



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Bijlagen Duurzame Comfortinstallaties

EOS-LT DP 2015

Datum 2012

TU Delft en Cauberg-Huygen

In opdracht van Agentschap NL (nu Rijksdienst voor
Ondernemend Nederland)

Publicatienr RVO-150-1501/RP-DUZA
www.rvo.nl

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Economische Zaken.

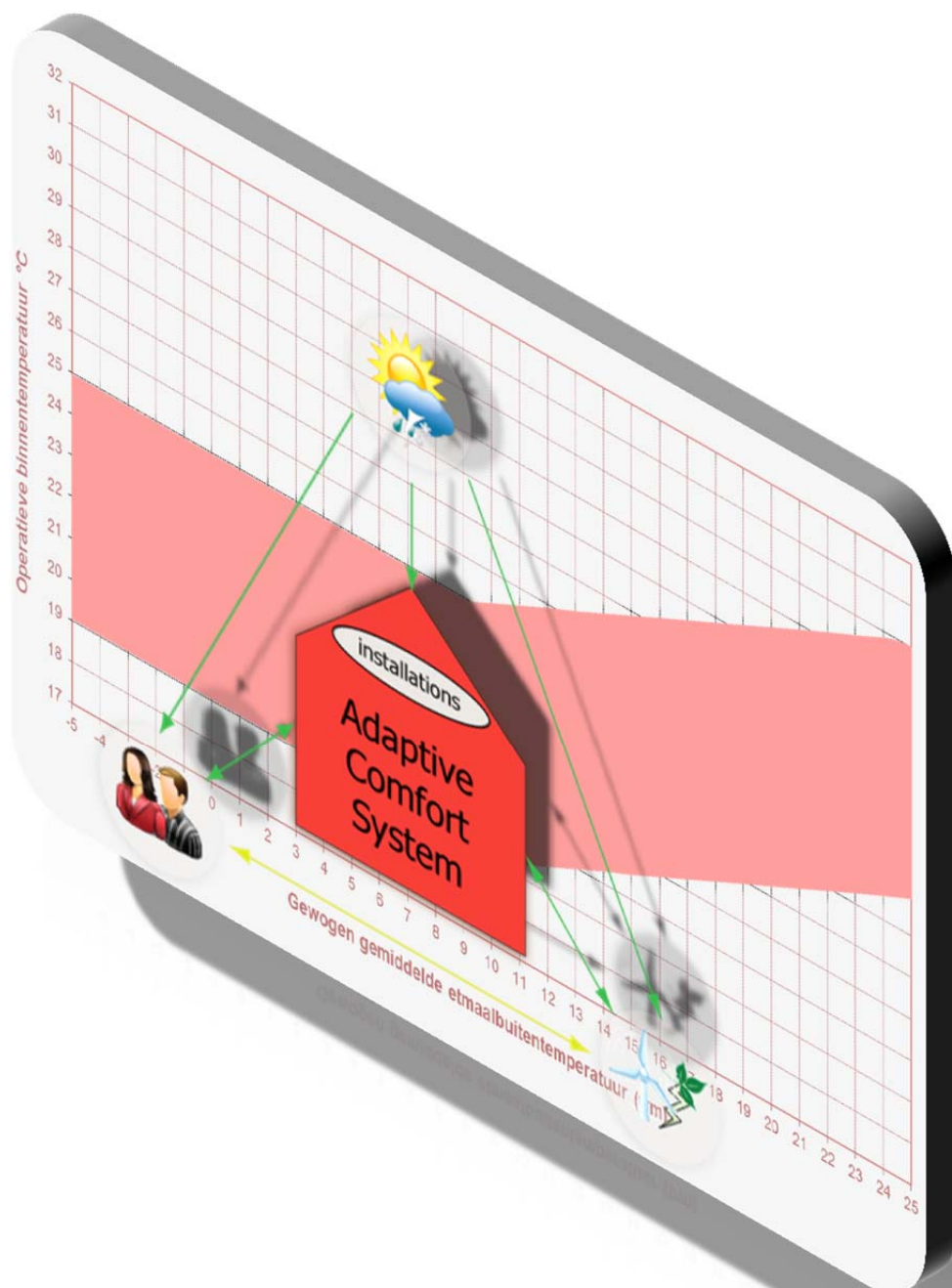
EOS Duurzame Projectontwikkeling na 2015

BIJLAGEN

Werkpakket 3: Duurzame Comfortinstallaties

Werkpakket leider: TU-Delft

Uitvoerenden: TU-Delft, Cauberg-Huygen



Inhoudsopgave

BIJLAGE 1 Achtergronden thermisch comfort.....	3
B1.1 Inleiding.....	3
B1.2 Vroege onderzoeken	4
B1.3 Klimaatkameronderzoek	6
B1.4 Normen en richtlijnen	9
B1.5 Nieuwe belangstelling voor veldonderzoek.....	12
B1.6 Herziening normen en richtlijnen	14
B1.7 Keuze voor een eigentijdse richtlijn	16
BIJLAGE 2 Simulatie gebruikersgedrag m.b.v. Markov –chain	19
B2.1 Markov-Chain Monte Carlo methode voor aanwezigheid van bewoners	20
B2.2 Monte Carlo simulatie van aanwezigheid van bewoners gebaseerd op profielen.....	23
BIJLAGE 3 Outline & Introduction Dissertatie E.E. Alders	26
B3.1 Problem definition	28
B3.2 Research design.....	31
B3.3 Background / Scope	36
B3.4 Introduction	37
B3.5 Weather and the Thermal Environment	38
BIJLAGE 4 PAPER SASBE 2009.....	42

BIJLAGE 1 Achtergronden thermisch comfort

B1.1 Inleiding

Tot begin jaren zestig werden de meeste gebouwen zonder mechanische koeling gebouwd. Airconditioning werd in de Verenigde Staten al voor de 2^e Wereldoorlog toegepast, maar in de meeste delen van de wereld werd de temperatuur beheerst met architectonische en bouwfysische oplossingen. Als het buiten warm werd dan was een hogere binnentemperatuur acceptabel (binnen bepaalde grenzen) en werd de temperatuur aangepast door zonwering neer te laten en ramen te openen (luchtbeweging). Ook pasten mensen de kleding aan of gingen ze in een koeler deel van het gebouw of buiten in de schaduw zitten. Als het te koud werd werden ruimtes bijverwarmd (meestal lokaal). Maatregelen om te voorkomen dat de binnentemperaturen te hoog opliepen waren een belangrijk onderdeel van het architectonisch ontwerp en de sociale structuur. Bij de keuze van de oriëntatie van gevels bijvoorbeeld hield men rekening met de zonbelasting, de ramen werden niet te groot te gekozen, de gevel bevatte neggen die schaduw op de ramen wierpen, 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 nacht¹. Architecten begrepen dat een goed binnenklimaat grotendeels afhankelijk was van de keuzes die ze in hun ontwerp maakten. Ook hadden architecten kennis van de bouwfysische principes, waardoor architectuur en bouwfysica op een geïntegreerde manier werden benaderd en vaak tot innovatieve ontwerpen en oplossingen leidden.

Dit veranderde langzaam toen airconditioning zijn intrede deed. Door de mogelijkheden die het mechanisch koelen van de lucht bood kon iedere gewenste binnentemperatuur worden gerealiseerd, vrijwel onafhankelijk van architectonische keuzes. Lichte constructies, grote glasoppervlakken, vlakke, gesloten gevelconstructies, gebouwen boven snelwegen, bijna alles werd mogelijk op het gebied van vormgeving en functies, tot aan skibanen in de woestijn.

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 aanreikt. Door alle technologische ontwikkelingen ontstond de behoefte aan beter onderbouwde gegevens wat betreft comfortabele binnentemperaturen. In de volgende paragrafen wordt dieper ingegaan op normen en richtlijnen voor thermisch comfort, op de achtergronden hiervan en hoe de inzichten in de loop van de jaren zijn veranderd. Deze veranderingen hebben weer gevolgen voor het energiegebruik en het ontwerp van binnenklimaat en gebouw.

¹ *In het Midden Oosten zijn prachtige voorbeelden te vinden van eeuwenoude ontwerpen die in een heet klimaat toch behaaglijk binnenklimaat mogelijk maakt.*

B1.2 Vroege onderzoeken

Op verschillende locaties in de wereld werd onderzoek gestart naar het verband tussen de thermische omgeving en de perceptie hiervan door mensen. Het eerste onderzoek dateert van 1936 en werd in Groot Brittannië uitgevoerd door Thomas 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. Er werden temperaturen gemeten en er werd met behulp van vragenlijsten gevraagd of de vrouwen zich thermisch gezien comfortabel voelden. De optimale comforttemperatuur bleek 18°C te zijn.

In de jaren vijftig en zestig werd door Charles Webb veldonderzoek gedaan in werkplaatsen en kantoren, in Singapore, Baghdad, India en Groot Brittannië. Hij vond dat mensen zich comfortabel voelden bij temperaturen die lagen tussen 16°C en 30°C. Webb concludeerde dat mensen *geadapteerd*² waren aan de gemiddelde condities waaraan ze waren blootgesteld. Uit dit onderzoek bleek dat het thermisch comfort meer samenhangt met het verschil met de gemiddelde temperatuur in de betreffende ruimte dan van de temperatuur zelf.

In de jaren zestig en het begin van de jaren zeventig werden veel veldonderzoeken uitgevoerd in voornamelijk Groot Brittannië (zie figuur 5). Begin jaren zeventig werd door de onderzoekers Nicol en Humphreys een meta-analyse uitgevoerd op 35 onderzoeken die overal ter wereld verricht zijn in de periode 1938-1974. In totaal werden bij deze onderzoeken 200.000 "comfort votes" verzameld.

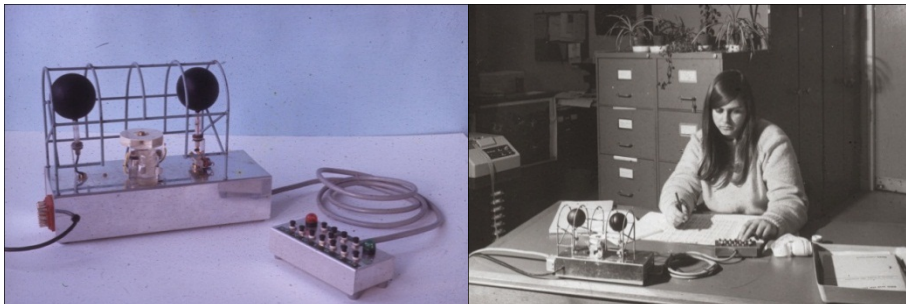


Figure 5: The data-logging monitor unit with which the indoor temperatures were measured and where the respondents could give their 'comfort-vote'. The ventilated wet and dry bulb temperatures, the temperatures of a heated and an unheated globe were measured.

De resultaten lieten zien dat de neutrale temperaturen sterk gecorreleerd zijn met de overeenkomstige buitentemperaturen en dat de relatie het sterkst was voor de "free running" gebouwen, dus de gebouwen zonder koeling.

² Webb kan worden gezien als de grondlegger van de theorie van adaptief thermisch comfort. Hoewel zijn onderzoeken dateren van de jaren zestig, duurde het nog 30 jaar voordat de theorie geaccepteerd begon te raken.

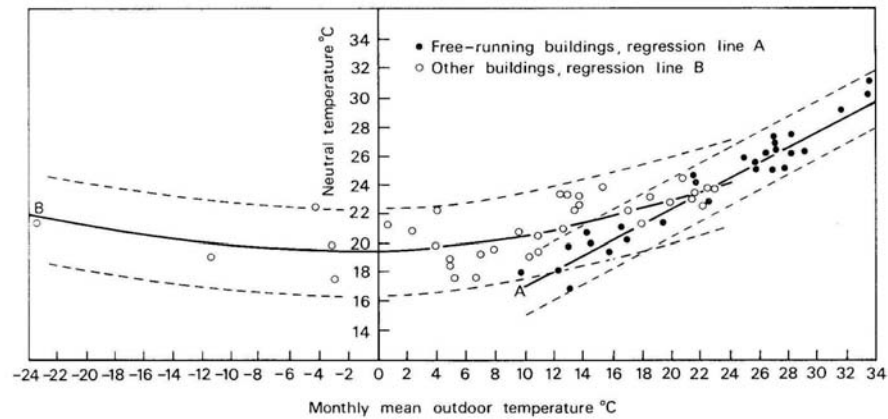


Figure 2
Scatter diagram for neutral temperature

Figuur 6: De neutrale temperatuur gerelateerd aan de gemiddelde maandtemperatuur.

Er werden twee vergelijkingen voor de comforttemperatuur afgeleid:

Voor free-running gebouwen: $T_{\text{comf}} = 0.33T_{\text{rm}} + 18.8$ (°C)

Voor airconditioned gebouwen: $T_{\text{comf}} = 0.09T_{\text{rm}} + 22.6$ (°C)

T_{comf} is de comforttemperatuur

T_{rm} is de "running mean outdoor temperature"

Nicol en Humphreys ontwikkelden ook een model, waarbij thermisch comfort een zelfregelend systeem in de mens is, 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 (zie figuur 7).

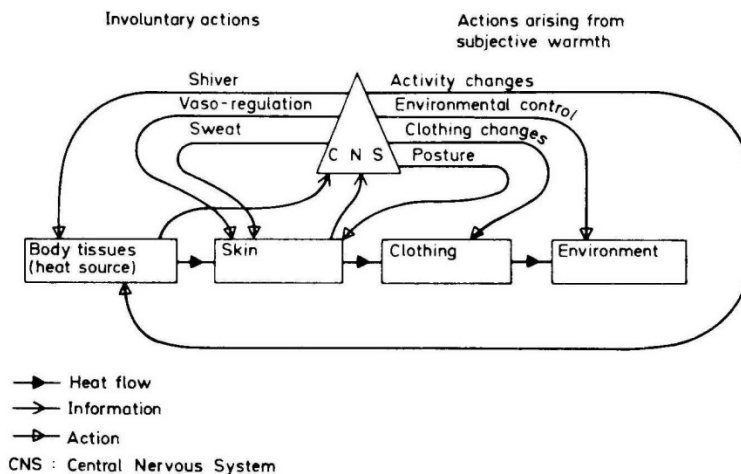


Figure 2. The thermal regulatory system.

Figuur 7: Het thermoregulatiesysteem van de mens volgens Nicol en Humphreys (1972).

Deze informatie leek zeer waardevol voor het ontwerpen van gebouwen, maar een andere ontwikkeling zorgde ervoor dat deze modellen gedurende lange tijd in de vergetelheid raakten en dat een andere benadering belangrijk werd, met verstrekkende gevolgen.

B1.3 Klimaatkameronderzoek

Naast het veldonderzoek werd in de jaren zestig onderzoek naar thermisch comfort in klimaatkamers steeds populairder. 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 en vasoconstrictie, gedetailleerd worden bestudeerd en ontstaat inzicht hoe de mens een thermische omgeving ervaart en hierop reageert. Pioniers op het gebied van modellen die zijn gebaseerd op fysiologische en fysische metingen zijn Stolwijk en Gagge (Stolwijk, 1970; 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 en later van andere mensen.

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

- de gemiddelde stralingstemperatuur,
 - de luchtvochtigheid,
 - de luchtsnelheid
- werden gevarieerd én
- het activiteitsniveau (metabolisme) werden gemeten en vastgesteld,

Aan de proefpersonen werd gevraagd 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

Zo ontstond een vergelijking die de gemiddelde thermische sensatie van een theoretische groep mensen in een homogeen binnenklimaat voorspelt, uitgedrukt in de PMV³-index.

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0,303 \cdot e^{-0,031 \cdot M^*} + 0,028) \cdot [\text{RM}^* - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot \text{RM}^* - p_i) - \\
 & 0,42 \cdot (\text{RM}^* - 58,15) - 17 \cdot 10^{-6} \cdot M^* \cdot (5867 - p_i) - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot M^* \cdot (34 - T_i) - \\
 & 39,6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{\text{kl}} \cdot ((T_{\text{kl}} + 273)^4 - (T_s + 273)^4) - f_{\text{kl}} \cdot \alpha_c \cdot (T_{\text{kl}} - T_i)]
 \end{aligned}$$

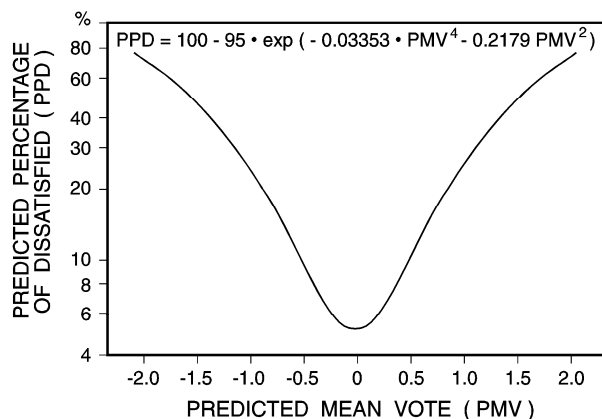
Hierin is:

M* metabolisme M per m² lichaamsoppervlak in W/m²

³Predicted Mean Vote

- RM* metabolisme per m² lichaamsoppervlak minus uitwendig verrichte arbeid in W/m²
- p_i dampspanning van de binnenlucht in Pa
- T_i temperatuur van de binnenlucht in °C
- T_{kl} oppervlaktetemperatuur van de kleding in °C
- T_s gemiddelde stralingstemperatuur van de wanden in °C
- α_c warmte-overgangscoefficiënt voor convectie in W/m²K
- f_{kl} verhouding tussen de oppervlakte van het geklede en het ongeklede lichaam (-)

Door aan te nemen dat de proefpersonen die -2, -3, +2, +3 stemden “ontevreden” waren, kan ook het theoretisch voorspelde percentage ontevredenen worden berekend, de PPD⁴. Figuur 9 geeft de onderlinge relatie weer.



Figuur 8: 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 waarmee, tot op de dag van vandaag, het binnenklimaat van gebouwen in grote delen van de wereld 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 aan te nemen kon het te verwachten thermisch comfort worden berekend. Dit is ook het grootste punt van kritiek dat in de loop der jaren in toenemende mate werd geuit. Omdat metabolisme en kledingsisolatie zeer moeilijk nauwkeurig zijn te bepalen en in de tijd sterk variëren geeft de PMV-index een schijnnaauwkeurigheid.

⁴ Predicted Percentage Dissatisfied

B1.4 Normen en richtlijnen

Op basis van het PMV-model zijn verschillende 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 omstandigheden⁵ plaatsvinden tot $-1,0 < PMV < 1,0$ (25% ontevredenen), gedurende maximaal 10% van de tijd (100 uur in de zomer). Later resulteerde dit in de zogenaamde temperatuuroverschrijdings (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. Dat 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 in gebouwen met weinig massa en dit onvoldoende tot uitdrukking komt 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. Dit werd de Gewogen Temperatuur Overschrijding (GTO) genoemd. Op basis van computersimulaties werd vastgesteld dat voor een “gemiddeld” gebouw de gemiddelde PMV bij een 100-urige overschrijding van de grenswaarde ($PMV = 0,5$), overeenkomt met 150 weeguren.

Later zijn verschillende nationale en internationale normen ontwikkeld:

- 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’.
- NEN-EN-ISO 7726: 2001 ‘Ergonomie van de thermische omgeving - Instrumenten voor het meten van fysische grootheden’.
- NPR-CR 1752:1999 ‘Ventilatie van gebouwen - Ontwerpcriteria voor de binnenomstandigheden’.
- NEN-EN 13779:2007 ‘Ventilatie voor utiliteitsgebouwen – Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen’.

⁵ Onder bijzondere omstandigheden werden onder andere verstaan sporadisch voorkomende hitte- of koudepieken en storingen aan klimaatinstallaties.

- ASHRAE standard 55: 2004 'Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy'. (in het Engels)

NEN-EN-ISO 7730 geeft onderstaande grenswaarden, gebaseerd op het PMV-model. Merk op dat de waarden voor activiteitsniveau en kledingisolatie niet nauwkeurig kunnen worden vastgesteld en in de praktijk sterk variëren, terwijl de temperaturen binnen nauwe grenzen gehouden dient te worden.

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

Activiteit	Ruimtetype	Klasse	Operatieve temperatuur (°C)	
			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)

Tabel 2: Grenswaarden voor de luchtsnelheid

Activiteit	Ruimtetype	Klasse	Maximale luchtsnelheid (m/s)	
			Zomer (0,5 clo)	Winter (1,0 clo)
Voornamelijk	Kantoor,	A	0,12	0,10

zittend (1,2 met)	vergaderruimte, restaurant, klaslokaal	B	0,19	0,16
		C	0,24	0,21
Voornamelijk staand (1,6 met)	Laboratorium, winkel	A	0,16	0,13
		B	0,20	0,15
		C	0,23	0,18

Tabel3: Grenswaarden voor verticale temperatuurgradiënt (1,1 en 0,1 m boven de vloer).

Klasse	Verticale temperatuurgradiënt (°C)
A	<2
B	<3
C	<4

Tabel 4: Grenswaarden voor stralingstemperatuurasymmetrie.

Klasse	Asymmetrie stralingstemperatuur (°C)			
	Warm plafond	Koude wand (glas)	Koud plafond	Warme wand
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

Tabel 5: Grenswaarden voor vloertemperatuur.

Klasse	Vloertemperatuur (°C)
A	19 - 26
B	19 - 29
C	17 - 31

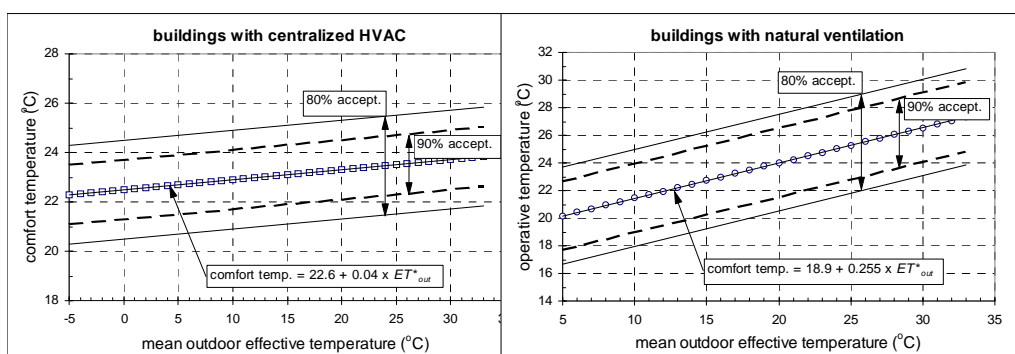
In de tabellen wordt onderscheid gemaakt tussen 3 binnenklimaatklassen, waarbij klasse A beter is dan klasse B en klasse B weer beter is dan klasse C. Hoewel dit op het eerste gezicht een redelijke aanname lijkt, is er veel discussie over de betrouwbaarheid van de klassenindeling. In de praktijk blijkt dat het binnenklimaat uit zoveel variabele factoren bestaat dat de bandbreedte binnen de klassen groter blijkt te zijn dan de bandbreedte tussen de klassen en dat er nauwelijks significante verschillen tussen de klassen worden ervaren in een werkelijke omgeving. Uit een meta-analyse van databases met binnenklimaatonderzoek bleek dan ook dat de klimaatklassen in de praktijk niet worden waargenomen door gebouwgebruikers (Arens, 2009).

Wel wordt er in de praktijk verschil in comfort ervaren als gevolg van adaptieve mogelijkheden, zoals het openen van ramen, het kunnen instellen van de temperatuur en de mate waarin het binnenklimaat om een natuurlijke en voorspelbare manier in zekere mate het buitenklimaat volgt.

B1.5 Nieuwe belangstelling voor veldonderzoek

Halverwege de jaren negentig nam de kritiek op deze methode toe, toen uit veldonderzoeken steeds vaker bleek dat de comfortbeleving van mensen in veel gevallen niet altijd overeen kwam met de voorspellingen van het PMV-model of andere thermofysiologische modellen. De in paragraaf 3.2 beschreven veldonderzoeken kwamen opnieuw in de aandacht en het inzicht onstond dat thermisch comfort niet alleen af hangt van thermofysiologische factoren, maar dat bijvoorbeeld het gedrag van mensen, en de omstandigheden waarin ze zich bevinden ook zeer belangrijk blijken te zijn voor de acceptatie van en voorkeur voor temperaturen.

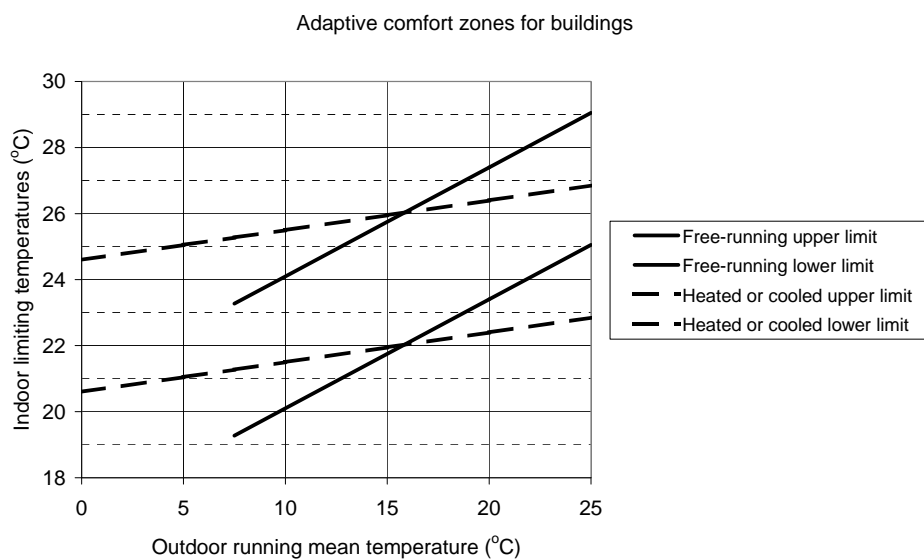
Een belangrijk onderzoek dat het denken over thermisch comfort sterk heeft beïnvloed is een onderzoek in 161 gebouwen verspreid over de wereld (de Dear, 1997). Figuur 8 en 9 zijn afkomstig uit dit onderzoek en laten zien dat de comforttemperatuur samenhangt met de gemiddelde buitentemperatuur: hoe warmer het buiten is hoe hoger de comforttemperatuur. Ook is de comforttemperatuur in natuurlijk geventileerde, niet gekoelde gebouwen, hoger en hangt sterker samen met de buitentemperatuur dan in airconditioned gebouwen.



Figuur 8: Adaptive PMV method for predicting optimum comfort temperature and acceptable temperature ranges (80% and 90% general comfort criteria) in centrally-controlled HVAC buildings.

Figuur 9: Adaptive model for predicting optimum comfort temperature and acceptable temperature ranges (80% and 90% general comfort criteria) in naturally ventilated buildings.

In een onderzoek in 25 gebouwen in West-Europa (Nicol en Humphreys, 2006) werd onderscheid gemaakt tussen “free-running” en “verwarmde en gekoelde” gebouwen (figuur 10). Ook hier is goed te zien dat mensen in zekere mate wennen of *adapteren* aan de gemiddelde temperaturen die in gebouwen voorkomen.



Figuur 10: 80% comfort zones ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) voor “free-running” (getrokken lijnen) en verwarmde en gekoelde gebouwen (streepjes lijn), afhankelijk van de “running mean outdoor temperature”.

De effecten van *adaptatie* worden wel in veldonderzoeken gevonden, maar niet in laboratoriumonderzoeken. Er zijn verschillende vormen van adaptatie die met elkaar samenhangen en elkaar beïnvloeden (de Dear, 1997; Nikolopoulou, 2004; Ubbelohde, 2004):

- *Beïnvloeding van de omgeving.* Het gaat hierbij om merkbare beïnvloeding van de omgeving en niet alleen het idee dat mensen hebben dat ze iets kunnen beïnvloeden. De omgeving kan worden beïnvloed door ramen en deuren te openen om de temperatuur te veranderen, de luchtsnelheid te verhogen en de luchtkwaliteit te verbeteren. Verder verhogen ventilatoren de luchtsnelheid, waardoor de huid wordt afgekoeld. Met zonwering kan de warmtestraling verminderd worden waardoor de temperatuur wordt verlaagd.

- *Gedragsmatige adaptatie*. Mensen passen hun gedrag aan om hun perceptie van warmte beter in overeenstemming te brengen met hun behoeften, door bijvoorbeeld kleding uit en aan te doen en de inspanning aan te passen (rustiger aan doen als het warm is).
- *Psychologische adaptatie*. Hieronder verstaan we een combinatie van niet fysische en niet fysiologische factoren die bij de mens bijdragen aan het streven naar thermisch comfort. Voorbeelden van psychologische adaptatie zijn:
 - *Ervaringen* met het binnenklimaat over korte en lange termijn beïnvloeden de verwachtingen en de hierop afgestemde gedragsmatige adaptatie.
 - De *context* is van invloed op het thermisch comfort. In een stationshal bijvoorbeeld wordt een ander niveau van thermisch comfort verwacht dan in een supermarkt, in de kerk of thuis.
 - Mensen prefereren een enigszins *variabel* klimaat boven een stabiel of monotoon klimaat.

Omstandigheden, gedrag, ervaringen, verwachtingen en beïnvloedingsmogelijkheden beïnvloeden het thermisch comfort op ieder moment.

B1.6 Herziening normen en richtlijnen

Op basis van genoemde veldonderzoeken zijn adaptieve temperatuurgrenzen ontwikkeld. In Nederland zijn adaptieve temperatuurgrenzen opgenomen in de ATG-richtlijn (ISSO 74, 2004). Figuur 11 toont de temperatuurgrenzen voor een binnenklimaat zonder mechanische koeling (type Alpha genaamd) en figuur 12 geeft de grenzen voor een binnenklimaat met mechanische koeling.

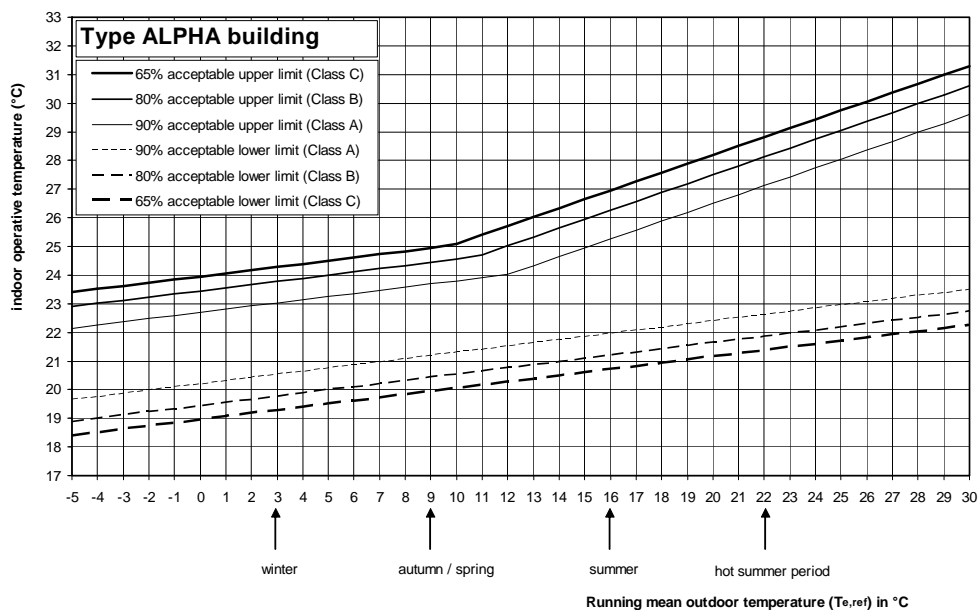


Figure 11: type Alpha building/climate. Limits of operative indoor temperatures for 90%, 80% and 65% acceptability, as a function of the weighted outdoor temperature $T_{e,ref}$.

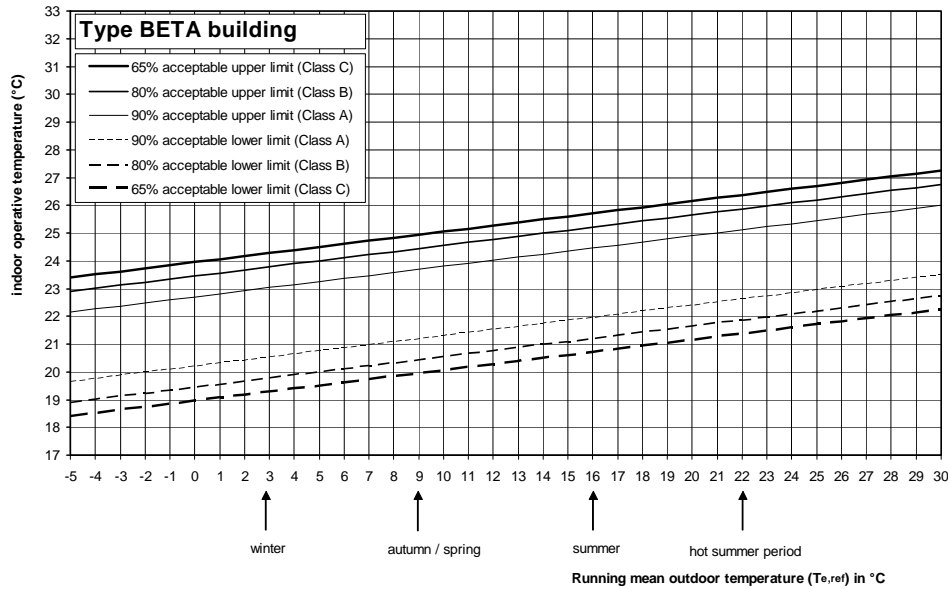


Figure 12: type Beta building/climate. Limits of operative indoor temperatures for 90%, 80% and 65% acceptability, as a function of the weighted outdoor temperature $T_{e,ref}$.

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. Verder onderzoek is nodig om de hier meer duidelijkheid in te verkrijgen. Voor bovenstaande figuren geldt verder:

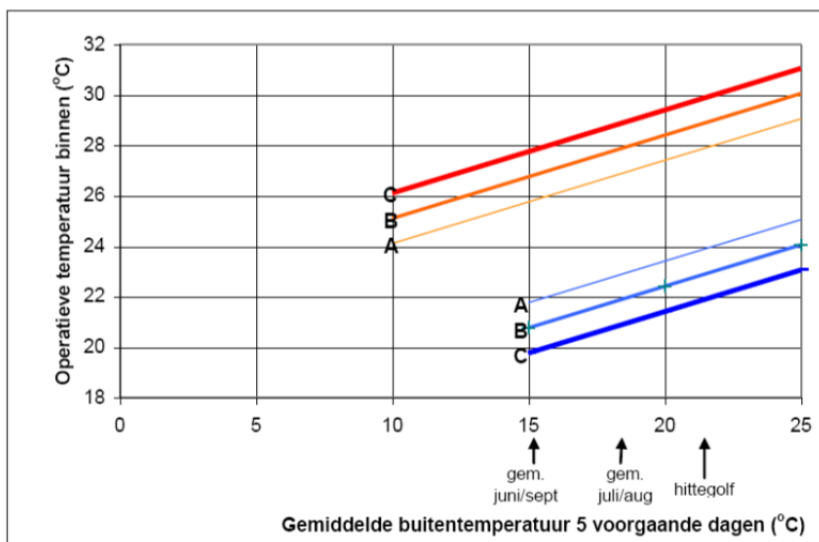
- De verticale as geeft de comforttemperatuur weer, uitgedrukt als de *operatieve temperatuur*, hier aangenomen als het rekenkundig gemiddelde van de luchttemperatuur en de stralingstemperatuur.
- Langs de horizontale as staat de $T_{e,ref}$, de Running Mean Outdoor Temperature. Deze wordt bij de ATG-methode 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:

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

2,4

NEN ISO 15251 geeft aan dat onder bepaalde voorwaarden adaptieve temperatuurgrenswaarden kunnen worden aangehouden. De voorwaarden zijn:

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



Figuur X: 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.

B1.7 Keuze voor een eigentijdse richtlijn

Wanneer we de achtergronden van de veldonderzoeken naar adaptief thermisch comfort analyseren en concluderen wat de betekenis is voor een “state of the art” richtlijn voor thermisch comfort, dan komen we op de volgende overwegingen:

In NEN-EN15251, de ASHRAE 55 is de adaptieve benadering een aanvullende mogelijkheid, wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast en beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is. In alle andere gevallen wordt het PMV-model geadviseerd. In ISSO74 wordt onderscheid gemaakt tussen Alpha- en Bètaklimaten. De keuze tussen beide klimaten wordt gedaan via een (niet eenduidig) schema en komt er op neer dat een Alphaklimaat kan worden ontworpen wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast, beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is en de kledingsisolatie kan worden gevarieerd. Een Bètaklimaat kan worden ontworpen als er mechanische koeling is en er geen beïnvloedingsmogelijkheden zijn.

Achtergrond hierbij is de aanname dat mensen adapteren aan hogere temperaturen als de buitentemperaturen ook hoger zijn. Wordt er koeling toegepast dat treedt deze adaptatie in mindere mate op. Dit is echter een omgekeerde redenatie, de feitelijke situatie is dat mensen wennen aan een gekoeld binnenklimaat (...). De comforttemperaturen liggen lager dan in een binnenklimaat

zonder mechanische koeling. Het percentage tevreden is echter niet hoger en in de meeste gevallen lager (...). Er wordt dus energie gebruikt om lagere temperaturen te realiseren, terwijl dat niet tot een comfortverhoging, maar eerder tot meer gezondheidssymptomen en een lager comfort leidt (...).

Daarom ligt het voor de hand een gewenst binnenklimaat te definiëren dat is gebaseerd op uitsluitend een adaptieve benadering. Alle analyses van databases naar adaptief thermisch comfort hebben de zelfde overeenkomsten:

- Als er niet wordt verwarmd of gekoeld, dus in de free-running modus, is er een koppeling tussen de buiten- en binnentemperatuur.
- De comforttemperatuur neemt boven een gemiddelde buitentemperatuur van circa 10-12°C toe met de buitentemperatuur.
- Op de verticale as is de operationele binnentemperatuur weergegeven (gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur).
- Op de horizontale as is de gewogen gemiddelde buitentemperatuur weergegeven.

Wij kiezen dus niet voor een bètabinnenklimaat of een binnenklimaat dat wordt gedefinieerd door het PMV-PPD-model. Wij kiezen voor het definiëren van het binnenklimaat op basis van de Europese database, het SCATs-onderzoek, waarop ook de NEN-EN15251 is gebaseerd. De reden hiervoor is dat de gebouwen in dit onderzoek beter overeenkomen met de Nederlandse situatie dan de ASHRAE RP-884 database, waarin gebouwen in tropische streken voorkomen. Daarnaast maakt het SCATs-onderzoek gebruik van de 'running mean outdoor temperature' (RMOT). Deze parameter geeft de hoogste correlatie met de voorspelde comforttemperatuur in het binnenklimaat.

Er zijn verschillende manieren om adaptieve temperatuurgrenzen toe te passen:

- Drie kwaliteitsklassen met 90%, 80%, 65% acceptatie. Dit is gedaan bij de NEN-EN15251, de ASHRAE 55 en de ISO-74. De ASHRAE-55 en de ISO-74 zijn gebaseerd op de RP-884 database met gebouwen verspreid over de wereld, terwijl de NEN-EN15251 is gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek in Europese gebouwen. Recent onderzoek (Arens et al, 2010) laat zien dat in werkelijke omgevingen de gebruikers geen onderscheid ervaren tussen de verschillende klassen. Verdere overwegingen om de klassenindeling niet toe te passen zijn (Leijten, 2010).
- Drie kwaliteitsklassen toepassen, maar dit afhankelijk laten zijn van de adaptieve mogelijkheden. Naarmate mensen meer adaptieve mogelijkheden hebben de omgeving aan te passen via te openen ramen, ventilatoren, zonwering, etc. en ook de kleding te variëren zijn ze beter in staat de comforttemperatuur en de heersende temperatuur met elkaar in overeenstemming te brengen. Daarom is het een mogelijkheid een ruimere bandbreedte te hanteren bij veel adaptieve mogelijkheden en een nauwere bandbreedte bij weinig adaptieve mogelijkheden. Er

zijn echter geen onderzoeken waarin dit is getoetst en de beschrijving van de adaptieve mogelijkheden vereist zeer grote nauwkeurigheid om misinterpretaties te voorkomen (Nicol, 2010).

- Een grensgebied toepassen in plaats van drie. Minimaal 80% vindt het dan acceptabel. Naarmate er meer adaptieve mogelijkheden zijn en de temperatuur voorspelbaarder is (minder actieve regelingen) zal het comfortniveau hoger worden.

We kiezen ervoor om een bandbreedte te hanteren, gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek. Een bandbreedte zorgt voor minimaal 80% acceptatie. Meer onderscheid tussen 90% en 70 of 65% zal in de praktijk niet worden ervaren door de gebruikers. De data van het Europese onderzoek zijn mogelijk maatgevender dan de data van de RP-884 database, waar ook data van zeer warme klimaten in verwerkt zijn. In Europese SCATs-onderzoek wordt voor de horizontale as de RMOT gebruikt die een nauwere correlatie geeft tussen de buitentemperatuur en de comforttemperatuur.

BIJLAGE 2 Simulatie gebruikersgedrag m.b.v. Markov –chain

In deze bijlage wordt beschreven hoe de aanwezigheid van bewoners gesimuleerd wordt. Enerzijds beschouwen we een Markov-Chain Monte Carlo methode waarmee de aanwezigheid van de bewoners door de tijd heen stochastisch gegenereerd wordt; hierdoor wordt de variatie in aanwezigheid van bewoners in rekening gebracht. Anderzijds beschouwen we een Monte Carlo run gebaseerd op deterministische aanwezigheidsprofielen van de bewoners. Beide methoden leiden tot een spreiding in aanwezigheid en daarmee tot een spreiding in energieverbruik voor ruimteverwarming.

Tijdbestedingsonderzoek (TBO) data van het Sociaal Cultureel Planbureau zijn gebruikt om de aanwezigheid van personen in de woning te simuleren. Voor een periode van een week hebben respondenten al hun activiteiten in een dagboek opgeschreven met een tijdsresolutie van een kwartier. Naast tijdsbesteding is er voor elke respondent ook informatie beschikbaar over het huishouden (aantal bewoners) en de leeftijd en het geslacht van de respondent. Verder geven respondenten aan of ze hoofdkostwinnaar zijn. Gebaseerd op deze gegevens kan een selectie uit alle TBO data gemaakt worden voor ouderen (ouder dan 65 jaar), werkenden (al dan niet hoofdkostwinnaar) zonder kinderen, en personen die behoren tot een vierpersoonshuishouden (twee volwassenen en twee kinderen). De volgende huishoudtypen worden beschouwd:

- twee ouderen
- twee werkenden
- gezin met twee volwassenen en twee kinderen

Een voorbeeld van de TBO data wordt gegeven in **Error! Reference source not found.** In deze figuur zijn de respondenten ouderen (ouder dan 65 jaar). In de kolommen hebben de verschillende respondenten hun activiteit beschreven op een tijdschaal van een kwartier, gedurende een periode van een week.

Om de aanwezigheid van de respondenten in hun woning te kunnen bepalen, dient een vertaalslag gemaakt te worden van de opgegeven tijdsbesteding naar aanwezigheid/afwezigheid.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	ID RP (SLEUTEL)	tbonr	100024	100033	100063	100123	100232	100429	100473	100483	100488	100598	100637	100659	100690	100715	100718	100721	100721
2	Leeftijd RP	jaar	69	83	87	72	66	68	71	78	79	82	74	73	76	80	75	81	81
3	Gestacht RP	m/v	v	m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	m	v
4	Plaats huishoude	hk/phk/k/o	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk
20																			
21	Su.00		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
22	Su.00.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
23	Su.00.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
24	Su.00.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
25	Su.01		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
26	Su.01.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
27	Su.01.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
28	Su.01.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
29	Su.02		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
30	Su.02.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
31	Su.02.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
32	Su.02.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
33	Su.03		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
34	Su.03.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
35	Su.03.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
36	Su.03.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
37	Su.04		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
38	Su.04.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
39	Su.04.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
40	Su.04.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
41	Su.05		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
42	Su.05.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
43	Su.05.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
44	Su.05.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
45	Su.06		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
46	Su.06.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
47	Su.06.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
48	Su.06.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
49	Su.07		sl	sl	sl	sl	pc	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
50	Su.07.15		sl	sl	sl	sl	pc	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
51	Su.07.30		sl	sl	sl	sl	pc	sl	sl	pc	pc	cook	sl	sl	cook	sl	sl	sl	sl
52	Su.07.45		sl	sl	pc	hh-d	pc	sl	sl	pc	eat	cook	sl	sl	cook	sl	sl	sl	sl
53	Su.08		hh-o	pc	pc	cook	cook	pc	sl	eat	eat	sl-s	sl	eat	cook	pc	sl	pc	pc
54	Su.08.15		hh-o	cook	hh-d	cook	eat	pc	sl	eat	eat	pc	sl	eat	hh-k	pc	sl	pc	eat
55	Su.08.30		hh-o	cook	eat	hh-d	eat	pc	sl	TV	pc	hh-d	eat	eat	hh-k	ho	sl	eat	eat
56	Su.08.45		hh-o	cook	eat	hh-k	hh-k	pc	sl	TV	nh	hh-k	eat	eat	pc	cook	sl	eat	eat
57	Su.09		hh-o	hh-d	hh-k	hh-k	nh	nh	cook	TV	nh	read	eat	pc	pc	cook	pc	read	hh-t
58	Su.09.15		hh-o	hh-k	hh-be	hh-k	nh	nh	hh-d	TV	eat	read	eat	nr	nh	hh-d	nr	read	hh-t

Figuur 1: Voorbeeld van tijdbestedingsonderzoek data. In de kolommen hebben verschillende respondenten hun activiteit beschreven op een tijdschaal van een kwartier, gedurende een week.

De tijdsbesteding/activiteiten van de respondenten, zoals bijvoorbeeld gegeven in figuur 1 voor ouderen, kunnen worden vertaald in afwezigheid of aanwezigheid in een bepaald vertrek van de woning. De tijdsbesteding "sl" (slapen) wordt bijvoorbeeld gerelateerd aan aanwezigheid van de bewoner in de slaapkamer; de tijdsbesteding "cook" (eten bereiden) wordt bijvoorbeeld gerelateerd aan aanwezigheid van de bewoner in de keuken; etc.

In de vertaalslag van tijdsbesteding naar aanwezigheid/afwezigheid worden zes verschillende aanwezigheidstoestanden onderscheiden:

1. Slaapkamer
2. Badkamer
3. Keuken
4. Woonkamer
5. Overig
6. Niet thuis

B2.1 Markov-Chain Monte Carlo methode voor aanwezigheid van bewoners

Bij deze methode wordt de aanwezigheid van bewoners gedurende het jaar stochastisch gegenereerd. De aanwezigheid van bewoners wordt dan bepaald op basis van waarschijnlijkheden die gebaseerd zijn op de tijdsbesteding data. Soortgelijke methoden om aanwezigheid en energieverbruik te simuleren worden ook in de literatuur toegepast, zie bijv. [1], [2] en [3].

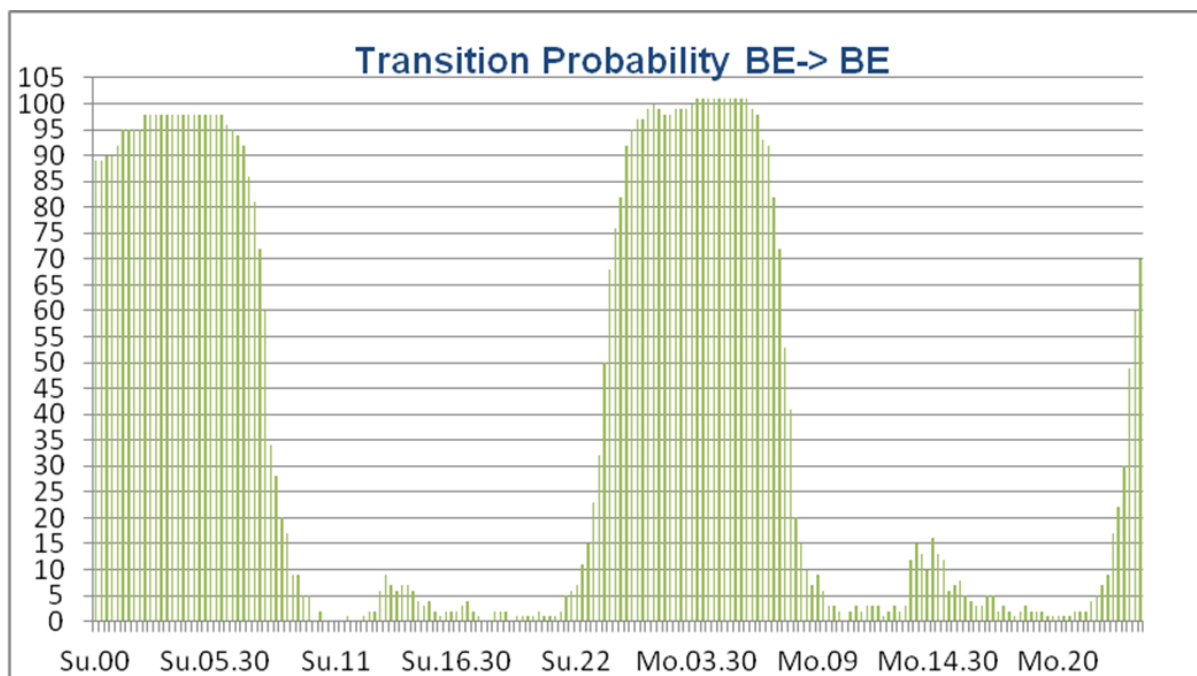
Gebaseerd op bovengenoemde tijdbestedingsonderzoek data zijn 6x6 matrices afgeleid, die de cumulatieve overgangswaarschijnlijkheden van de ene toestand naar de andere toestand bevatten, zie ook **Error! Reference source not found. 2.**

BE-BE	BE-BA	BE-KI	BE-LR	BE-OT	BE-NH
BA-BE	BA-BA	BA-KI	BA-LR	BA-OT	BA-NH
KI-BE	KI-BA	KI-KI	KI-LR	KI-OT	KI-NH
LR-BE	LR-BA	LR-KI	LR-LR	LR-OT	LR-NH
OT-BE	OT-BA	OT-KI	OT-LR	OT-OT	OT-NH
NH-BE	NH-BA	NH-KI	NH-LR	NH-OT	NH-NH

Figuur 2: Overgangsmatrix: de codes BE, BA, KI, LR, OT, NH corresponderen respectievelijk met slaapkamer, badkamer, keuken, woonkamer, overig en niet thuis.

Voor elk kwartier in een week is er een overgangsmatrix. In totaal zijn er $7 \cdot 24 \cdot 4 = 672$ overgangsmatrices (7 dagen, 24 uur, 4 kwartier). Voor elk kwartier in de week zijn de matrices in principe verschillend. Voor elk kwartier in de dynamische thermische simulatie wordt op een stochastische wijze de kans bepaald dat een bewoners zich van het ene vertrek naar het andere vertrek begeeft.

In figuur 3 wordt een voorbeeld gegeven van de waarden van het eerste matrixelement gedurende de tijd. Met andere woorden: de waarschijnlijkheid dat bewoners de volgende tijdstap in de slaapkamer blijven indien ze daar reeds aanwezig waren.



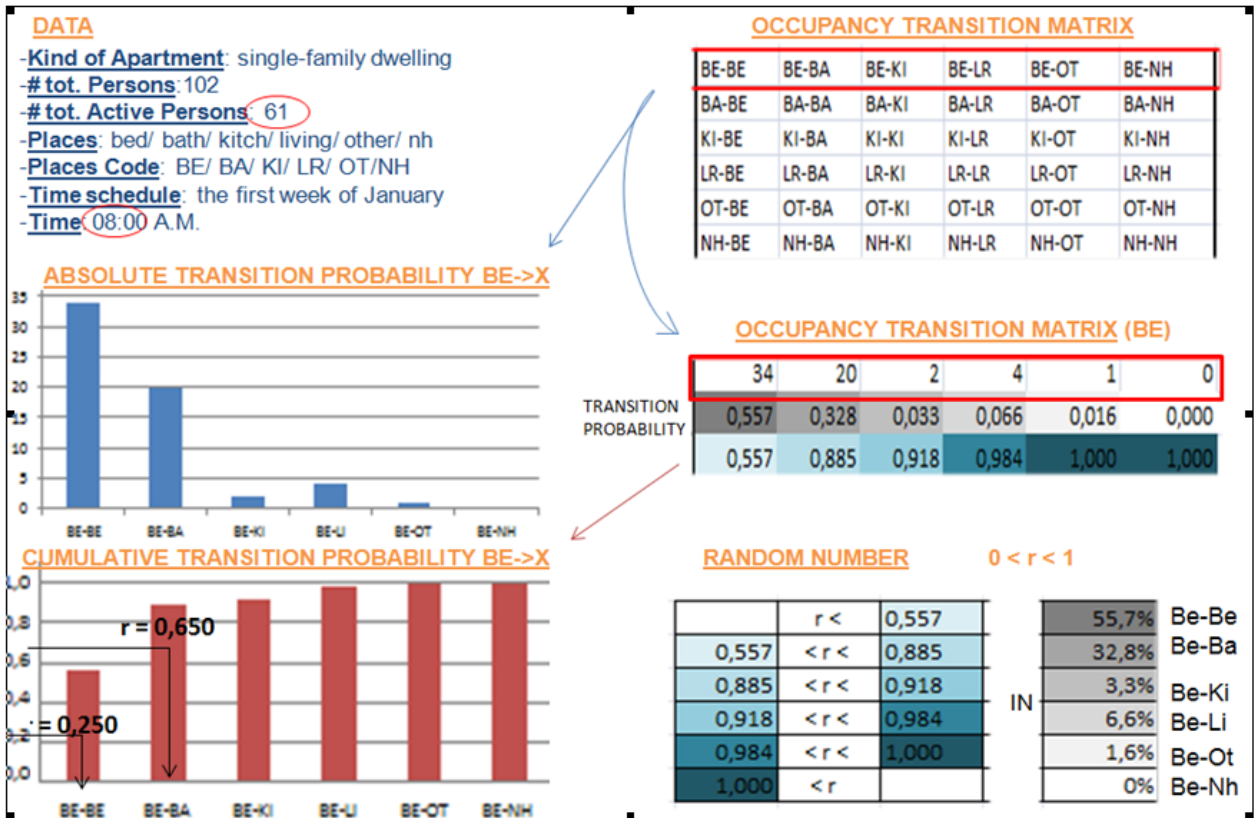
Figuur 3: Voorbeeld van waarschijnlijkheden gedurende de tijd, die de overgang beschrijven van slaapkamer naar slaapkamer, met andere woorden de waarschijnlijkheid dat de bewoner in de slaapkamer blijft indien hij daar aanwezig is.

Een schematische weergave van de Markov-Chain Monte Carlo methode om de aanwezigheid van personen en daarmee het energieverbruik voor ruimteverwarming op een stochastische wijze te

berekenen, wordt weergegeven in **Error! Reference source not found.** 4. De volgende stappen worden voor iedere bewoner voor iedere tijdstap in de simulatie doorlopen.

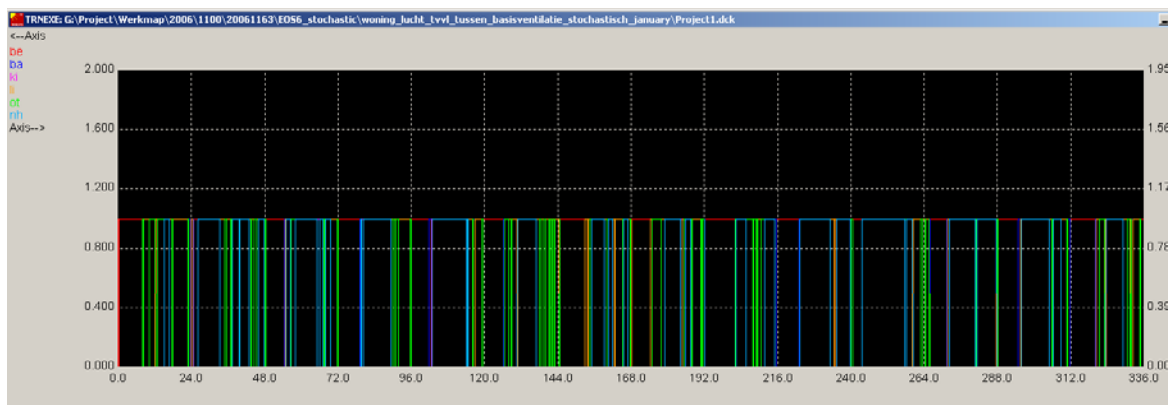
- De huidige aanwezigheidstoestand van een bewoner wordt bepaald (slaapkamer, badkamer, keuken, woonkamer, overig, niet thuis).
- Overgangswaarschijnlijkheden worden berekend op basis van tijdbestedingsdata.
- Een matrix met cumulatieve overgangswaarschijnlijkheden wordt opgesteld.
- Een willekeurig getal tussen 0 en 1 wordt gegenereerd.
- De nieuwe aanwezigheidstoestand wordt bepaald op basis van de oude aanwezigheidstoestand, het willekeurige getal en de matrix met cumulatieve overgangswaarschijnlijkheden.

Op deze manier kan een heel jaar gesimuleerd worden. Door deze simulatie vele malen te herhalen wordt een variatie in het jaarlijkse energieverbruik gevonden (als gevolg van variatie in aanwezigheid van bewoners).



Figuur 4: Schematisering van de Markov-Chain Monte Carlo gebruikt om aanwezigheid van bewoners en bijbehorende warmtevraag stochastisch te simuleren.

Figuur 5 laat een voorbeeld zien van een aanwezigheidspatroon voor ouderen, welke stochastisch is gegenereerd. In deze figuur is duidelijk te zien dat de aanwezigheid in een specifiek vertrek elke dag weer anders is.



Figuur 5: Aanwezigheidspatroon op basis van TBO data voor ouderen:stochastisch

B2.2 Monte Carlo simulatie van aanwezigheid van bewoners gebaseerd op profielen

Bij deze methode wordt de aanwezigheid van bewoners gedurende het jaar niet stochastisch gegenereerd, maar worden deterministische profielen doorgerekend. Voor elke jaar-berekening worden willekeurig deterministische aanwezigheidsprofielen gekozen voor de verschillende bewoners van de woning.

Methodiek

Tijdbestedingsonderzoek (TBO) data van het Sociaal Cultureel Planbureau zijn gebruikt om de aanwezigheid van personen in de woning te simuleren. Voor een periode van een week hebben respondenten al hun activiteiten in een dagboek opgeschreven met een tijdsresolutie van een kwartier.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	ID RP (SLEUTEL)	tbonr	100024	100033	100063	100123	100232	100429	100473	100483	100488	100598	100637	100659	100690	100715	100718	100721
2	Leeftijd RP	jaar	69	83	87	72	66	68	71	78	79	82	74	73	76	80	75	81
3	Gestacht RP	m/v	v	m	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	m	v
4	Plaats huishoude	hk/phk/k/o	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk	hk
20																		
21	Su.00		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
22	Su.00.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
23	Su.00.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
24	Su.00.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
25	Su.01		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
26	Su.01.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
27	Su.01.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
28	Su.01.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
29	Su.02		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
30	Su.02.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
31	Su.02.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
32	Su.02.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
33	Su.03		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
34	Su.03.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
35	Su.03.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
36	Su.03.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
37	Su.04		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
38	Su.04.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
39	Su.04.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
40	Su.04.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
41	Su.05		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
42	Su.05.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
43	Su.05.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
44	Su.05.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
45	Su.06		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
46	Su.06.15		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
47	Su.06.30		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
48	Su.06.45		sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
49	Su.07		sl	sl	sl	sl	pc	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
50	Su.07.15		sl	sl	sl	sl	pc	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl
51	Su.07.30		sl	sl	sl	sl	pc	sl	sl	pc	pc	cook	sl	sl	cook	sl	sl	sl
52	Su.07.45		sl	sl	pc	hh-d	pc	sl	sl	pc	eat	cook	sl	sl	cook	sl	sl	sl
53	Su.08		hh-o	pc	pc	cook	cook	pc	sl	eat	eat	sl-s	sl	eat	cook	pc	sl	pc
54	Su.08.15		hh-o	cook	hh-d	cook	eat	pc	sl	eat	eat	pc	sl	eat	hh-k	pc	sl	pc
55	Su.08.30		hh-o	cook	eat	hh-d	eat	pc	sl	TV	pc	hh-d	eat	eat	hh-k	ho	sl	eat
56	Su.08.45		hh-o	cook	eat	hh-k	hh-k	pc	sl	TV	nh	hh-k	eat	eat	pc	cook	sl	eat
57	Su.09		hh-o	hh-d	hh-k	hh-k	nh	nh	cook	TV	nh	read	eat	pc	pc	cook	pc	read
58	Su.09.15		hh-o	hh-k	hh-be	hh-k	nh	nh	hh-d	TV	eat	read	eat	nr	nh	hh-d	nr	read

Figuur 6: Voorbeeld van tijdbestedingsonderzoek data. In de kolommen hebben verschillende respondenten hun activiteit beschreven op een tijdschaal van een kwartier, gedurende een week.

De activiteiten van de respondenten, zoals bijvoorbeeld gegeven in **Error! Reference source not found.** kunnen worden vertaald in afwezigheid of aanwezigheid in een bepaald vertrek van de woning. In deze vertaalslag worden zes verschillende aanwezigheidsstoestanden onderscheiden:

1. Slaapkamer
2. Badkamer
3. Keuken
4. Woonkamer
5. Overig
6. Niet thuis

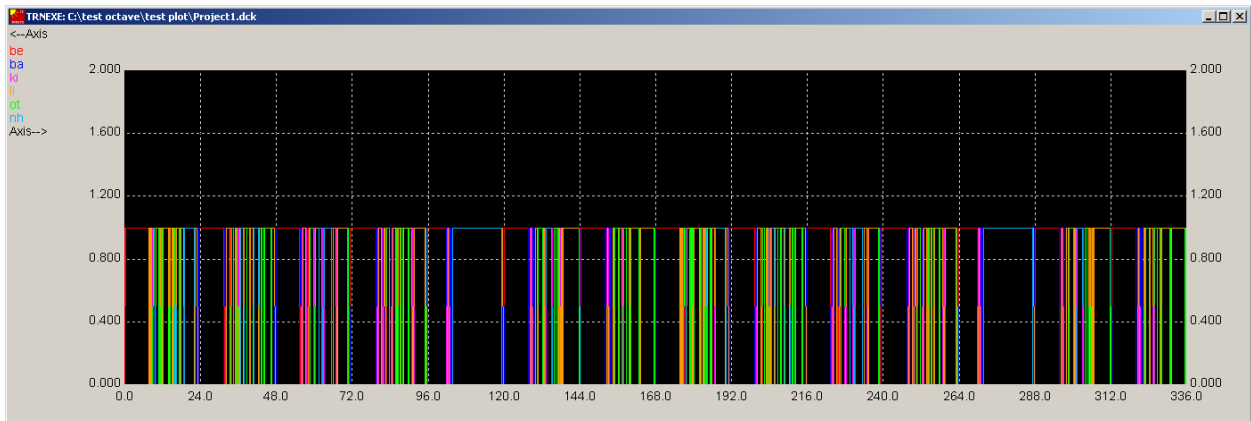
De volgende stappen worden in de Monte Carlo simulatie doorlopen.

- Deterministische aanwezigheidsprofielen van bewoners, die volgen uit de tijdbestedingsdata, worden willekeurig gesampled.
- Op basis van deze profielen wordt het jaarlijkse energieverbruik voor ruimteverwarming berekend .

Door deze simulatie vele malen te herhalen wordt een variatie in het jaarlijkse energieverbruik gevonden (als gevolg van variatie in aanwezigheid van bewoners).

Figuur 7 laat een voorbeeld zien van een aanwezigheidspatroon voor ouderen, welke deterministisch is gemodelleerd. In deze figuur is duidelijk te zien dat de aanwezigheid in een specifiek vertrek gedurende de dag en week varieert op basis van de tijdsbesteding van deze respondent, maar dat voor elke week gedurende het jaar hetzelfde aanwezigheidsprofiel gebruikt wordt.

In de Monte Carlo simulatie wordt voor elke jaar-berekening op een willekeurige wijze aanwezigheidsprofielen voor de bewoners, gebaseerd op de tijdsbestedingdata, gebruikt.

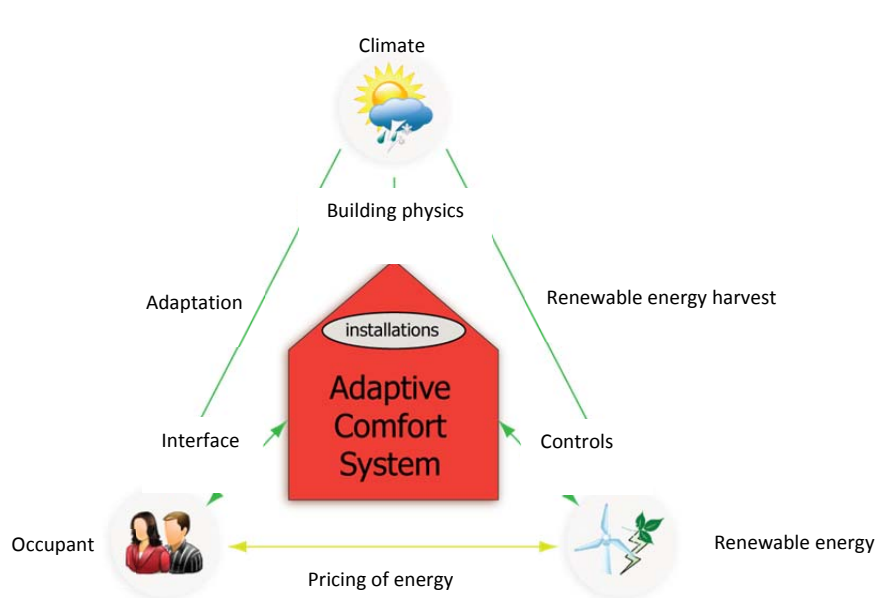


Figuur 7: Aanwezigheidspatroon op basis van TBO data voor ouderen:deterministisch profiel

Referenties

- [1] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, *A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations*, Energy and Buildings 40, 1560-1566, 2008.
- [2] J. Page, D. Robinson, N. Morel, J.-L. Scartezzini, *A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence*, Energy and Buildings 40, 83-98, 2008.
- [3] J. Widen, A.M. Nilsson, E. Wäckelgård, *A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand*, Energy and Buildings 41, 1001-1012, 2009.

The Adaptive Dwelling and the Adaptive Comfort System



De dissertatie van E.E. Alders zal eind 2012 worden afgerond. In deze bijlage wordt de inhoud en de algemene inleiding van de dissertatie gegeven. De deelresultaten van het onderzoek zijn verwerkt in de rapportage van WP3.

TABLE OF CONTENTS

1.	INTRODUCTION
1.1	Problem Definition
1.2	Research Design
2.	BACKGROUND / SCOPE
2.1	Introduction 19
2.2	Weather And The Thermal Environment
2.3	Thermo Regulation And Homeostasis
2.4	Energy
2.5	Comfort Supply (Systems)
3.	GAPS AND THESIS OUTLOOK; FROM STATIC TO DYNAMIC
3.1	Multidisciplinary Approach
3.2	Comfort As A Subjective And Dynamic Concept
3.3	Dynamics Of Weather
3.4	Dynamics In Energy Supply
3.5	Dynamic Buildings
3.6	Parallel Structure
4.	DYNAMIC PROPERTIES AND RELATIONS
4.1	Introduction
4.2	Patterns And Probability In Weather (Constraints)
4.3	User Profiles (Demand)
4.4	Energy And Exergy (Supply)
4.5	Conclusions
5.	REQUIRED PHYSICAL BEHAVIOUR FOR ADAPTIVE COMFORT SYSTEMS
5.1	Installation Types
5.2	Data
5.3	Model
5.4	Steps
6	VALIDATION
7	THE ADAPTIVE DWELLING (OPTIMIZING PASSIVE STRATEGIES)
7.1	Introduction
7.2	Space Design
7.3	Crbe
7.4	Dcads
7.5	Interfaces
7.6	Conclusions
8	DYNAMIC COMFORT DELIVERY SYSTEMS (MECHANICAL PART)
8.1	Introduction
8.2	Heating
8.3	Preventing Overheating (See Also Adaptive Dwelling Optimization)
8.4	Relation To Ventilation
8.5	Combination With Domestic Hot Water
8.6	Combination With Electricity
8.7	Conclusions
9	DISCUSSION / SWOT
10	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS
10.1	A Framework For Development Of An Adaptive Dwelling
10.2	Design Recommendations For Development Of An Adaptive Dwelling
10.3	Limitations Of An Adaptive Dwelling
10.4	Prospectus

B3.1 Problem definition

- **From shelter to comfort**

One of the basic necessities of life is shelter from the climate and other possible threats, to be able to develop all kinds of activities. In former times, man would cope with the ever changing weather conditions by its physiological reactions, like vasoconstriction or vasodilation and adapting activity to change the metabolism, and adaptive skills; man would use what nature provided to find shelter and the most appropriate environment for its various activities, like caves and trees. Later on in the evolution of mankind, he would create his own shelter, though at first merely to mitigate the swings of outdoor conditions.

the home evolved from mere shelter to a complexity of (separate) spaces, using all kinds of infrastructure for distribution and delivery of energy, water, food and waste, supporting the increasing life-standard. The dwellings, as the shelters are now called, contain spaces like a living room, a space for cooking, a space for sanitation and a space for sleeping. They are complemented with all kinds of amenities like a kitchen, toilet, shower or bath, (central) heating and sometimes cooling.

Around medieval times, when the word *comfort* (derived from the old French word *confort / cunfort*, meaning *support*) was first used in English in the eleventh century, it had a purely medical or nutritional connotation. *Discomfort* meant dirtiness, implying disrespect. Only in the nineteenth century, *physical comfort* gained its present denotation. The definition of comfort currently is, amongst other meanings, a state of physical and material well-being, with freedom from pain and trouble, and satisfaction of bodily needs. Nowadays, it is a sign of social progress and status (Crowley 2001). *Thermal comfort* expresses the state of satisfaction with the thermal environment; i.e. no need for change in the thermal environment (those aspects of the surrounding space that influence the heat balance of the body with the environment; temperature, relative humidity and air velocity).

The organization of spaces and their amenities (i.e. the delivery of thermal comfort) co-evolved with the advancing techniques and culture, making perception and realizations of thermal comfort highly dependent on culture, history, technique, social status, season and climate (Chappells and Shove 2003).

In this research, the whole of spaces, construction and amenities in a building, influencing energy consumption for comfort delivery, including domestic hot water and electricity, is defined as a *comfort system*.

- **Comfort as a social construct**

In this respect it is essential to (re)define thermal comfort and the circumstances and boundary conditions under which people experience comfort and well-being, optimizing conditions for health and personal development while limiting energy consumption. The thermal environment is defined by a number of physical parameters that determine heat content and heat exchange with objects or other environments. The most important parameters are air (ambient) temperature, radiative temperature, relative humidity and air velocity.

The first theory on predicting the thermal environment in which people feel comfortable to be applied worldwide was Fangers' physiological heat balance model of the human body, which calculates the

temperature of thermal equilibrium between body and environment. The formula uses the four environmental parameters mentioned above, together with clothing insulation and heat production resulting from the metabolic rate (Fanger 1970).

However, various studies point out that, besides with the physical parameters, the temperature of thermal comfort changes with adaptation; adjustment, acclimatization, habituation and expectation (De Dear, Brager et al. 1997; Chun and Tamura 1998; McCartney and Fergus Nicol 2002). A theory that does take this into account and is increasingly applied all over the world is the Adaptive Temperature Limits method. This approach regards thermal comfort as a result of physical, physiological and psychological aspects, both being dynamic (differing per day), thus rejecting a standard set point, like generated by the first theory. The factors beyond fundamental physics can include demographics (gender, age, economic status), context (building design, building function, season, climate, semantics, social conditioning), and perception (attitude, preference, and expectations). However, in the way they are applied now in the standards, they still regard average people and the same standards are too easily applied trans-regional.

In contrast to dwellings, in the office environment where the setpoint temperature often is to be controlled centrally, it is still useful to determine average comfort temperatures for the target group. In this way it is likely that, statistically, as many people as possible are satisfied, optimizing their productivity. However, in dwellings people are considered in charge of their own environment and they should be able to control their setpoint temperature individually. The dwelling and the comfort system should facilitate the occupant to create their own environment. Furthermore, various studies point out that thermal comfort is not related to only one fixed temperature or temperature range (Raja, Nicol et al. 2001; McCartney and Fergus Nicol 2002; Cole, Robinson et al. 2008). It is also not possible to calculate thermal comfort with a formula of only physical variables, like the ASHRAE definition already implicates: "thermal comfort is a state of satisfaction on the thermal environment". The main conclusions are that thermal comfort, like the demand for other types of comfort, is very personal and relative to time, place and situation. These aspects shift the question from an actual comfort temperature to a range of temperatures that should be avoided to ensure absence of discomfort likely to occur due to the thermal environment and the variability of this range as well as the constraints for other aspects that influence the perception of thermal comfort.

With regard to the design of comfort systems for dwellings, recent and on-going developments ask for certain new concepts in the residence sector. Most of all there is a need of concepts that facilitate adaptability to user specific demand in regard of:

- Changing use of the dwelling and its spaces.
- Individual differences in comfort experience.
- Individual differences in health sensitivity.
- Avoiding internal nuisance.

To use energy responsibly will be more and more important for all new concepts. It will be a challenge to use this adaptive approach to save energy while providing for the increasing demand for quality and individual preferences (BouwHulpGroep 2007).

- **Energy**

As civilization is advancing, the demand for thermal comfort is increasing, like is the case for any kind of comfort. Technically it is possible to provide any thermal environment requested, by using heaters and

air-conditioning units as well as artificial lights. However, the greater the difference between offered outdoor climate and requested indoor climate, the more energy is required to supply and maintain this climate.

Partly due to the development of advanced comfort systems, mankind is becoming more and more dependent on energy. Most of this energy is generated from combustion of fossil fuels, which causes problems like Global Warming and increasing political and economic tensions between oil delivering and oil dependent countries. Similarly to most of the developed countries, the Dutch government has started the Energy Transition (PeGO 2007) to come to an energy economy in the Netherlands with solely renewable energy resources (energy which comes from natural resources such as sunlight, wind, rain, tides, and geothermal heat, which are naturally replenished). To make this transition possible, the Energy Transition proposes three steps that should be taken in the following order (Trias Energetica) (Lysen 1996):

1. Reducing **energy demand** where possible
2. For the remaining demand, use as much energy from renewable resources as possible
3. Use fossil fuels efficiently, for the energy that cannot be delivered by sustainable resources.

These three steps are the same as Based on Duyvestein :

1. Prevent unnecessary use
2. Use infinite resources
3. Use finite sources intelligently

Although taking into account all types of energy consuming comfort (thermal comfort, domestic hot water and power), the focus of this thesis is on thermal comfort, the satisfaction with the thermal environment. However, thermal comfort delivery systems (can) make use of the same resources as domestic hot water (e.g. hot water for heating) and power (e.g. electricity for fans, pumps and control systems). Therefore, it is sensible to consider combinations of thermal comfort systems with domestic hot water delivery and power supply.

To reduce energy demand for energy consuming comfort, it is important to know when, where and at which level comfort is needed, so no more energy than needed will be used, making optimal use of renewable resources.

- **The Adaptive Dwelling and the Adaptive Comfort System**

To make dwellings which facilitate individual needs and control, in an energy efficient way, robust to various weather situations as well as different use patterns and different preferences of people, the concept of an **Adaptive Dwelling** is introduced (by DEPW and refined in this PhD research):

An **Adaptive Dwelling** with an **Adaptive Comfort System** is a dwelling in which the whole of passive and active comfort components **dynamically adapts** its settings to the **varying** of **user comfort demands** and the **weather conditions** - seasonal, diurnal and hourly (depending on the aspects adapted), thus providing comfort **only where, when and at the level needed** by the user, while **harvesting the naturally delivered energy** when available and storing it when abundant (DEPW 2006).

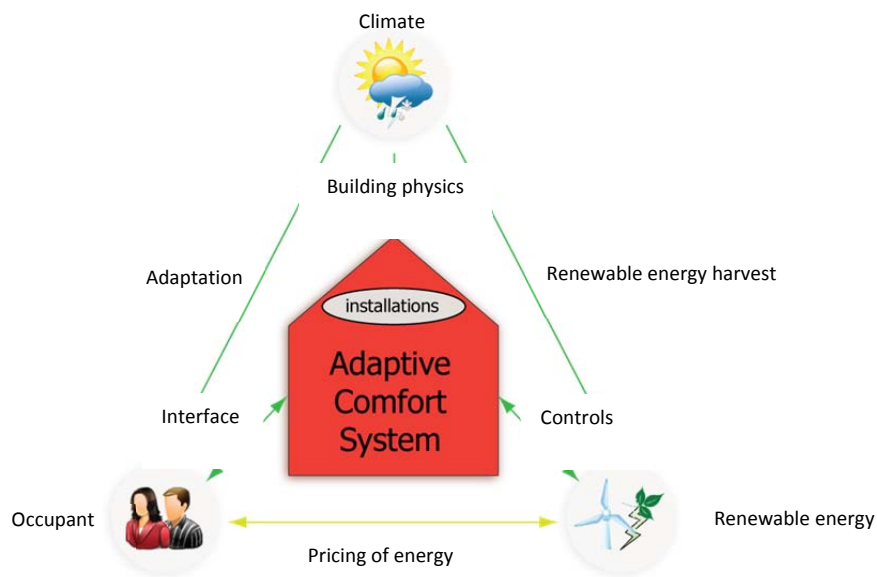


Figure 1: The Adaptive Dwelling and the Adaptive Comfort System

B3.2 Research design

The Adaptive Comfort System in dwellings can provide comfort for the increasing standard of living, while saving energy compared to the current systems. However, to make the adaptive dwelling possible, information is missing about various patterns and deviations of weather as well as the users, which is essential to develop an Adaptive Dwelling with the Adaptive Comfort System. For analysis of the weather, extensive databases are available on the internet. In contrast, for the relation of thermal comfort with personal background and individual differences in sensitivity and preferences there are many gaps in the knowledge as well as different opinions (Fanger, de Dear, and lack in comfort surveys in various countries). The data as well as the interpretation is very scattered amongst different detailed studies and disciplines and above all not integrated.

- Purpose statement

The aim of this thesis is to implement a new interdisciplinary approach; to translate thermal comfort studies performed in office buildings to residential buildings, taking into account the different kind of activities employed and individual preferences and schedules people may have, developing concepts of amenities that enable people to create their own thermal environment within certain bandwidths based on energy saving and common needs. It employs building physics, physiology and socio-psychology, attempting to consider all aspects that define thermal comfort and wellbeing, to be able to create new ways of delivering thermal comfort that connect with the development in the residential sector in an energy efficient way.

- Research questions

Main question

What is the range and diversity of thermal comfort demand that can be expected and what are the most appropriate ways of delivering this thermal comfort in an energy efficient way without compromising the feeling of homeliness?

Sub questions

- *What individual spatial and temporal patterns of activity and presence can be recognized of various types of households and what are the probability and deviation of these activities and presence?*
- *What aspects of individual preferences and behaviour influence energy use in an adaptive dwelling (most)?*
- *What are the recognizable patterns in weather and what are probable step changes to account for?*
- *What constraints do these patterns and variations pose on the comfort delivery systems?*
- *Do dynamic building characteristics like insolation, ventilation, insulation and thermal mass have a significant potential of saving energy in a dwelling?*
- *What characteristics of mechanical building systems are most applicable for the widest range in user profiles?*

- **Results**

This research focuses on mapping the information about patterns and probabilities, making clear the crucial characteristics of the adaptive system and components. It develops a method of formulating different realistic occupant profiles for Dutch dwellings, based on a combination of different comfort theories and statistical analysis of time use surveys and demographics. With this determination, boundary conditions will be put forward to provide thermal comfort in a new way, adaptive and dynamic to user, weather and the availability of renewable energy resources.

The pragmatic results of the research are new strategies for dynamic and adaptive comfort delivery in the home, giving guidelines for development of components and systems. An important aspect to consider is to integrate the system and controls in the daily environment of people without compromising their feeling of a home to retreat and relax.

Guidelines will be given as for what techniques to use in what kind of dwelling. This is especially useful for existing dwellings.

Prospect:

New prototypes developed according to the concepts can be tested and the concept can be validated. This will give more insight in the way people react to adaptive and dynamic comfort delivery. More insight can be gained about the social importance and influence of comfort delivery systems on daily activity and wellbeing of people.

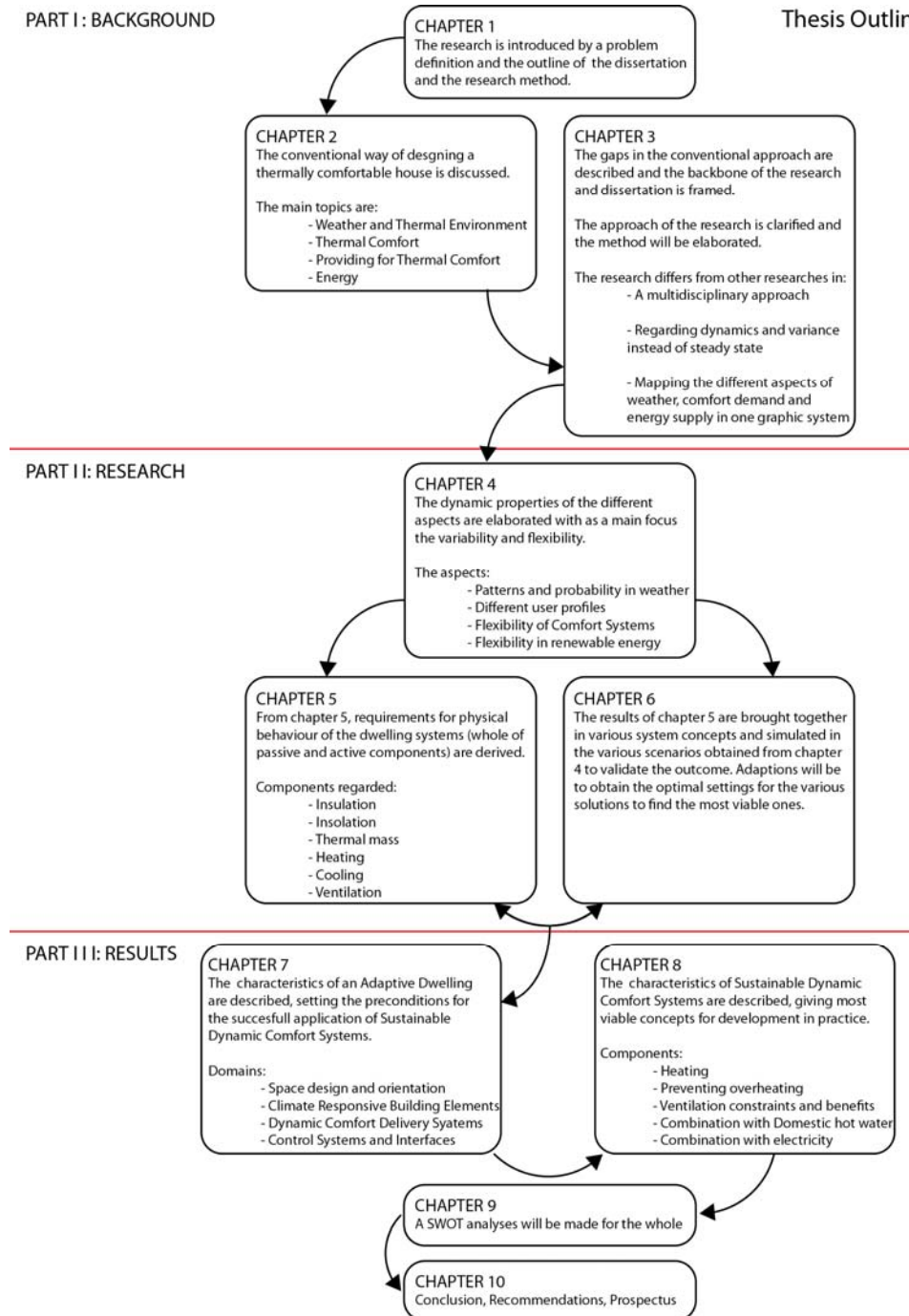


Figure 2: Dissertation Layout

References

- American Society of Heating, R. a. A.-C. E., Inc. (ASHRAE) (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy. 55. ASHRAE, ASHRAE.
- Bordass, B. and A. Leaman (2007). Controls For End Users, BCIA.
- BouwhulpGroep (2007). Duurzaam Bouwen, Werken en Wonen Na 2015 - WP 0. Duurzaam Bouwen, Werken en Wonen Na 2015. Eindhoven, Bouwhulp Groep: 52.
- Brager, G. S., G. Paliaga, et al. (2004). Operable Windows, Personal Control and Occupant Comfort, eScholarship Repository.
- Cen (2007). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- Chappells, H. and E. Shove (2003). "The environment and the home." Draft paper for the Environment and Human Behaviour Seminar.
- Chun, C. Y. and A. Tamura (1998). "Thermal environment and human responses in underground shopping malls vs department stores in Japan." Building and Environment 33(2-3): 151-158.
- Cole, R. J., J. Robinson, et al. (2008). "Re-contextualizing the notion of comfort." Building Research & Information 36(4): 323 - 336.
- Crowley, J. E. (2001). The Invention of Comfort: Sensibilities and Design in Early Modern Britain and Early America.
- Davis, F. D. (1989). "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology." MIS Quarterly: Management Information Systems 13(3): 319-339.
- de Dear, R. (2009). "The theory of thermal comfort in naturally ventilated indoor environments - "The pleasure principle"." International Journal of Ventilation 8(3): 243-250.
- De Dear, R. J., G. Brager, et al. (1997). Developing an adaptive model of the thermal comfort and preference. Final Report ASHRAE RP-884.
- DEPW (2006). Modelprojectplan EOS; Duurzame Projectontwikkeling Gebaseerd op Duurzaam Bouwen, Renoveren en Wonen na 2015.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort; analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen, Danish Technical Press.
- Haldi, F. and D. Robinson "On the unification of thermal perception and adaptive actions." Building and Environment.
- Healy, S. (2008). "Air-conditioning and the "homogenization" of people and built environments." Building Research & Information 36(4): 312 - 322.
- Heschong, L. (1979). Thermal Delight in Architecture.
- Hitchings, R. (2009). "Studying thermal comfort in context." Building Research & Information 37(1): 89 - 94.
- Kingma, B., A. Frijns, et al. (In preparation). "Thermoregulation during mild temperature changes: The effect of age."
- Lysen, E. H. (1996). The Trias Energica; Solar Energy Strategies for Developing Countries. Eurosun Conference. Freiburg, Germany.
- McCartney, K. J. and J. Fergus Nicol (2002). "Developing an adaptive control algorithm for Europe." Energy and Buildings 34(6): 623-635.
- Mendell, M. J., Q. Lei-Gomez, et al. (2008). "Risk factors in heating, ventilating, and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: The US EPA BASE study." Indoor Air 18(4): 301-316.

- Peeters, L., R. d. Dear, et al. (2008). "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation." Applied Energy **In Press, Corrected Proof**.
- Peeters, L., R. d. Dear, et al. (2009). "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation." Applied Energy **86**(5): 772-780.
- PeGO (2007). EnergieTransitie-Plan PeGO. Boxtel, Aeneas.
- Raja, I. A., J. F. Nicol, et al. (2001). "Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings." Energy and Buildings **33**(3): 235-244.
- Schellen, L., W. D. van Marken Lichtenbelt, et al. (2010). "Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition." Indoor Air **20**(4): 273-283.
- Stemers, K. and M. A. Steane (2004). Environmental Diversity in Architecture.
- Ubbelohde, M. S., G. M. Loisos, et al. (2003). Comfort Reports, California Energy Commission.

B3.3 Background / Scope

This chapter discusses the current approach to delivering thermal comfort in Dutch dwellings and more broadly in the developed world in general. The three main factors/boundary conditions that determine the comfort demand and delivery as well as energy consumption for thermal comfort will be discussed and lastly the building and its installation that act as a conversion filter to provide the indoor climate from the three factors; weather, user comfort demand, energy.

The main topics are:

- Comfort systems in buildings
 - Conventional
 - Energy efficient design
 - Vernacular design
 - Bio-climatic design
- Thermal Comfort
 - The invention of comfort
 - Bio climatic research (Olgyay, Givoni etc.)
 - Climate chamber research (Fanger)
 - The adaptive comfort model
 - Thermal comfort as a social construct
 - Thermal comfort in the building context
- Weather and Thermal Environment
 - Meteorology
 - Energy balance of the earth
 - Climatic global system
 - Solar radiation
 - Temperature
 - Wind
 - Precipitation
 - Climate classification
 - Building for “filtering” the outside climate conditions
- Energy
 - Generation
 - Storage
 - Energy in the built environment

To compare, various strategies for providing comfort and energy efficiency in buildings are described; conventional buildings and installations, vernacular architecture and passive solar design solutions will be explained to clarify how weather and comfort can be treated in the built environment. Vernacular as well as various passive solar techniques have been developed over the course of thousands of years to meet regional needs for shelter and have co-evolved with culture and society. Such measures cannot be translated literally into modern architecture, but can contain important lessons to be learnt. More recent techniques for utilizing natural energy are discussed as well and their applicability.

In addition, current methods of assessing building energy performance and comfort performance are illustrated, with their advantages and shortcomings.

B3.4 Introduction

During the industrial revolution and into the information era, the design of a building is increasingly made without thinking too much about the influence of the building design on the relation between outdoor climate and indoor climate. Emerging techniques to condition spaces with installations and control mechanisms allows the indoor environment to be increasingly disconnected to the outdoor strain. If a space becomes too cold or too hot there are mechanical means to restore the environment to the desired conditions. It gives the architects more freedom in their design, having to consider fewer constraints. These notions led, and still does, to extending globalisation of architecture during the previous and current century, disregarding regional differences in weather conditions. Buildings everywhere in the world increasingly look the same, applying large proportions of glass.

However, the use of mechanical means consumes materials and energy, which to increase with the difference in temperature between outdoor and indoor that needs to be resolved and decreases with the efficiency of the system (Healy 2008). Furthermore, there is a growing amount of evidence that the drastic disconnection of the human from the outside world can lead to tremendous stress to human beings, for their evolutionary abilities to sense and react on changing outdoor conditions are denied and circadian rhythms can be disturbed and the use of mechanical means to condition air can inflict health problems caused by poor air quality, because of unknown or undiagnosed processes (Mendell, Lei-Gomez et al. 2008).

As is the case in most developed countries, in the Dutch construction practice a design is made by an architect without too much concern about the influence of the design on the indoor climate. Normally building physicists and mechanical engineers are involved only later on in the design process, when the spatial design and the method for the building shell are already determined. They are hired to ensure the proper techniques are installed and enough insulation is applied according to legislation and enough ventilation capacity is present for health and energy efficiency. However much can be gained from "optimizing" the spatial design and the building shell before actual materialization. Furthermore, the legislation consists of a set of constraints and calculation methods that, in the case of the thermal environment, basically are set up to reduce energy consumption solely, almost neglecting the important factor of health and comfort, reducing this to mere minimum values.

Concerning indoor air quality for instance, there is a minimum amount of ventilation required to ensure healthy circumstances. This minimum is based on pollution caused by average occupation (CO₂ and moisture) and doesn't ensure this to be sufficient in every case (although it might intend this). Furthermore, it doesn't say anything about chemical pollutants, either produced outside or inside as well as by the system itself. At the same time, for energy saving purposes, this minimum is often also regarded to be the maximum installed. Even though in normal occupancy this might be sufficient, during low occupancy it is possible to decrease it for energy saving purposes and during high occupancy it should be possible to raise the capacity.

In the case of regulations for daylight, a minimum daylight factor is required, which is a measure of percentage of total available daylight that can penetrate the individual rooms through windows. However, this standard doesn't take into account the horizontal orientation of the window and obstructions from adjacent properties, seasonal variations or trees and other vegetation, for the simple reason that these aspects are hard to describe in legislation. However, these aspects have a large impact on reality.

Moreover, for thermal comfort there are hardly any requirements. To check energy efficiency merely a fixed temperature is taken to compare one system with another, disregarding the fact that varying demand can influence the energy efficiency of the systems to a large extent.

In order to assess and compare various solutions on energy efficiency, building simulations are carried out with a numerical model. In the Dutch case, for dwellings this is the program EPW, certified by the Dutch government for legislation purposes. The boundary surfaces of the building are inputted and given properties like insulation level, transparency and orientation. As most programs, this program uses average occupation profiles, simplified to one average indoor temperature and average outdoor conditions. For the purpose of comparison this might be a good approach although it doesn't say anything about the performance in cases of deflection of the average (which cases are far more likely than the occurrence of an average case). Some solutions might not perform well with average occupation, but be optimal for the situation they are intended to. In the conventional simulations, the building itself is regarded as a static filter for the influence of the weather on the indoor climate and energy is used by the

installations to restore the indoor climate to static set points (sometimes with night setback) for comfort. Furthermore the occupancy and use of the dwelling are averaged and not influencing the building shell and the systems significantly. The availability of energy is considered to be constant, sometimes first gained from readily available renewable resources.

B3.5 Weather and the Thermal Environment

In this section, the basic knowledge of the climatic aspects are briefly described separately, but more important, the coherence and the influence on people and their functioning as well as comfort perception.

Nowadays in architecture and construction of most buildings, the climate is seen as a burden, something to be kept out to influence the inside climate as little as possible, to be able to condition the indoor environment as we wish. To do so, buildings are literally sealed off from the outside world like a thermos by (intentionally) airtight buildings, with very high insulation. However, there are some influences that are wanted to enter the buildings, like daylight and sunlight and fresh air. By admitting daylight into the building, it automatically allows heat into the building at the same time. In addition, people and appliances indoor produce heat, moisture and pollutants as well that need to be discarded. This can be done by ventilation, introducing fresh outdoor air inside. However, this means interference with outdoor temperature as well, cooling down the indoor air in winter and heating it in summer. To restore the heat balance, energy needs to be added to obtain the desired indoor climate, like air-conditioning or heating. The conventional design of a building for thermal comfort will take into account average weather conditions, occupants and, (if making use of renewable resources), average yield and efficiency of the systems. For dimensioning the systems, design temperatures are considered; the temperature that a system is designed to maintain (inside) or operate against (outside) under the most extreme conditions. For example for heating in a Dutch winter, a situation of -10 °C outside to an inside temperature of approximately 20 °C is considered. Afterwards, if the preliminary design is completed, calculations are made to assess the buildings energy use and indoor climate by means of software for certification of the design. Furthermore, simulations with a computer program can be made, although rarely applied in standard practice. For this purpose data files are used, that contain hourly weather data, either synthetically compiled by a weather generator, or compiled by measured data for one specific year or a combination of representative months.

Solar Radiation

Sunlight, in the broad sense, is the total frequency spectrum of electromagnetic radiation emitted by the Sun. On Earth, sunlight is filtered through the Earth's atmosphere, and solar radiation is obvious as daylight when the Sun is above the horizon.

The shape and movements of the earth are responsible for the differential radiation according to latitude and season. The energy is continuously absorbed, transformed, redistributed, dissipated and renewed. Geographical factors like albedo (reflectance) influence further radiation budgets.

When the direct solar radiation is not blocked by clouds, it is experienced as sunshine, a combination of bright light and radiant heat. The World Meteorological Organization uses the term "sunshine duration" to mean the cumulative time during which an area receives direct irradiance from the Sun of at least 120 watts per square meter.[1]

Part of the solar radiation is reflected by clouds or absorbed by the atmospheric air. Another part of the radiation is scattered by the molecules in the air, of which some reaches the earth's surface as diffuse radiation.

Temperature (heat)

A fraction of the solar radiation that reaches the earth's surface is reflected back into the atmosphere but most of it is absorbed, which causes the substrate to warm up. The air in the atmosphere is in its turn heated by the earth's surface by convection, long wave radiation (infrared) and conduction. Greenhouse

gasses in the atmosphere reflect the infrared radiation back to the earth, keeping most of the long wave radiation trapped in the atmosphere. This causes the air temperature in the atmosphere to be higher than it would be without an atmosphere, enabling life as we know it.

Because of the differential radiation budget in time and space, also differences in temperature occur, in latitude, time and earth-surface type. Different climatic zones (§ 2.2.6) exist as well as seasonal and diurnal variation (§ 2.2.7).

In a building for instance, the short wavelengths of visible light from the sun pass through a transparent medium (like glass) and are absorbed, but the longer wavelengths of the infrared re-radiation from the heated objects are unable to pass through that medium. The trapping of the long wavelength radiation leads to more heating and a higher resultant temperature. This effect is called the greenhouse effect. A special case of the greenhouse effect is that of the trapping of excess heat by the rising concentration of carbon dioxide in the atmosphere.

Wind

Wind is air movement on a large scale, displacement of air and with it its temperatures and composition. Wind on a local scale is driven by atmospheric phenomena and mechanisms over the whole earth. The main driving force is local temperature differences; from high temperatures (high pressure) to lower temperatures (low pressure). The existence of two sources of cold causes the atmosphere to be symmetrically divided between two meteorological hemispheres. Within each of these hemispheres circulation moves towards the meteorological equator (which lies in the middle of the central focus of warmth) and is redirected out towards the sources of cold. Seasonal variation (small within the reservoir of warmth but great within the cold sources) brings about major modification in the characteristics of each meteorological hemisphere, and a migration of the meteorological equator.

In the Northern hemisphere wind from the North carries cold(er) air and wind from the South brings in warm(er) air. The convective heat flow caused by wind has a big influence on the ambient air temperature.

Furthermore, strong winds can have an influence on the building, by cooling it down faster by convective heat, but also it has to be taken into account with designing the ventilation systems. Furthermore, wind can cause the outside of the building shell to deteriorate faster.

Humidity and precipitation

The atmospheric air contains a certain amount of water vapour. The hotter the air, the more water it can contain. The amount of water vapour in the air is expressed in terms of relative humidity. The relative humidity of an air-water mixture is defined as the ratio of the partial pressure of water vapour in the mixture to the saturated vapour pressure of water at a prescribed temperature. Relative humidity is normally expressed as a percentage. If warm air rises, the total amount of water that the air can contain decreases but the total amount of water stays the same. All the excess water that the air contains, will condensate and fall down due to gravity. This is called precipitation. There are four forms of precipitation; snow and hail (when the air temperature is below zero), rain and if the water doesn't fall down it will manifest itself as fog.

Climate zones and patterns

In the past paragraphs, the main meteorological variables are described. At any given moment these variables appear in combination in interactive cycles. For a specific place on earth, the regular macro patterns during a year are considered as the climate. In all these different climates, also a diurnal temperature cycle is recognizable, with lower temperatures during the night caused by the absence of solar radiation and higher temperatures in the afternoon.

As discussed in the former paragraphs, because of the movement of the earth and sun, the angle of incidence varies at any given location. The path the sun describes as seen from the earth is called the “sunpath” and resembles a tilted arc. The horizontal angle of the sun makes opposed to a certain point (azimuth) describes the same circle every day. However, if the sun can be seen at a given point in time, depends on the vertical angle of the sun (zenith). If the zenithal angle is below 0 degrees, the sun cannot be seen and thus it is night. The maximum zenithal angle is every day at 12 o’ clock local sun time (a 24 hours day). The maximum angle depends on the time of year and latitude (Figure 3).

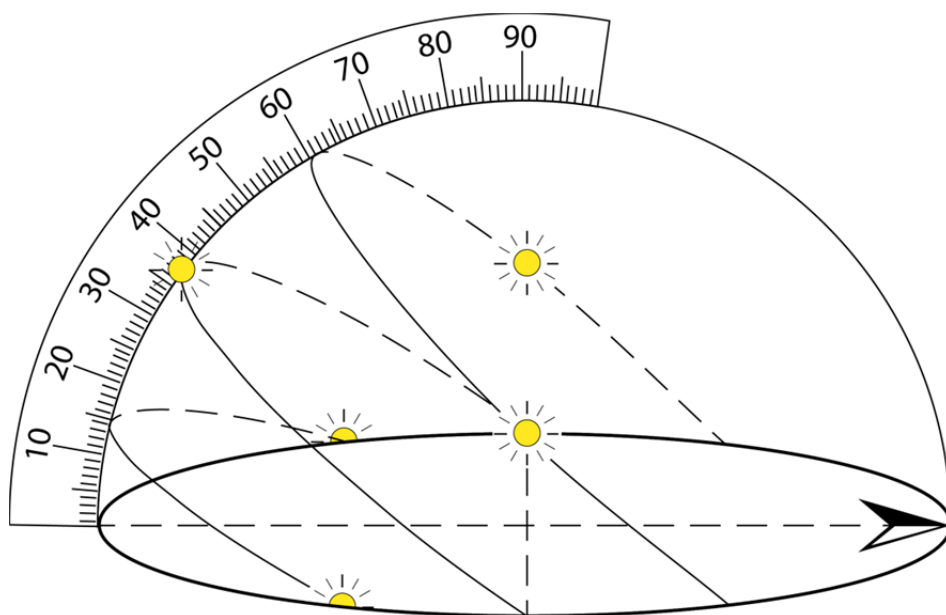


Figure 3: Stereographic Solar Path Diagram for the Netherlands

The Dutch situation

Bounding at the Northsea, the Netherlands has a maritime climate, with cool summers and mild winters. The weather is very variable and rainfall occurs frequently throughout the year, however only 7% of the time there is a form of precipitation. Clouds generally appear every day. The average temperature is 2° C in January and 17° C in July, with an annual average of about 10° C. Clouds generally appear every day, and in the winter months fog often abounds, while rainfall occurs frequently. Average annual rainfall is about 76.5 cm.

The use of climate data for building design

At best, the design of dwellings is nowadays made to benefit from the climate. Elements to be considered include window placement and glazing type, thermal insulation, thermal mass, and shading, but also ventilation openings and shelter from prevailing wind directions and precipitation. However, this is hardly common practice and most designs are an altered form of standard design, not specifically made for climatic reasons. Moreover, the solutions applied are optimized to average circumstances and take into

account average weather, course of daily temperature and seasonal swings. However, in the Dutch climate, like stated above, large short term swings in weather can occur. Together with varying occupancy it can be very useful to research the possibilities to benefit from the variable weather, rather than to keep it out.

To test a proof of principle, some designs are calculated with simulation programs. For this purpose data files are used, that contain hourly weather data, either synthetically compiled by a weather generator, or compiled by measured data for one specific year or a combination of representative months. The computer program uses this detailed information, but after the simulation, the data obtained is analysed at yearly energy use and the yearly amount of hours that the temperatures in an dwelling exceeds a predetermined temperature limit.

BIJLAGE 4 PAPER SASBE 2009

Analyzing Comfort System Energy Balances in Time, Place and Level in Adaptive Dwellings

In Preparation for an Energy Organizer

Ir. E.E. (Noortje) Alders¹, prof. J.J.M. Cauberg², M. Sinval³

1. PhD Researcher, Climate Design (Comfort), e.e.alders@tudelft.nl
2. Supervisor, Climate Design, h.cauberg@chri.nl
3. Msc Student, Climate Design, miguel.sinval@gmail.com

Climate Design Group; Faculty of Architecture; Delft University of Technology; PO Box 5043; 2600 GA Delft; The Netherlands

Theme: Sustainable Design; Smart and Bioclimatic Architecture

Abstract

Saving energy in the built environment is one of the most important issues when dealing with sustainability. Because people spend most of their time in dwellings, much can be gained by saving energy in the operation phase of houses. A lot of strategies for saving energy in a dwelling have been developed as well as many ways to calculate the expected energy consumption on a yearly basis. However, the energy consumption depends on numerous spatial and temporal factors. In calculating on a yearly basis the interrelations of the separate effects in time and space are missed, while especially these interrelations can be very important to implement renewable energy sources together with storage and buffering, thus reducing energy demand generated from fossil fuel.

An energy managing system like an Energy Organizer (EO) in combination with storage capacity can tune demand and supply with this information and store energy when abundant and use the storage for supply when a scarcity of energy occurs. This systems needs information to predict future energy demand in order to make decisions for managing energy supply and demand.

In the scope of this paper an analysis will be conducted on hourly values, where all factors will be related to predict the impact of each factor and their interrelations which will be visualized by means of a mathematical formula to predict future energy demand as a function of a number of factors. A number of TRNSYS simulations will be made in which these factors are present and by means of a Multiple Linear Regression (MLR) and Genetic Algorithm (GA) specially designed for these purposes mathematical formulas will be created which relate the studied factors with each other and the energy use.

The results of the analysis described in the paper are a representation of the progressions made of the research until November 2008 and will provide more insight in both the effects of the separate factors and on the possibility of using a GA as an analysis method. This method is compared to the method of MLR. The results will be used for studies on the EO.

Although the method of MLR seems to be appropriate for this purpose, the method of GA gives more accurate results because it has the possibility to generate non-linear functions. The method of the GA could be a promising method for generating predicting formulas for energy demand. However one

has to take great care using it. One has to know enough about the process regarded for this method is more suitable to quantify relations that are already known. Furthermore a MLR preceding the GA could help speeding up the process, for one already has a direction for the formula. In both the methods one should carefully select the variables and constants. In the future more research will be performed to improve the method of the GA. A future step will be gathering information about time and duration of the energy demand. Together with forecasting information of meteorological stations and user profiles one could predict energy demand per day.

Introduction

In global Energy Consumption, the share of buildings and especially dwellings in operation represents an important part. Therefore the energy saving potential in dwellings is significant. There are many solutions and possibilities to reduce energy demand in buildings, many of them being already commonly applied in new buildings and installed into existing buildings.

To save energy and thus prevent further global warming, the Dutch governmental institution SenterNovem introduced the term trias energetica (Lysen, 1996) which refers to a three step plan for companies, households and government to become climate-neutral.

The steps are:

1. Reducing energy demand where possible
2. For the remaining demand use as much energy from sustainable resources as possible
3. Use fossil fuels efficiently and wise, for the energy that cannot be delivered by sustainable resources.

Nowadays energy generation and delivery for dwellings is regarded as a simple process. However, the energy consumption depends on numerous spatial and temporal factors (fig. 1). This misconception results in mainly three missed opportunities for synchronization which could lead to significant energy saving:

Synchronization of Energy levels:

Electricity and gas are primary energy suppliers that deliver a high constant quality level of energy. Synchronizing these levels with the varying level of demand is nowadays realized by conversion leading to efficiency losses (e.g. conversion of electricity from alternating current (AC) to direct current (DC) by means of an adapter).

Combining different energy functions where possible:

Energy generation and delivery for different functions like cooling, heating, domestic hot water and work should be combined where possible. Nowadays only supply of domestic hot water is combined with heating and heat recovery is only used for ventilation air and sometimes from the shower drain.

Mediation between energy demand and supply:

To use renewable energy the comfort system has to have a certain level of flexibility and storage capacity for renewable energy will be provided at varying levels and amounts at varying time not always being in tune with the demand.

In this paper preparations for the Energy Organizer (EO) will be described. This is a central energy and comfort control system in a dwelling that manages all incoming and outgoing energy flows, tuning demand and supply. To do so, the system must monitor energy supply and storage capacity and energy demand in amount (J), time (hh:mm) and duration (hh:mm) and level (exergy). The EO

presumes an adaptive dwelling in which comfort delivery is adapted to the user and his behaviour, thus providing comfort only where and when needed by the user.

For the EO to be beneficial for energy saving purposes future information has to be available to be able to adapt energy use to expected demand and supply. It will be possible to predict energy need at various time intervals by means of a model that describes thermal behaviour of the building regarding energy weather as well as forecast information from meteorological institutes and expectations of occupancy and user behaviour. To avoid time consuming simulations in practice, a simple mathematical formula can be generated that describes the comfort energy behaviour of a specific building regarding weather and comfort demand. A method will be described to obtain such a formula by means of Multiple Linear Regression (MLR) and a Genetic Algorithm (GA).

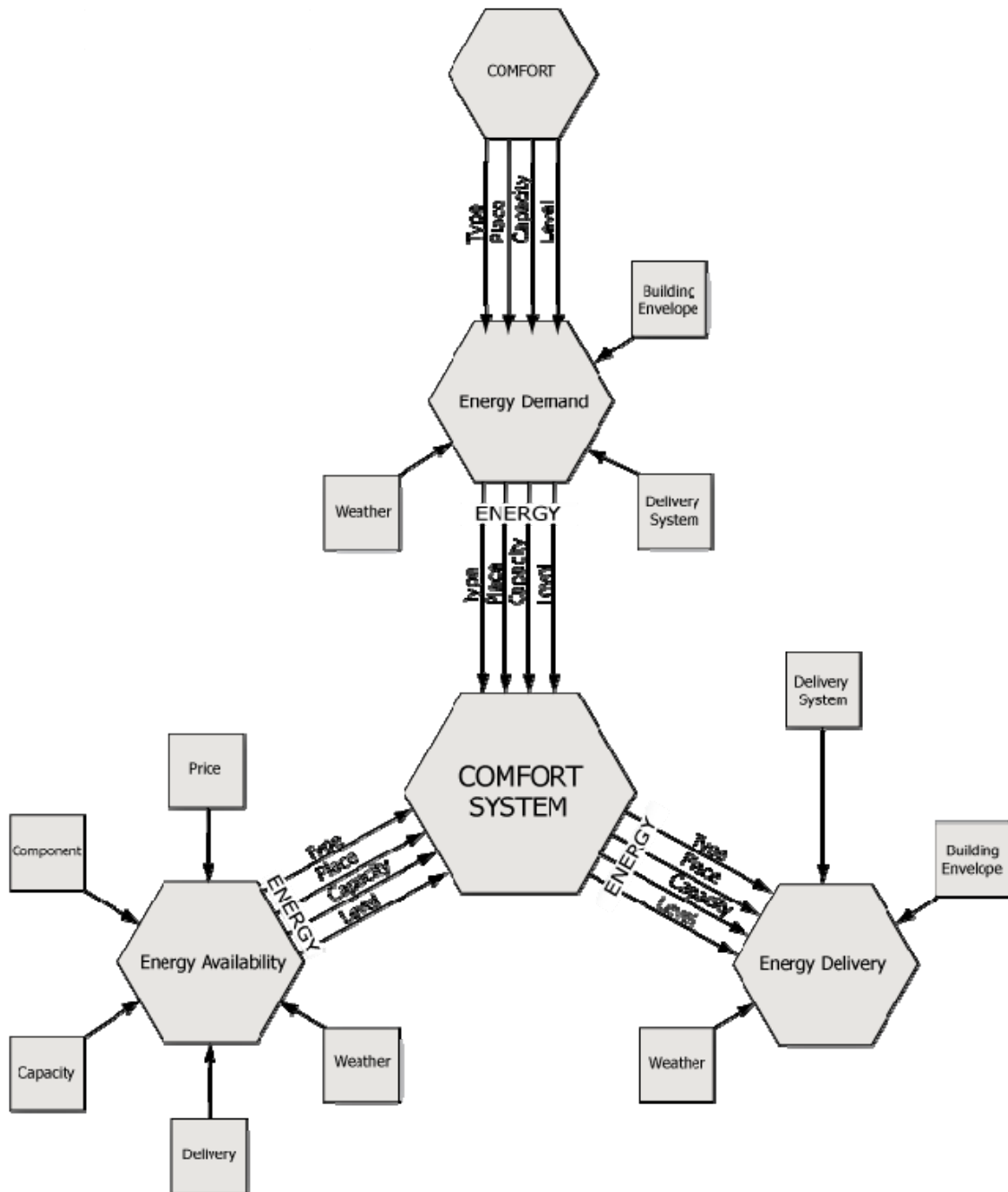


Figure 1: Considered variables and their interrelations

MLR is Multiple linear regression attempts to model the relationship between two or more explanatory variables and a response variable by fitting a linear equation to observed data. Every value of the independent variable x is associated with a value of the dependent variable y .

A GA is a search technique used in computing to find exact or approximate solutions to optimization and search problems (Mitchell, 1996). GA's are categorized as global search heuristics and they are a particular class of evolutionary algorithms (also known as evolutionary computation) that use techniques inspired by evolutionary biology such as inheritance, mutation, selection, and crossover (also called recombination).

The EO will provide a solution for the above mentioned opportunities to be seized, thus potentially save a significant amount of energy.

Method

In the prospect of this paper only the energy demand will be regarded. However energy supply and storage can be analyzed in the same way. To retrieve the chronological information about energy demand in past, present and future needed for an Energy Organizer, a simplified and building specific mathematical formula will be developed to avoid time consuming building simulations in practice. This formula or set of rules can quickly process available information to provide necessary information for the system.

To define the mathematical rules for predicting energy demand, measurements or simulations will be carried out to detect and validate correlations and patterns between the different variables of the problem. Various rules will be generated and tested until a satisfactory rule is achieved to describe the interrelations. The subsequent steps are followed:

- gather observable and measurable data (e.g. TRNSYS results)
- define a testing hypothesis/theory (generating a mathematical rule)
- experiment the theory and retrieve results from it (apply rule)
- compare results given by the theory with the gathered data (test rule's accuracy)
- communicate conclusions or reformulate theory (use rule or test another one)

Because of the complexity of the specific problem a Genetic Algorithm (GA) was designed to follow the steps

described, as many times needed, until the results are satisfactory. A GA is a search technique used in computing to

find exact or approximate solutions to optimization and search problems. In this specific case a mathematical set of

rules is searched to be able to define energy demand with as little as possible information.

The Genetic Algorithm designed for this purpose uses TRNSYS building simulation results to relate various

factors that influence energy consumption in a specific and predefined building model. It could also use measured

data if present. TRNSYS is a validated TRAnSient SYstem Simulation program. It is based on a modular structure and it was designed to calculate thermal energy balances on an hourly basis. In TRNSYS16 (version 16 of the software), users are presented with a variety of predefined components, each one representing a specific device, (physical) phenomenon or defined rule. With a graphical interface, the

user can insert, modify and assemble many components defining the mode of connection to each other. For every component, calculations are performed sequentially in an iterative way to retrieve data values. The iterations are executed at each time step. The time step is defined by the user, being usually an hour. When performing a simulation, at each iteration step, the previous values calculated are used as input for the following calculations, thus making it a transient program. This will result in a series of values

distributed in time. This data set can be plotted and analyzed by the GA.

To save processing time a general mathematical formula should be created that defines the interrelations of

the variables. To design the basic formula one should roughly know what influence the factor has on the value to be

calculated. The interrelations will then be quantified by the GA.

The general function to be generated by the GA is:

$$Y_{GA} = c + \sum f_i \cdot v_i^{e_i} + \varepsilon$$

In which:

Y_{GA} = Independent variable

c = constant

f_i = factor (or coefficient) for variable i

v_i = independent variable i

e_i = exponent for variable i

ε = error

In this paper the following interrelations will be quantified:

Y_{GA} Q_{demand} = hourly energy demand for heating [kJ]

v_i v_{dT} = temperature difference between inside and outside ($T_{setp} - T_{out}$) [°K]

v_R = solar radiation [kJ/h]

First a Multiple Linear regression is performed to direct the Genetic Algorithm, saving some processing time and to be able to make some presumptions for the GA.

The following presumptions are made:

The higher v_{dT} the higher Q_{demand} \longrightarrow $+(f_{dT} \cdot v_{dT}^{edT})$

The higher v_R the lower Q_{demand} \longrightarrow $-(f_R \cdot v_R^{eR})$

This generates the following mathematical formula:

$$Q_{demand} = c + (f_{dT} \cdot v_{dT}^{edT}) - (f_R \cdot v_R^{eR}) + \varepsilon$$

Results and Discussion

For this paper a simulation has been performed with a reference apartment dwelling published by SenterNovem (DGMR 2006). The formula to be generated is for hourly heating demand. In the calculation the shading effect of the galleries and the balconies are neglected. For the set point temperature a value of 20 °C has been chosen. The simulation is made for a whole civil year and the data this produced was filtered for the hours where there was no heating demand. For the cooling demand a separate simulation can be made, with separate formula.

The result of the Multiple Linear Regression is the following formula (results: figure 2):

$$Q_{\text{demand}} = -2354,1 + 449,9 \cdot v_{dT}^1 - 2,061 \cdot v_R^1 + \varepsilon$$

With a standard error of 1729,3 kJ/h

From the Multiple Regression becomes clear that the radiation term is negative (the more solar radiation, the less demand) and that the constant should be negative as well. This means that if the outside temperature is 20 °C ($v_{dT} = 0$) and there is no radiation, there will be some energy gain. This could be from buffering in the building.

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0,887560323							
R Square	0,787763327							
Adjusted R Square	0,787654432							
Standard Error	1142,397292							
Observations	3901							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	2	18882152199	9441076100	7234,14432	0			
Residual	3898	5087168987	1305071,572					
Total	3900	23969321187						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	-2354,061042	71,10237948	-33,10804869	4,8497E-212	-2493,462426	-2214,659658	-2493,462426	-2214,659658
Radiation	-2,061402395	0,066009791	-31,22873703	2,8202E-191	-2,190819389	-1,931985401	-2,190819389	-1,931985401
dT	449,857308	4,104366456	109,6045669	0	441,8103991	457,9042168	441,8103991	457,9042168

Figure 2: Summary Output MLR

The results from the MLR are now inputted in the GA (figure 3).

In the left column of the GA the parameters for the operation of the Genetic Algorithm are given. One can determine things like how many data is present, how many variables should be considered and the method of crossover. The next column shows the input for the range of the variables. Followed by the decoder, that shows the generated factors per variable of the best solution found until now. The middle column is the heart of the Genetic Algorithm and shows the generated solutions, coded in DNA. Per run they are given a fitness (that represents the fitness to calculate energy demand with the given variables) calculated by the least squares method and they are sorted from best fitness (lowest value) to worst. The best solution found in the GA altogether is plotted in the top row, together with its fitness and sum of squares of the residual and the mean square root. In the summary output of the MLR there are respectively represented by SS residual and R square. In the GA the data table is sorted by the Q_{demand} output of TRNSYS. In this way it becomes visible that the formula is more reliable the higher the demand gets. This suggests that a certain exponent not being 1 would be realistic.

Parameters		Variable definition				Decoder		44991020611023541 8,48E+02 55--100711110,678 R2 = 0,73062			
Input data		sign	Factor int. siz	Factor dec. siz	Exponent	factors	exponents	Population	Fitness	Cross %	Cumul. %
no. variables	2	1	3	1	1	449,9	1	44991020611023541	7,05E+03	23%	100%
data table size	3901	-1	1	3	1	2,061	1	97723212210751748	9,39E+06	11%	77%
GA calibration		-1	4	1		2354,1		65084085062872925	2,48E+08	8%	66%
population size	25							97680298672972079	4,61E+08	8%	58%
elitism no.	1							53105800512722741	1,37E+10	6%	50%
new immigrants	2							31485252953520296	1,74E+10	6%	43%
crossover type	interlaced							08694761593789775	7,87E+10	6%	37%
crossover ratio	80%							56096852371925264	3,27E+11	5%	31%
mutation ratio	10%							82078575280929083	1,04E+14	4%	26%
mutation decay ratio	20%							39361214285332634	1,68E+15	3%	23%
GA interface								65264469125358839	8,14E+15	3%	20%
screen updating	1							89639969702794416	1,03E+16	3%	17%
maximum generations	100							57458184685418585	2,05E+16	3%	14%
fitness stopping criteria	0							15304118355758286	3,88E+16	3%	11%
sounds	new plot							36396372116308967	1,18E+19	2%	9%
solution storage	last pop.							65575631856526727	2,24E+19	2%	7%

Figure 3a: Output GA with regression results

Parameters		Variable definition				Decoder		84990840610823541 9,33E+02 55--765027997,852 R2 = 0,48385			
Input data		sign	Factor int. siz	Factor dec. siz	Exponent	factors	exponents	Population	Fitness	Cross %	Cumul. %
no. variables	2	1	3	1	1	849,9	0,8	84990840610823541	7,05E+03	23%	100%
data table size	3901	-1	1	3	1	4,061	0,8	97723212210751748	9,39E+06	11%	77%
GA calibration		-1	4	1		2354,1		65084085062872925	2,48E+08	8%	66%
population size	25							97680298672972079	4,61E+08	8%	58%
elitism no.	1							53105800512722741	1,37E+10	6%	50%
new immigrants	2							31485252953520296	1,74E+10	6%	43%
crossover type	interlaced							08694761593789775	7,87E+10	6%	37%
crossover ratio	80%							56096852371925264	3,27E+11	5%	31%
mutation ratio	10%							82078575280929083	1,04E+14	4%	26%
mutation decay ratio	20%							39361214285332634	1,68E+15	3%	23%
GA interface								65264469125358839	8,14E+15	3%	20%
screen updating	1							89639969702794416	1,03E+16	3%	17%
maximum generations	250							57458184685418585	2,05E+16	3%	14%
fitness stopping criteria	0							15304118355758286	3,88E+16	3%	11%
sounds	new plot							36396372116308967	1,18E+19	2%	9%
solution storage	last pop.							65575631856526727	2,24E+19	2%	7%

Figure 3b: Output GA after manipulation of exponents

Parameters		Variable definition				Decoder		64980988890826121 8,02E+02 55--100711110,678 R2 = 0,70793			
Input data		sign	Factor int. siz	Factor dec. siz	Exponent	factors	exponents	Population	Fitness	Cross %	Cumul. %
no. variables	2	1	3	1	1	649,8	0,9	64980988890826121	8,02E+02	7%	100%
data table size	3901	-1	1	3	1	8,889	0,8	64980988890826121	8,02E+02	7%	93%
GA calibration		-1	4	1		2612,1		64980988890826121	8,02E+02	8%	86%
population size	25							94280948890829067	3,78E+03	6%	78%
elitism no.	1							94950948890824067	4,36E+03	6%	72%
new immigrants	2							97950948870329067	4,41E+03	6%	68%
crossover type	interlaced							97950948870329067	4,41E+03	6%	60%
crossover ratio	80%							97960948870329064	4,41E+03	6%	55%
mutation ratio	10%							94750388840822187	5,07E+03	6%	49%
mutation decay ratio	20%							51571417740798591	1,17E+04	5%	43%
GA interface								51571417740798591	1,18E+04	5%	38%
screen updating	1							51531417530794591	1,21E+04	5%	32%
maximum generations	250							51531617540798521	3,17E+04	5%	27%
fitness stopping criteria	0							51571817740794591	6,81E+04	4%	22%
sounds	new plot							51571817740794591	6,81E+04	4%	18%
solution storage	last pop.							51501917990270161	9,80E+04	4%	14%

Figure 3b: Output GA after optimizing

However when running the Genetic Algorithm, results are only slightly getting better. In some cases at very small deviations of solar radiation and temperature difference, the difference in demand is much higher (Figure 4). This suggests that there is some intervening variable(s) influencing demand. This might be because of the orientation of the sun. The variable radiation is representing the value of solar radiation per square meter on the horizontal plane. This does not take into account the azimuth angle. The horizontal plane is taken because there is more than one orientation for the external walls, so there is not 1 value for radiation per square meter of facade. To take this into account one has to calculate the total amount of radiation on the total of facades. This could be a future improvement. Another point of attention with this specific run is that it isn't a transient calculation but a steady state that doesn't take into account the values of one time step before, therefore neglecting the influence of buffering. This former value could easily be implemented as another variable in the formula. To minimize the error in both the analyses, one has to rule out as much intervening variables as possible. That means including these variables in the analyses or keeping them constant in the simulation.

Conclusion

Both MLR as well as GA are reliable ways to generate a predictive formula for energy demand in a certain range (from 1000 kJ/h). Furthermore the variables in simulations as well as the analyses should be carefully chosen. For now the advantage of the GA seems quite small. The advantage of the possibility of implementing an exponent gets stuck at not knowing what the exponent should be. It will take more runs to find the best combination of factors and exponents. Another advantage of the Genetic Algorithm is that the results are better to monitor than the MLR of Microsoft Excel because the data-table can be seen along with the percentage of accuracy of the generated formula at that given simulation hour. In this way, one can detect where the formula is most and least reliable. These two advantages could be explored if the GA would be more designed to be able to monitor and manipulate than it is now. By detecting the "problem areas" the GA can be manipulated in a directed way. In the future these possibilities will be explored further. In order to be able to compare the results of the MLR and the GA better, these should be more similar than they are now. In this way the MLR can also be used to monitor and manipulate the GA to get more reliable results.

0755509044850941054				8,44E+02	55% - 55000000,00%	R2 = 0,77189	%acc	Best results	TRNSYS results	Variable1	Variable2
Population	Fitness	Cross %	Cumul. %								
0755509044850941054	8,44E+02	6%	100%	77,7%	755,510,914,48510,914105,4	Qdemand	dT	Radiation			
0752609044730941051	8,45E+02	6%	94%	29%	1066	313	16	1838			
0752609044750941054	8,45E+02	6%	87%	87%	2185	1896	18	1798			
0752609044750742054	8,39E+02	6%	75%	2%	-898,40	19,29	11,78	1764,00			
0449910020671023541	8,43E+02	6%	81%	39%	566	218	14	1746			
0752609044750742054	8,39E+02	6%	75%	48%	866	420	15	1746			
0722609044750946054	1,19E+03	6%	69%	18%	-1259	228	11	1724			
0594709025730731021	1,21E+03	6%	63%	2%	1082,56	23,91	15,35	1706,40			
0752609244750941054	2,06E+03	5%	57%	4%	-622,35	25,34	12,05	1695,60			
0752609244750941054	2,06E+03	5%	52%	8%	-507,85	41,76	12,06	1638,00			
0752609044750211024	3,44E+03	5%	47%	26%	-303,52	78,95	12,44	1638,00			
0756607044750941074	3,84E+03	5%	42%	59%	468	790	14	1634			
0752607044750941070	3,87E+03	5%	37%	20%	1053	216	15	1616			
0752609444750911054	4,25E+03	5%	32%	60%	718	427	14	1562			
1358603074280541022	5,71E+03	5%	27%	67%	2005	1343	16	1501			
1356603074780541072	5,72E+03	5%	23%	57%	776	446	14	1476			
5751709244750441054	6,16E+04	4%	18%	41%	639	1548	14	1469			

Figure 4: Showing discrepancies in formula

Another point of improvement will be the fact that the simulations done at this moment are to predict hourly values. In the future, simulations and runs will be made for predicting daily demand based on weather forecast. These will contain information like minimum temperature, maximum temperature which is typical forecast information one will be able to obtain from meteorological

stations for 5 days in advance. The seasonal values can be acquired, with certain inaccuracy, from information of former years and trends. This information can be used for controlling seasonal storage.

This specific MLR and GA where run on the total energy consumption of a dwelling. Possibly the analyses will be more reliable when performing this for a single room, having less different orientation and therefore a simpler way of calculating total radiation.

A future step will be gathering information about time and duration of the energy demand. This will be pictured by generating energy profiles which can be compared to see where the scarcities and abundances take place. A system like an Energy Organizer (EO) in combination with storage capacity can tune demand and supply with this information and store energy when abundant and use the storage for supply when a scarcity of energy occurs.

References:

- DGMR, B. B. (2006) Brochure Referentiewoningen Nieuwbouw. IN VROM Ed. Sittard, SenterNovem.
- LYSEN, E. H. (1996) The Trias Energica; Solar Energy Strategies for Developing Countries. Eurosun Conference. Freiburg, Germany.
- MITCHELL, M. (1996) An introduction to genetic algorithms, Cambridge, Mass., MIT Press.