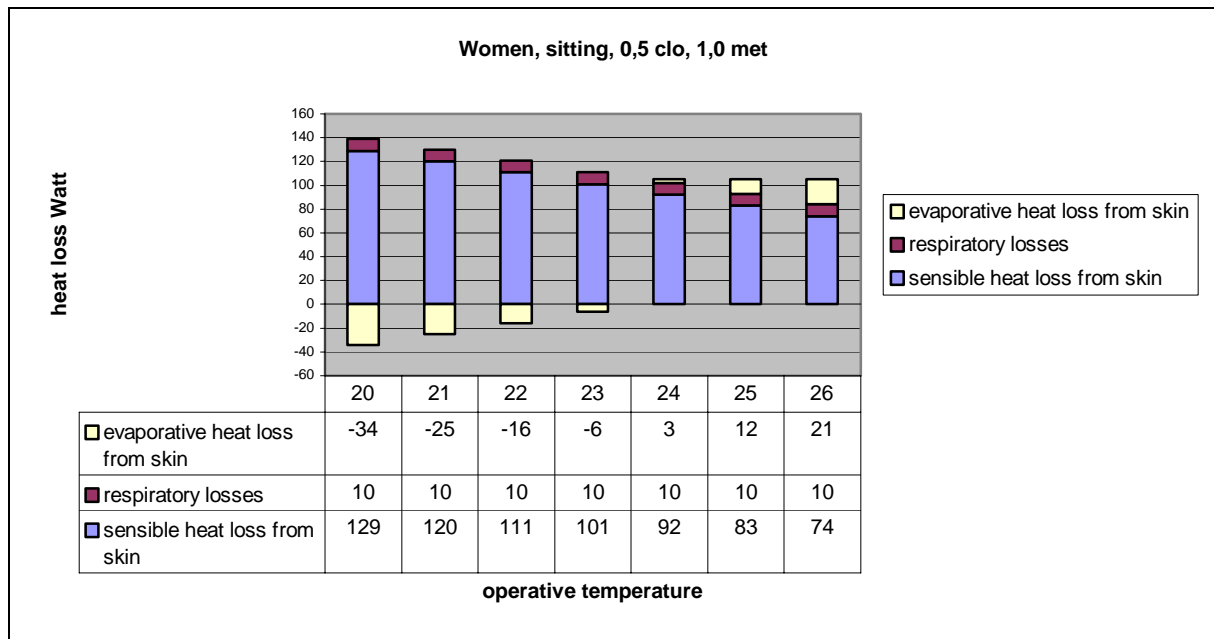
Eén en ander wordt hierna onderzocht aan de hand van een concreet voorbeeld: het diner dansant bij de TVVL jaarvergadering. Hier zijn dames aanwezig in prachtige maar vaak zeer luchtige kleding (0,5 clo) en heren in de traditionele smoking (1,0 clo). Sommigen zitten (1,0 met), anderen staan (1,2 met) en er wordt enthousiast gedanst (2,4-4,4 met). Kunnen we het nu allen naar de zin maken?

6.2 De dames

Als hommage aan de dames, maar ook omdat we hen in de eerste plaats een zo behaaglijk mogelijk binnenklimaat gunnen, is de eerste rekenexercitie aan hen gewijd. Als model is gekozen voor dame van 1,7 m¹ lengte met een gewicht van 70 kg³. Zij is gekleed in een luchtige avondrobe, $I_{cl}=0,5$ clo, $R_{cl}=0,0775$ m².K/W, en zit rustig te praten met haar tafelenoot. Haar metabolische activiteit wordt geschat op 1,0 met overeenkomend met 105 Watt. Voor operationele temperaturen van 20⁰ – 26⁰ C is berekend hoe haar warmteverlies tot stand komt, opgebouwd uit een voelbaar deel,(convectie + straling), een deel via de ademlucht (voelbaar + latent), en een latent deel. Figuur 2 toont het resultaat van deze berekening.

Figuur 2 – Warmteafgifte van ons model

³ Met behulp van deze gegevens is haar lichaamsoppervlak volgen DuBois berekend volgens de formule $A_d=m^{0,425} \cdot l^{0,725}$, waarin m=gewicht in kg en l=lengte in m¹



Uitgaande van enige onvermijdelijke perspiratie via de huid kan worden geconcludeerd dat een operatieve temperatuur van 25⁰ C voor ons model de ideale temperatuur is. Maar wat vinden dansminnende heren hiervan?

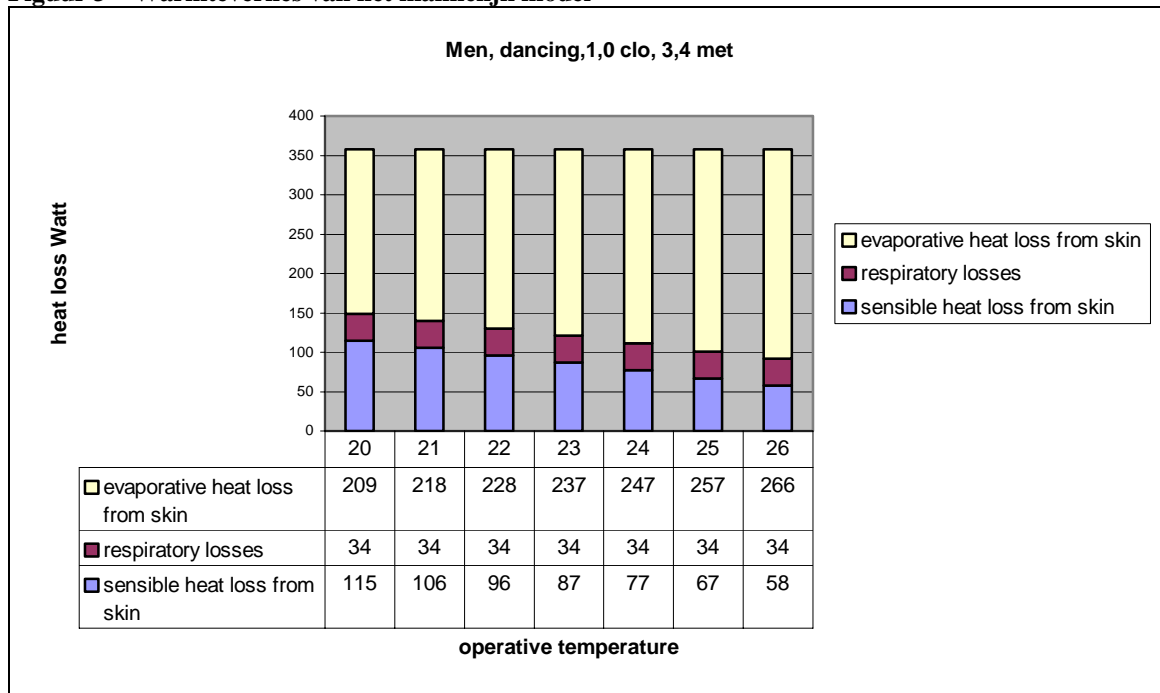
6.3 De heren

Om een eerlijke vergelijking mogelijk te maken is ons mannelijk model even lang en even zwaar als de dame in kwestie. Hij is op de dansvloer bezig met een stevige cha cha cha, geschat op 3,4 met overeenkomend met 358 Watt, en is gekleed in smoking, $I_{cl}=1,0$ clo, die echter door het dansen minder knelt en daardoor effectief kan worden gesteld op 0,8 clo, $R_{cl}=0,124$ m².K/W

Ook voor hem is op soortgelijke manier als voor de dame berekend hoe zijn warmteverlies is opgebouwd. Figuur 3 toont het resultaat van deze berekening.

Door de zwaardere kleding is zijn voelbare warmteverlies kleiner dan van de dame en door zijn hoge metabolische activiteit is een aanzienlijk latent warmteverlies nodig. Een operatieve temperatuur van 20⁰ C is voor de betrokkene nog te hoog.

Figuur 3 – Warmteverlies van het mannelijk model



6.4 Thermisch Comfort?

Met het oog op de dames wordt nu de operatieve temperatuur in de feestzaal ingesteld op 25^o C, en gaan we de relatieve vochtigheid verlagen om het voor de heren ook aangenaam te maken.

Met behulp van de comfort vergelijking uit ISO 7730 zijn berekeningen gemaakt van de *Predicted Mean Vote* PMV voor beide modellen bij een operatieve temperatuur van 25^o C, waarbij de RV varieert van 90% naar 10%. De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.

Voor de dames is 25^o C nog aan de koude kant en dit wordt nog ongunstiger bij dalende RV. Voor de heren helpt een lage relatieve vochtigheid wel iets, de PMV daalt van 2,8 naar 3,2 bij een RV van 90% naar 10%, maar desondanks hebben ze het over de hele linie nog veel te warm.

Nu zullen er weinig heren zijn die continu aan het dansen zijn, en evenzo weinig dames die de hele avond blijven zitten. Het voorbeeld is daarom niet erg representatief. Laten we daarom eens uitgaan van dames en heren die de avond vullen met 40% dansen, 40%, zitten en 20% staan. De gemiddelde metabolische activiteit is dan 2,0 met, en de operatieve temperatuur wordt hierom verlaagd naar 22^oC.

Het resultaat van deze rekenexercitie is weergegeven in figuur 5. Voor de dames is het thermisch klimaat optimaal, en voor heren is het met een PMV tussen 0,5 en 1,0 ook niet slecht. Verlaging van de relatieve vochtigheid van 65% naar 35% geeft zowel voor dames als voor heren een geringe, zij het niet noodzakelijke verbetering.

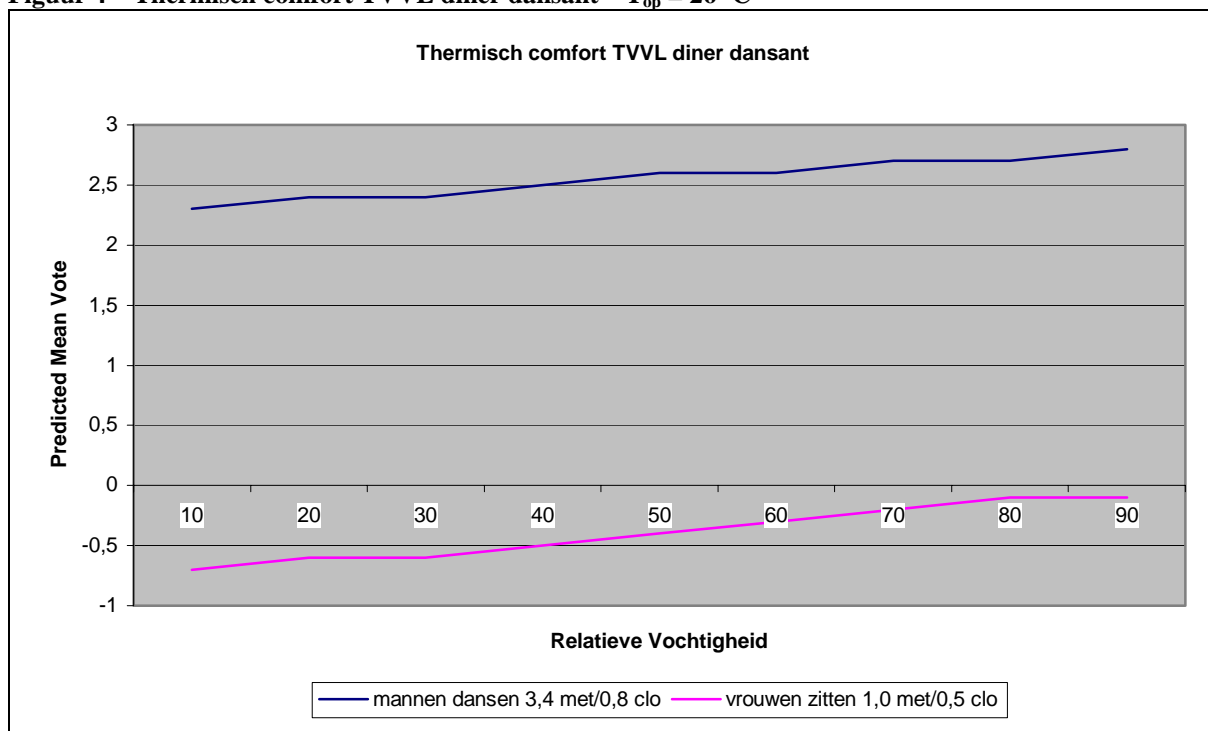
Voor het TVVL diner dansant is de conclusie duidelijk. Er moet worden gedanst!! De dames iets meer dan de heren om daarmee hun luchtiger kleding thermisch te compenseren.

Er zijn in de realiteit van het leven echter veel overeenkomstige situaties waarin een dergelijke oplossing niet mogelijk is. Wat te denken van verpleeg- en ziekenhuizen, waar patiënten geen mogelijkheid hebben om te dansen, en verpleegkundigen een hoog activiteitsniveau aan de dag moeten leggen. De ruimtetemperatuur moet hier worden afgestemd op de patiënten, waardoor het voor het personeel (veel) te warm is.

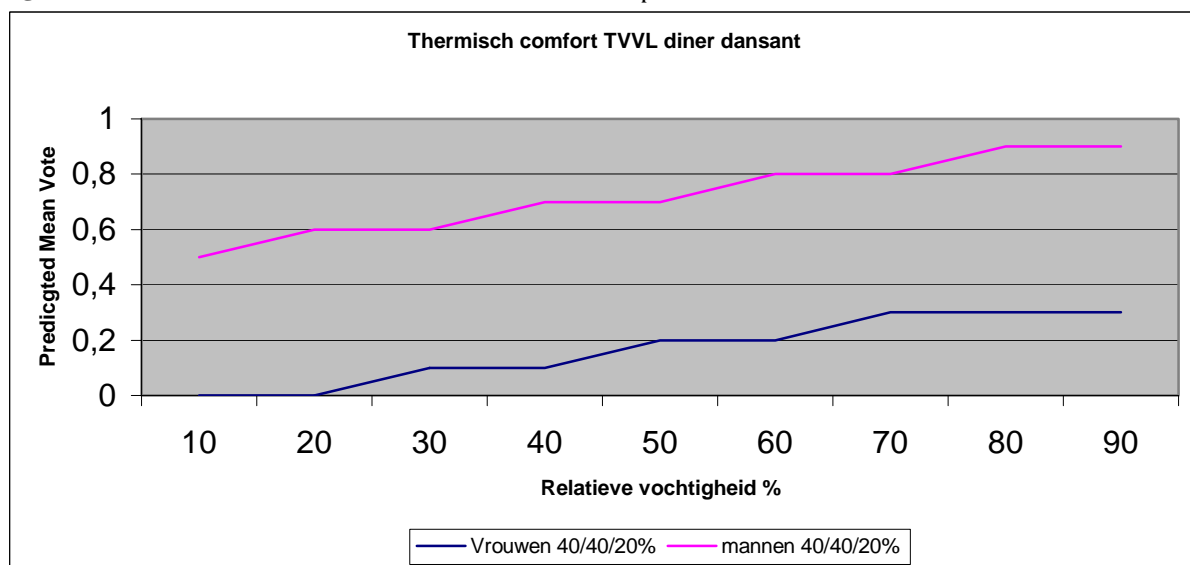
De conclusie kan niet anders zijn dan dat thermisch comfort voor allen onder deze omstandigheden nimmer kan worden bereikt, ook niet met verlaging van de relatieve vochtigheid. Maar is hiermee alles gezegd?

Het vervolg van dit artikel maakt duidelijk dat behaaglijkheid méér is dan thermisch comfort alleen, en dat verlaging van de relatieve vochtigheid wel degelijk kan helpen om in ruimten, waarin personen met zeer verschillende activiteitsniveaus en kleding aanwezig zijn, toch een voor allen acceptabele behaaglijkheid te realiseren.

Figuur 4 – Thermisch comfort TVVL diner dansant – $T_{op} = 26^{\circ}C$



Figuur 5 – Thermisch comfort TVVL diner dansant – $T_{op} = 22^{\circ}C$



7 BEHAAGLIJKHEID IS MEER DAN THERMISCH COMFORT

7.1 Niet-thermische comfortfactoren

Dat behaaglijkheid meer omvat dan het in thermisch evenwicht zijn met de omgeving wordt door iedereen intuïtief wel aan gevoeld. Welke factoren hierbij echter een rol spelen, en in hoeverre deze door het binnenklimaat kunnen worden beïnvloed, is binnen ons vakgebied nauwelijks bekend. Op bepaalde aspecten heeft wetenschappelijk onderzoek momenteel al verrassende resultaten opgeleverd, maar op andere punten zijn onderzoekers nog niet veel verder dan het testen van hun theorieën. Een bekende onderzoeker schrijft: *“The physiological and energy balance considerations... would indicate there is neither an upper or lower humidity limit in terms of thermal sensation. But laboratory, field and personal experiences suggest that there are humidity limits for comfort and acceptability”* (Berglund 1008). En een onderzoeker uit het team van Fanger schrijft: *“At present, the avenues by which humidity affects comfort are not completely known. A high level of air humidity may cause discomfort in spite of thermal neutrality. No human receptors for recording air humidity are known; therefore, humidity-related discomfort may be ascribed to other indirect factors”* (Toftum 1999).

Als andere indirecte factoren worden genoemd:

- Een onbehaaglijk hoge vochtigheid van de huid- zie 7.2
- Een onaangename natheid van de huid – zie 7.3
- De interactie van een vochtige huid en de kleding – zie 7.4
- Onvoldoende koeling van de slijmvliezen in de bovenste luchtwegen – zie 7.5
- Gecombineerde effecten – zie 7.6
- Het zuurstofgehalte van de lucht – zie 7.7

7.2 Vochtigheid van de huid (Berglund 1998, Toftum 1999)

De vochtigheid van de huid is, naast de huidtemperatuur, de activiteit van de zweetklieren, en de soort van kleding, mede afhankelijk van de luchtvochtigheid. De buitenste huidcellen kunnen gemakkelijk vocht opnemen of afstaan. Bij vochtopname zwellen ze en worden zacht. Bij uitdroging krimpen ze en worden hard.

Het zwellen of krimpen van de huid wordt gedetecteerd door nog onbekende sensoren of organen in de huid of de haarzakjes. Mensen kunnen hierdoor vrij nauwkeurig vaststellen in welke mate ze de lucht als vochtig of droog ervaren. Bij zeer droge lucht kan de huid zodanig krimpen dat beschadigingen ontstaan. Omgekeerd kan bij een hoge huidvochtigheid ($\geq 0,9$) de zwelling de doorlaat van de zweetklieren afsluiten of verkleinen, waardoor het zweten wordt beperkt, de zgn hydromyose.

Uit proeven blijkt dat mensen met redelijke betrouwbaarheid de vochtigheidsgraad van de lucht aan kunnen geven, uitgedrukt in algemene termen van droog, nogal droog, neutraal, nogal vochtig tot vochtig. Deze beoordeling blijkt onafhankelijk van de luchttemperatuur te zijn, en in relatie te staan met het absolute vochtgehalte van de lucht.

Onderzoek wijst uit dat de vochtigheid van de huid bij klimaatcondities binnen het comfortgebied slechts een bescheiden invloed heeft op de subjectief ervaren behaaglijkheid. Bij hogere temperaturen wordt de invloed groter (Toftum 1999).

7.3 Natheid van de huid (Berglund 1998)

De natheid van de huid wordt gedefinieerd als het oppervlak van de waterfilm, uitgedrukt als fractie van het totale huidoppervlak, dat nodig is om het benodigde latente warmteverlies

via de huid te realiseren. Mensen voelen zich zelden behaaglijk bij een natheid van 25% of meer. Bij intens zweten worden, bij een natheid van ongeveer 80%, zweetdruppels gevormd, die van bepaalde lichaamsdelen druppelen.

Onderzoek wijst uit dat de subjectieve vaststelling van de natheid van de huid, uitgedrukt in algemene termen als droog, vochtig en nat, uitstekend correleert met de gemeten natheid.

Tijdens zweten verdampt het zweetvocht en blijft zout op de huid achter. Dit zout verlaagt de dampdruk van de zweetfilm waardoor de verdamping per oppervlakte eenheid afneemt en de natheid toeneemt. Bij langdurig zweten wordt de natheid van de huid dus steeds groter. Eén van de redenen dat een frisse douche of bad na een inspannende dag zo'n verademing kan zijn is dat huidvocht door de schone huid veel gemakkelijker kan verdampen bij een verminderde natheid van de huid.

7.5 Interactie van vochtige huid en kleding (Berglund 1998, Toftum 1999).

De aanvaardbaarheid van een vochtig binnenmilieu wordt sterk door de kleding beïnvloed. De wrijving tussen de huid en de kleding stijgt abrupt boven een huidnatheid van 25%. Voor zijde is dit effect kleiner dan voor de meeste andere stoffen zoals wol, linnen en katoen. De grotere wrijving heeft tot gevolg dat tijdens een verplaatsing van het lichaam de huid sterker wordt verschoven hetgeen als onbehaaglijk wordt ervaren. Ook worden weefsels ruwer en minder prettig gevonden bij stijgende vochtigheid van de huid.

De fysische eigenschappen van stoffen en kleding wordt onder meer onderzocht in het Textile Protection and Comfort Centre T-PAC in Finland (www.tx.nscu.edu). Hierbij wordt gebruik gemaakt van een leeman, Coppelius geheten; zie Figuur 6. Deze is uitgerust met een groot aantal computergestuurde zweetklieren en verwarmingselementen waarmee het warmteverlies, voelbaar en latent, van het menselijk lichaam kan worden nagebootst en het warmte- en vochttransport door kleding kan worden bepaald.

Voor de bepaling van het draagcomfort en de tactiele en hedonische eigenschappen van stoffen en kleding wordt Coppelius "getraind" door menselijke panels.

7.6 Koeling van de slijmvliezen in de bovenste luchtwegen

De waarneming van luchtkwaliteit is afhankelijk van de temperatuur en de vochtigheid van de ingeademde lucht. Bij het inademen worden de slijmvliezen in de bovenste luchtwegen gekoeld, hetgeen mede bepalend is voor de waardering van het thermisch binnenmilieu en van de luchtkwaliteit. Bij hoge temperatuur en vochtigheid van de ingeademde lucht worden de slijmvliezen onvoldoende gekoeld, en de lucht wordt als bedompt en onbehaaglijk ervaren (Toftum 1999). Figuur 5 laat de spectaculaire invloed zien van luchttemperatuur en – vochtigheid op het PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*⁴), zoals door Toftum, een onderzoeker uit het team van Fanger, in proefkameronderzoek werd bepaald.

Bij dit onderzoek was alleen het gezicht van de proefpersonen in contact met de ingeademde, niet verontreinigde lucht. Een ander onderzoek waarbij de proefpersonen zich met hun hele lichaam in de onderzochte, eveneens schone lucht bevonden, gaf soortgelijke, hoewel minder geprononceerde effecten te zien (Fang 1998). Omdat in de praktijk de lucht altijd min of meer verontreinigd is, hetgeen een PPD verhogend effect heeft, is het volgens de onderzoekers aan de veilige kant van de relaties volgens figuur 5 uit te gaan.

Fang c.s. deden onderzoek naar het verband tussen de enthalpie en de hoeveelheid ventilatielucht enerzijds en de waargenomen luchtkwaliteit anderzijds (Bronsema 1999).

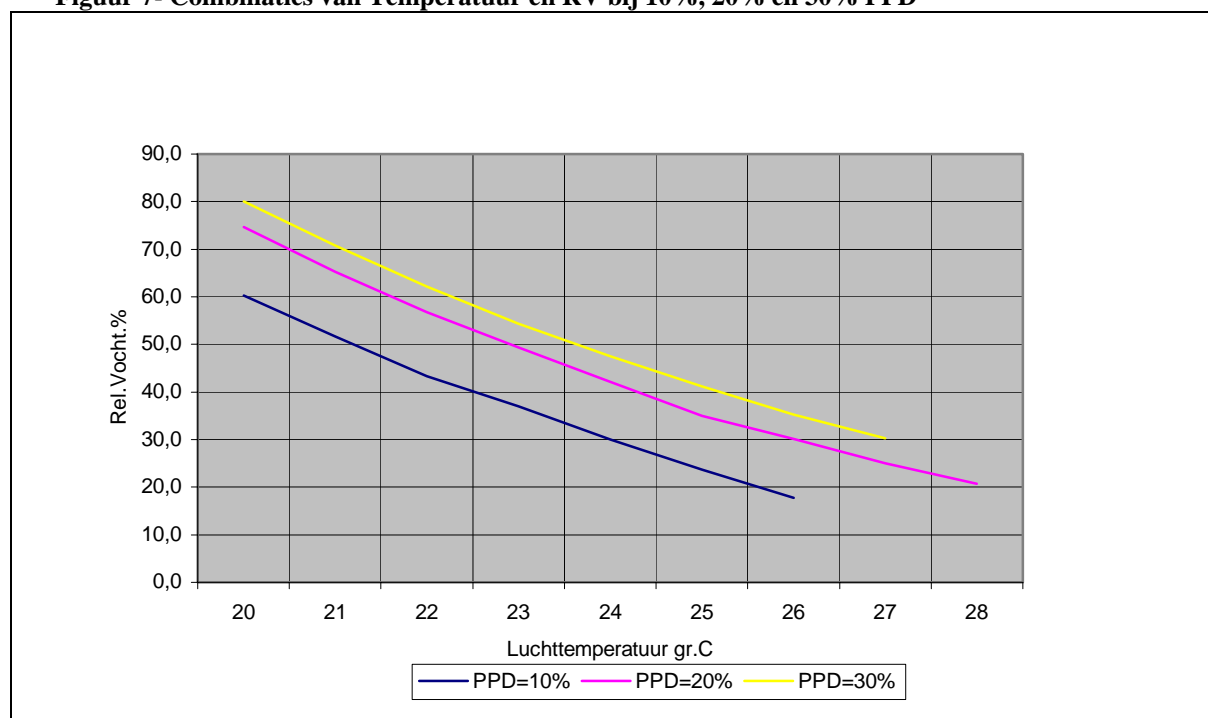
Conclusies:

⁴ Door de auteur ook wel aangeduid met Percentage Potentiële Drammers

- De enthalpie van de ruimtelucht heeft een significante invloed op de waargenomen luchtkwaliteit, zowel voor als na adaptatie van de proefpersonen.
- Verlaging van het ventilatiedebiet van 10 naar 3,5 l/s per persoon kon worden gecompenseerd door een verlaging van de enthalpie van 45 kJ/Kg (23 C/50%RV) naar 35 kJ/Kg (20 C/40%RV).

Deze nieuwe inzichten werden door Fanger op een meesterlijke manier verwerkt in zijn openingsrede van Indoor Air 99: “*Serveer de lucht koel en droog, voer de lucht toe vlak bij de mensen en verminder daardoor het ventilatiedebiet, verhoog de productiviteit en bespaar energie*”. Dat is kort gezegd Fangers adagium voor de *IAQ⁵ in the 21st Century*.

Figuur 7- Combinaties van Temperatuur en RV bij 10%, 20% en 30% PPD



7.7 Zuurstofgehalte van de lucht

Dit aspect is slechts, zonder wetenschappelijke onderbouwing, in één publicatie aangetroffen. Vochtige lucht heeft een lagere dichtheid dan droge lucht, en bij een hogere relatieve vochtigheid wordt dus per *arbeidsslag* van de longen minder zuurstof toegevoerd. Een eenvoudige berekening wijst echter uit dat bij RV verschillen tussen 0% (droge lucht) en 100% (verzadigde lucht) het verschil minder is dan één procent. Een temperatuurstijging van de lucht van 20⁰ C naar 25⁰ C heeft al een groter effect op de dichtheid, en daarmee op de specifieke zuurstoftoevoer, namelijk ca 2%.

Naar het oordeel van de auteur speelt dit fenomeen dus geen rol van betekenis bij de behaaglijkheidservaring in het geval van een hoge luchtvochtigheid in de ruimte.

7.8 Gecombineerde effecten

Klimaatcondities, luchtkwaliteit en omgevingsfactoren zoals geluid en licht kunnen elkaar beïnvloeden. Hinderlijk geluid en ongunstige visuele condities kunnen bijvoorbeeld de

⁵ *Indoor Air Quality*

acceptatie van klimaatcondities verminderen en omgekeerd. Persoonlijke factoren als gezondheid, gemoedsgesteldheid en stress versterken deze interacties.

Fanger toonde in zijn presentatie op de TVVL-KT dag 2002 beelden van jonge dames in een omgeving van 90⁰C / 10% RV (sauna) en zwemmend tussen ijsschotsen in het koude water van de Wolga. Desondanks was de stemming uitstekend.

Het PMV-(Predicted Mean Vote)model voor thermisch comfort (Fanger 1970, NEN 1996) gaat ervan uit dat het thermisch evenwicht van het menselijk lichaam wordt geregeld door autonome fysiologische reacties aangestuurd door thermische prikkels uit zijn directe omgeving (de Dear en Schiller 1998, Humphreys en Nicol 1998). Het PMV-model wordt algemeen beschouwd als universeel toepasbaar in alle soorten van gebouwen, klimaatzones, en bevolkingen.

De laatste jaren zijn veel onderzoekers zich af gaan vragen of het PMV-model wel zo universeel is als word aangenomen, omdat het belangrijke culturele, klimatologische, sociale, psychologische, en fysiologische factoren, alsmede omgevingsfactoren negeert. Richtlijnen en normen voor het binnenklimaat zouden moeten zijn gebaseerd op een adaptief model voor thermisch comfort waarin deze factoren wel tot uitdrukking worden gebracht. Een dergelijke model houdt rekening met het actuele buitenklimaat, maar ook met het verwachtingspatroon dat mensen hebben over het binnenklimaat, dat op zijn beurt weer is gebaseerd op ervaringen uit het verleden.

De ontwikkeling van een dergelijk adaptief model staat in ons vakgebied overigens nog in de kinderschoenen. Hierbij moet worden opgemerkt dat adaptatie aan de verschillende binnenmilieufactoren erg verschillend is. Bij adaptatie aan klimaatcondities spelen psychologische factoren blijkbaar een grote rol. Adaptatie aan de luchtkwaliteit gaat snel bij luchtverontreinigingen door bio-emissies, maar niet of nauwelijks bij verontreinigingen van chemische oorsprong, zoals tabaksrook en de meeste vluchtige organische componenten (VOC's), die tevens een prikkelende werking op ogen en neus hebben.

Adaptatie aan de koeling van slijmvliezen in de luchtwegen vindt niet plaats. *“The respiratory cycle alternately cooling and heating the mucosa within a period of around four seconds does not allow for any adaptation to insufficient respiratory cooling. An upper humidity limit to avoid respiratory discomfort, therefore, does not change with time of exposure”* (Toftum 1999). Dit is een belangrijke constatering! De eerste indruk van de luchtkwaliteit bij het betreden van een ruimte is de beste!!!

7.9 Terug naar het TVVL diner dansant

Met het oog op de dames hadden we de temperatuur in de feestzaal ingesteld op 25⁰C en daarmee, bij een relatieve vochtigheid van 35-70%, een PMV score tussen 0 (neutraal) en – 0,5 (aangenaam koel) gerealiseerd. Op basis van het thermisch comfortmodel resulteerde dit voor de heren helaas, zelfs bij verlaging van de relatieve vochtigheid tot 35% in een PMV score rond 2,5 (warm tot zeer warm).

Echter *“Behaaglijkheid is meer dan thermisch comfort”*! De grafiek van figuur 7 laat zien dat bij 25⁰C en een relatieve vochtigheid van 35% ook minstens 80% van de heren tevreden kan worden gesteld! Bij deze lage vochtigheid dragen ook de overige comfortfactoren, vochtigheid en natheid van de huid, en interactie van huid en kleding, bij aan een positieve waardering van het binnenklimaat. De uitstekende stemming tijdens deze gelegenheid zal tenslotte zorgen voor de *finishing touch*.

7.10 Een persoonlijke terugblik

Lang geleden werd door de auteur in de voorloper van TVVL magazine een artikel gepubliceerd onder de titel: “*Waar het warm is stinkt het: Dus houd het koel*”. (Bronsema 1994). Geconcludeerd werd dat door verlaging van de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid de waargenomen luchtkwaliteit wordt verbeterd.

De resultaten van het hiervoor omschreven recente wetenschappelijk onderzoek maken duidelijk dat deze conclusie niet voorbarig was. De titel zou beter hebben kunnen luiden: *Waar het warm en vochtig is stinkt het: Dus houd het koel en droog*”

8 “EEN NATTE DROOM”

De bekende schrijver/bioloog Maarten 't Hart heeft eens verslag gedaan van een persoonlijk onderzoek naar de invloed van de luchtvochtigheid op de nachtrust ('t Hart 1983). Geïntrigeerd door de vraag waarom hij in sommige ruimten en locaties beter sliep dan op andere, kwam hij door deductie op de theorie dat koele en droge lucht de nachtrust zou bevorderen. Om deze theorie te valideren bracht hij gedurende een warme zomer enkele maanden lang de nacht door in de koele kelder onder zijn huis. Zijn echtgenote had hierin *at random* al dan niet een luchtdroger onder zijn bed had gezet, uiteraard zonder dat hij daarvan op de hoogte was. 't Hart concludeert:

“Na drie maanden tekende zich een duidelijk patroon af. Was de relatieve vochtigheidsgraad in mijn kelder hoog (90%) dan bleek ik die nacht slecht geslapen te hebben. Was ze laag (65%) dan had ik over het algemeen goed geslapen. Het lijkt mij onwaarschijnlijk dat ik de eerste ben die een verband constateert tussen de hoogte van de relatieve vochtigheidsgraad van de lucht en de mate van slapeloosheid. Maar nooit kwam ik er iets over tegen. Daarom houd ik mij aanbevolen voor literatuurverwijzingen. Voorlopig luidt mijn eindconclusie: de uitdrukking “een natte droom” is een contradictio in terminis”

Het advies van Fanger “*serveer de lucht koel en droog*” is blijkbaar niet alleen gunstig voor het thermisch comfort en de arbeidsproductiviteit maar ook voor de nachtrust.

9 ENERGETISCH ASPECTEN

Het realiseren van een lagere relatieve vochtigheid dan gebruikelijk kost in principe extra energie; de enthalpie van de ventilatielucht moet immers worden verlaagd. Bij een ruimteconditie van 25°C / 60% RV is de enthalpie ca 55 kJ/kg en bij 25°C / 35% RV ca 42 kJ/kg. Het drogen van buitenlucht met een maximale enthalpie van 58 kJ/kg (28°C / 50% RV) houdt in het eerste geval een enthalpieverlaging in van 3 kJ/kg en in het tweede geval 16kJ/kg.

Bij het traditionele drogen van lucht door koeling kost dit extra energie, maar door toepassing van absorptie-droogtechnieken kan dit (laagwaardige) warmte zijn en is geen (hoogwaardige).elektrische energie nodig (Franzke 1997). De nakoeling van adiabatische gedroogde lucht speelt zich af op een zodanig hoog temperatuurniveau dat hiervoor geen mechanische koeling nodig is

Een belangrijke overweging in dit verband is ook dat de ventilatiecapaciteit bij een lagere relatieve vochtigheid substantieel kan worden gereduceerd. Zie de hiervoor vermelde publicaties van Fang c.s.

Dit artikel is niet bedoeld om de energetische aspecten van een lagere luchtvochtigheid uitgebreid te belichten. Geïnteresseerde en terzake deskundige lezers worden uitgenodigd

hierover hun licht te laten schijnen. Hierbij zou ook het Kathabar proces kunnen worden betrokken, dat voor industriële toepassingen al lang op de markt is (Kathabar 1996).

10 CONCLUSIES

- In het thermo-fysiologisch model van NEN-ISO 7730 komt het belang van de luchtvochtigheid nauwelijks of niet tot uitdrukking. De invloed van de luchtvochtigheid op de behaaglijkheid van het binnenmilieu is daarom in ons vakgebied ondergewaardeerd.
- Behaaglijkheid is meer dan thermisch comfort. Naast een als onbehaaglijk ervaren vochtige en natte huid bij een hoge relatieve vochtigheid, heeft vooral onvoldoende koeling van de slijmvliezen in de bovenste luchtwegen een negatief effect op de ervaren behaaglijkheid en de luchtkwaliteit.
- Het realiseren van een lagere relatieve vochtigheid in de koelperiode dan wordt aanbevolen in normen en richtlijnen biedt een hogere behaaglijkheid bij een lagere ventilatiecapaciteit.
- In ruimten waar mensen met verschillende activiteiten aanwezig zijn kan de luchttemperatuur worden afgestemd op personen met de laagste metabolisme / kleding combinatie. Voor personen met de hoogste metabolisme / kleding combinatie wordt de voor hen te hoge temperatuur gecompenseerd door een lage relatieve vochtigheid.
- Het realiseren van een lage relatieve vochtigheid behoeft in principe niet meer energie te kosten. Een vervolgstudie naar de energetische aspecten wordt aanbevolen.

11 REFERENTIES

- Arens, Edward A en Baughman, Anne V. 1996. Indoor Humidity and Human Health-Part 2: Buildings and Their Pollutants.. *ASHRAE Transactions* 3951.
- ASHRAE 1992. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ANSI/ASHRAE Standard 55-1992*.
- ASHRAE 1997. *Handbook Fundamentals*. ISBN 1-883413-45-1.
- Baughman, Anne V. en Arens, Edward A. 1996. Indoor Humidity and Human Health-Part 1: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants. *ASHRAE Transactions* 3951.
- Berglund, Larry G. 1998. Comfort and Humidity. *ASHRAE Journal August 1998*.
- Bronsema, B. 1994. Waar het warm is stinkt het: Dus houd het koel. *Klimaatbeheersing .../1994*.
- Bronsema, B 1997. Luchtbevochtiging – van de regen in de drup? *TVVL magazine nr /1997*
- CEN 1999. Ventilatie van Gebouwen – Ontwerpcriteria voor de binnenomstandigheden. *NPR-CR-1752 1999*.
- Cooper, Gail 1998. *Air-Conditioning America. Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960*. The John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. ISBN 0-8018-5716-3.
- De Dear, J., Schiller Brager, G. 1998. *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. ASHRAE Technical Data Bulletin Vol. 14 Number 1-Field Studies of Thermal Comfort and Adaptation.
- DIN 1994. Raumluftechnik – Gesundheitstechnische Anforderungen. *DIN 1946 Teil 2 Januar 1994*.

- Fang, L., Clausen, G. en Fanger, P.O. 1998a. Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures. *Indoor Air Volume 8, No.4, December 1998.*
- Fang, L., Wargocki, P., Witterseh, T., Clausen, G. en Fanger, P.O. 1998b. Field Study on the Impact of Temperature, Humidity and Ventilation on Perceived Air Quality. *Proceedings Indoor Air 99 Volume 2, Page 107-112.*
- Fanger, P.O. 1970. Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering. *Copenhagen, Danish Technical Press.*
- Frantze, U. en Schenk, J. Luftentfeuchtung mit Cellulose-Sorptionsregenerator – Langsam, aber sicher. *CCI Print 4/1997.*
- ISSO 1990. Ontwerp Binnencondities en Thermische Behaaglijkheid in Gebouwen. *ISSO Research Rapport 5, 1990.*
- ISSO 1991. Thermisch Binnenklimaat – Aanbevelingen. *ISSO Publikatie 19, 1991.*
- Kathabar Systems Europe 1996. Luchtdroging en –decontaminatie. *TVVL Magazine 12/1996.*
- 't Hart, Maarten 1983. Een natte droom. *NRC Handelsblad 25 november 1983.*
- Mahlman, Jerry D. 2001. Human-caused climate warming: Implications for practically everything. *Lunchtoespraak ASHRAE wintermeeting 2001.* Niet gepubliceerd.
- Meer, A., van der> Relatieve luchtvochtigheid in kantoor situaties. *Klimaatbeheersing 14, (1985) nr 11 november.*
- NEN 1996. Gematigde thermische binnenomstandigheden. Bepaling van de PMV- en PPD-waarden en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid. *NEN-ISO 7730 2^e druk, februari 1996.*
- Sterling, E.M. et al 1985. Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings. *ASHRAE Transactions CH-85-13 No.1.*
- Toftum, J. et al 1998. Effect of fabric texture and material on perceived discomfort at high humidity. *Proceedings Indoor Air 99 Volume 1 Page 608-613.*
- Toftum, J. en P O Fanger 1999. Air Humidity Requirements for Human Comfort. *ASHRAE Transactions SE-00-5-1*