



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Duurzame Comfortinstallaties Achtergronden en uitgangspunten voor ontwerp

Duurzame comfortinstallaties EOS-LT DP 2015

Datum 2015

Noortje (ir. E.E.) Aalbers, ing. S.R. Kurvers, drs. J.L. Leijten,
ir. A.K. Raue, R. Looman, Klimaatontwerp TU Delft
Bouwkunde. H. Polinder, Cauberg-Huygen Raadgevende
Ingenieurs B.V., Sabine Jansen, Klimaatontwerp TU-Delft/BK

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

Publicatienr RVO-149-1501/RP-DUZA
www.rvo.nl

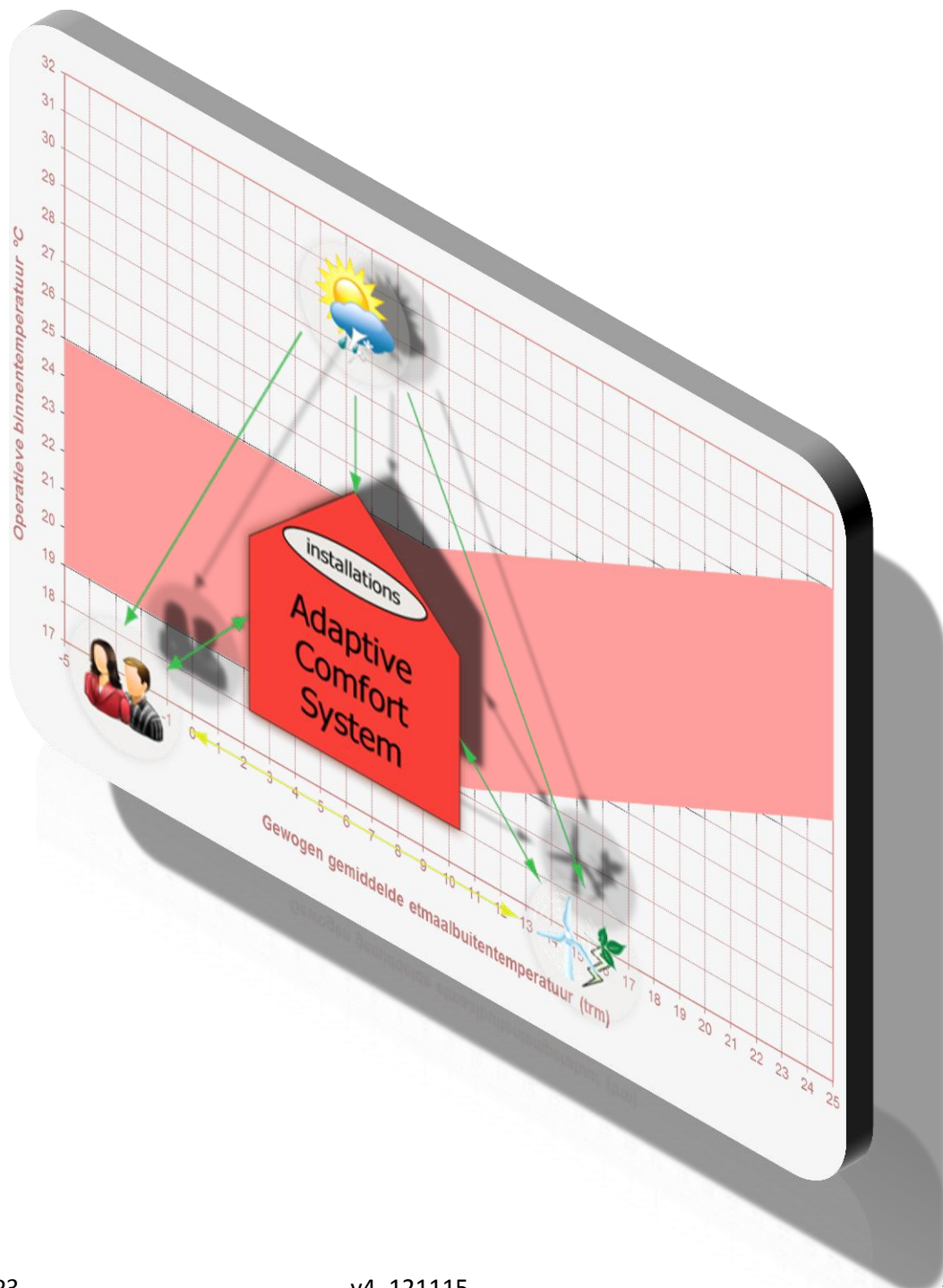
Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Economische Zaken.

EOS Duurzame Projectontwikkeling na 2015

Werkpakket 3: Duurzame Comfortinstallaties; Achtergronden en uitgangspunten voor ontwerp

Werkpakket leider: TU-Delft

Uitvoerenden: TU-Delft, Cauberg-Huygen



Inhoud

Verantwoording	5
1 Inleiding.....	6
2 Doelstelling.....	8
3 Aanpak.....	10
3.1 Werkwijze.....	10
3.2 Werkpakketten.....	11
3.3 Leeswijzer.....	13
4 Nieuwe inzichten in thermisch comfort.....	14
4.1 Inleiding.....	14
4.2 Samenvatting conclusies literatuurstudie.....	14
4.3 Richtlijnen comforttemperatuur.....	16
4.3.1 Free Running.....	17
4.3.2 Toelichting comforttemperatuur.....	18
4.3.3 Interpretatie temperatuuroverschrijdingsberekeningen	19
4.4 Beïnvloeding van temperatuur	19
4.4.1 Toelichting beïnvloeding temperatuur.....	19
4.5 Temperatuurvariatie	20
4.5.1 Temperatuurvariatie binnen een dag.....	20
4.5.2 Temperatuurvariatie tussen twee opeenvolgende dagen	20
4.5.3 Toelichting temperatuurvariatie	20
4.6 Literatuur.....	21
5 Uitgangspunten voor duurzame comfort installaties	22
5.1 Gebruikersgedrag in woningen	22
5.1.1 Bezetting en aanwezigheid.....	22
5.1.2 Temperatuurpreferenties.....	24
5.1.3 Gebruikersprofielen.....	26
5.2 Dynamische eigenschappen van het weer.....	28
5.2.1 Klimaataanbodprofielen	28
5.3 Algemene strategieën voor verwarmen en (preventief passief) koelen.	31
5.3.1 Het stookseizoen, tussenseizoen en zomerseizoen.	31
5.3.2 Dynamisch-thermisch gedrag van gebouwen.	31
5.3.3 Het zomerseizoen.....	32
5.3.4 Het stookseizoen	33
5.3.5 Het tussenseizoen.....	35
5.4 Comfortgrenzen algemeen.....	35
5.4.1 Woonvertrekken.....	36
5.4.2 Slaapkamers.....	37
5.4.3 Badkamers	38
5.5 Ventilatie	39
5.6 Profielen.....	40

5.7	Exergetische analyse	40
5.7.1	Definities en begrippen bij exergieanalyse.....	40
6	Interactie klimaat en gebouw – klimaatactieve ontwerpstrategie	43
6.1	Ontwerpstrategie	43
6.2	Inleiding.....	43
6.3	Klimaatactieve ontwerpstrategie	44
6.3.1	Analyse.....	44
6.3.2	Conceptontwikkeling	47
6.3.3	Beoordeling	50
6.3.4	Selectie	50
6.4	Illustratie van de ontwerpstrategie in de praktijk.....	50
6.4.1	Uitgangspunten	51
6.4.2	Resultaten.....	53
7	Gebruikersinteractie en regeltechnische componenten	57
7.1	Introductie: De noodzaak van sturing.....	57
7.2	Programma van eisen voor regelingen	57
7.2.1	Adaptatie	57
7.2.2	Bruikbaarheid	58
7.2.3	Regel parameters.....	59
7.3	Responsive Building Elements.....	60
8	Simulatieberekeningen	62
8.1	Methodiek	62
8.1.1	Te onderzoeken woningconcepten	62
8.2	Optimale energievraag: 1 ^e -orde modelbenadering	64
8.2.1	Beschrijving 1 ^e -orde model.....	64
8.2.2	Analyses van de energievraag	67
8.2.3	Conclusies 1e orde model benadering	72
8.3	Analyse energievraag met geavanceerde dynamische simulaties.....	73
8.3.1	Inleiding	73
8.3.2	Beschrijving van de woning	74
8.3.3	Energiebehoefte voor ruimteverwarming.....	75
8.3.4	Energievraag.....	82
8.3.5	Aanwezigheid bewoners.....	83
8.3.6	Woningen vanaf 2015.....	84
8.3.7	Renovatie van bestaande woningen	90
8.4	Energieaanbod	91
8.4.1	Kenmerken van zonnecollector	92
8.4.2	Aandeel in ruimteverwarming geleverd door de zonnecollector	93
8.4.3	Afhankelijkheid van collectoroppervlak	93
8.4.4	Afhankelijkheid van de hellingshoek.....	94
8.5	Exergetische analyse	96
8.5.1	Achtergrond en uitgangspunten	96
8.5.2	Wat is de exergie van de vraag?.....	96
8.5.3	Exergetisch geoptimaliseerd vraagprofiel over de dag	98

8.5.4	Exergetisch geoptimaliseerde warmteopslagstrategie – maandopslag.....	100
8.6	Samenvatting resultaten simulatieberekeningen	101
9	Conclusies en aanbevelingen	105
9.1	Richtlijnen voor duurzame comfortinstallaties na 2015	105
9.1.1	Richtlijnen uit oogpunt van thermisch comfort	105
9.1.2	Vraagsturing ventilatie en verwarming	107
9.1.3	Responsive Building –elements	107
9.1.4	Intelligente en gebruikersvriendelijke regelsystemen	107
9.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	108
	Referenties	109

BIJLAGEN

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

Verantwoording

De rapportage van dit werkpakket is voor een groot deel gebaseerd op het promotie-onderzoek van Noortje (ir. E.E.) Alders.

Verder zijn bijdragen geleverd door de volgende personen en instanties:

Hoofdstuk 4 over Thermisch comfort is geschreven door ing. S.R. Kurvers met bijdragen van drs. J.L. Leijten, ir. A.K. Raue en ir. E.E. Alders van de sectie Klimaatontwerp TU Delft Bouwkunde.

De ontwerprichtlijnen in hoofdstuk 6 zijn opgesteld door ir. Remco Looman, gebaseerd op zijn promotieonderzoek naar Climate Responsive Building Elements. Klimaatontwerp TU-Delft/BK.

De dynamische simulatieberekeningen in hoofdstuk 7 zijn uitgevoerd door Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs BV, dr. H. Polinder.

De exergetische analyse uit hoofdstuk 7 is uitgevoerd door ir. Sabine Jansen in het kader van haar promotieonderzoek naar Exergieanalyse in de gebouwde omgeving. Klimaatontwerp TU-Delft/BK.

1 Inleiding

De energieconcepten van woningen over de laatste 10 jaar zijn op zich verbeterd. Dit heeft echter niet geleid tot ingrijpende aanpassingen van woning- en installatieconcepten. De concepten van de woningen inclusief de installaties zijn in hun geheel vergelijkbaar met 10 jaar terug, dat wil zeggen, het overgrote deel van de woningen heeft een cv-ketel met radiatoren en een goed geïsoleerde buitenschil. Alleen qua ventilatie heeft een duidelijke verschuiving plaatsgevonden van traditionele natuurlijke toevoer/mechanische afzuiging naar gebalanceerde ventilatie met HR-wtw. Dit heeft geleid van een marktpenetratie in de nieuwbouw van minder dan 1% in 1995 naar 50% in 2003. Tegelijkertijd is het aantal klachten sterk toegenomen en heeft dit geleid tot een sterke vraag naar alternatieven (zoals hybride vraaggestuurde ventilatie). Echter voor alle overige aspecten hebben ontwikkelingen zich vooral op componentniveau afgespeeld. Een probleem hierbij is dat er in feite geen *systemontwikkeling* heeft plaatsgevonden en dat men uitsluitend is blijven steken in verbetering van componenten.

Daarnaast is bij de Projectgroep DE duidelijk geworden dat binnen de bestaande concepten het zeer lastig is om duurzame energie een plaats te geven en op rationele wijze te integreren.

Om duurzame energie maar ook hoogefficiënte opwekking en afgifte van energie daadwerkelijk toe te passen zijn ingrijpende wijzigingen in woningconcepten noodzakelijk. Tegelijkertijd kan niet meer volstaan worden om klimatisering voor een gedeelte van het jaar te beschouwen (d.w.z. alleen het stookseizoen). Toename van thermische isolatie, ventilatie met HR-wtw, maar ook (ondeskundig) zon-gericht ontwerpen heeft er toe geleid dat er een toename is van problemen met oververhitting van woningen in zomer en zelfs tussenseizoenen. Invloed van bepaalde maatregelen moeten niet alleen in *energiegebruik* maar ook in *energieprofiel* worden zichtbaar gemaakt.

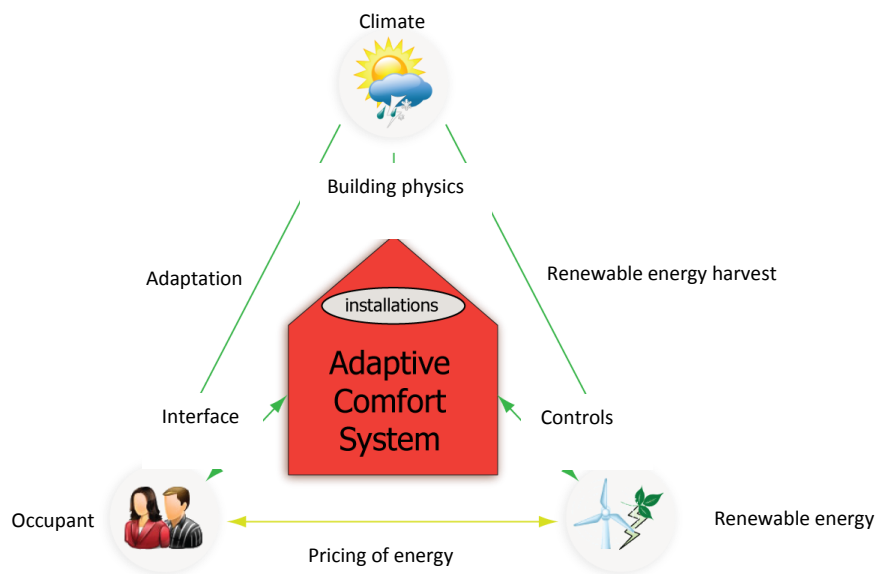
Er wordt in dit kader dan ook gesproken over Duurzame Comfort Installaties waarin de functies verwarmen, (duurzaam) koelen, ventileren en warm tapwater zijn opgenomen en zo mogelijk geïntegreerd. Ook kracht kan in beginsel hierbij worden betrokken. Voor het installatie ontwerp zijn de binnenklimaat gerelateerde aspecten het meest complex. Warm tapwater en kracht kunnen afzonderlijk worden beschouwd en aan het ontwerp toegevoegd. In het kader van deze studie blijven die twee aspecten dan ook buiten beschouwing. Een eerste randvoorwaarde voor Duurzame Comfort installaties is vraagbeperking en, mogelijk tenminste zo belangrijk, vraagsturing (van bewonerszijde tot leveringszijde). Met name met deze laatste strategie is een slag te slaan en zijn de basistechnieken op zich voorhanden. (Het betekent in feite alleen comfort (in welke zin dan ook) wanneer nodig en in de exact gevraagde hoeveelheid. Dit principe is in het RESHYVENT project inmiddels al succesvol toegepast op hybride vraaggestuurde ventilatiesystemen.). Essentieel is de wisselwerking tussen de eigenschappen van de adaptieve woning waarin installatieonderdelen (met name aan de afgifte kant) met bouwkundige componenten zijn geïntegreerd, de comfortinstallaties en de (in principe op termijn autarkische) wijk waarin de woning is geplaatst. Eerdere experimenten met autarkische wijken hebben laten zien dat met name de integrale beschouwing van de woning inclusief de woninginstallaties in samenhang met de wijk essentieel is voor een zinvol concept.

Om verstandige keuzen te maken voor energieopwekking, opwekking van warmte en koude is de relatie met het grotere schaalniveau van de wijk van groot belang. Hierbij is het van belang om energievragen met gelijksoortige gebruiksprofielen te identificeren. Daarbij gaat het dan ook bijvoorbeeld om warmtapwater en elektriciteit). Ook de inzet van korte en lange termijnopslag speelt daarbij een belangrijke rol.

De deelstudie “Duurzame Comfortinstallaties” geeft inzicht in het vraagprofiel van de woning, zodat naast het verzorgen van een adequaat binnenklimaat voor een zo efficiënt mogelijke inzet van energie in de woning zelf ook optimale afstemming op wijkniveau kan plaatsvinden.

2 Doelstelling

De doelstelling van dit werkpakket is een fundamenteel wetenschappelijk onderzoek hoe de comfortinstallaties in een woning moeten worden ingericht om een goede inpassing in een energieneutrale en (op termijn) autarkische wijk mogelijk te maken. Daarvoor is het kennen van het energievraagprofiel van groot belang. Vraag en aanbod van energie moeten daarvoor immers op elkaar kunnen worden afgestemd. Deze beschrijving van de vraag wordt beschouwd in samenhang met een fundamenteel ander (adaptief) woningontwerp waarbij in beginsel gestreefd wordt naar vernieuwende integratie van bouwkundige en installatietechnische onderdelen zoals klimaat actieve bouwdelen (werkpakket 2). De centrale vraag die in dit werkpakket 3 wordt beantwoord is “Hoe zien de klimatiseringsinstallaties er uit van een adaptieve woning waar de energievraag tot de uiterste grenzen is beperkt?”



Figuur 2-1: The Adaptive Dwelling and the Adaptive Comfort System

Deze vraagstelling vormt de basis van het promotieonderzoek Adaptive Comfort Systems van ir. E.E. (Noortje) Alders, zie figuur 2-1. Dit onderzoek was ten tijde van het schrijven van deze rapportage nog niet afgerond, in bijlage 3 is de outline van het promotierapport opgenomen. Het promotieonderzoek richt zich op de volgende onderzoeksvraag:

Wat is de bandbreedte en de diversiteit van de thermisch comfort vraag die kan worden verwacht en wat zijn de meest geschikte manieren om het gevraagde thermisch comfort te leveren op een energie-efficiënte manier zonder afbreuk te doen aan het gevoel van huiselijk comfort?

Op basis hiervan zijn de volgende deelonderzoeksvragen geformuleerd:

- Welke individuele ruimtelijke en tijdsafhankelijke patronen van activiteit en aanwezigheid kunnen worden herkend bij verschillende soorten huishoudens en wat is de waarschijnlijkheid en statistische spreiding van deze activiteiten en de aanwezigheid?
- Welke aspecten van individuele voorkeuren en gedrag beïnvloeden het energiegebruik in een adaptieve woning)?
- Wat zijn de herkenbare patronen in het weer en hoe kan daar rekening mee worden gehouden bij het ontwerp van een adaptieve woning?
- Als bezonning, ventilatie, isolatie en thermische massa worden beschouwd als dynamische en aanpasbare gebouwkenmerken wat is dan daarvan de potentiële energiebesparing in een woning?
- Waaraan moeten klimatiseringssystemen voldoen om voor een brede groep gebruikers een adequaat thermisch comfort te leveren?

Ten behoeve van EOS- DPO werkpakket 3 zijn nog de volgende aanvullende onderzoeksvragen geformuleerd:

- Op welke wijze kan de energievraag worden afgestemd op het energieaanbod?
- In hoeverre kan een exergieanalyse leiden tot een betere afstemming van energievraag en – aanbod.
- Hoe zien integrale adaptieve woning- en renovatieconcepten voor de toekomst er uit en welke energiebesparing kan daar mee worden bereikt?

3 Aanpak

3.1 Werkwijze

Om de comfortvraag en klimaataanbod in beeld te brengen worden comfortprofielen opgesteld in tijd en plaats, zowel uurlijks, wekelijks als jaarlijks. Het dynamische klimaataanbod wordt op dezelfde tijdschalen gevat in profielen. Deze profielen zijn probabilistisch van aard. Door deze profielen van vraag en aanbod naast elkaar te leggen worden conflicten zichtbaar van diverse randvoorwaarden (transmissie en ventilatieverliezen, interne en externe warmtelasten, aanwezigheid) op warmte en koudevraag. Vervolgens kunnen concepten worden ontwikkeld voor een comfortstelsel dat op deze conflicten in speelt.

Een tweede aspect van het onderzoek is dat gekeken wordt naar de mogelijkheden voor inzet van meerdere (duurzame) energiedragers. De achterliggende gedachte is tweeledig:

- Door een bepaalde mate van flexibiliteit kan de inzet van duurzame bronnen vergroot worden (bijvoorbeeld afhankelijk van het aanbod over een jaar gezien);
- en kan ook in de toekomst indien andere duurzame laagwaardige bronnen of energiedragers beschikbaar komen hierop aangesloten worden.

Een randvoorwaarde bij de opstelling van de concepten is een minimum (ondergrens) ten aanzien van de inzet van duurzame energie. Uiteindelijk dient het elektriciteitsgebruik van nieuwbouwwoningen (op wijkniveau) voor tenminste 60% lokaal en duurzaam te zijn opgewekt.

Nagegaan wordt of met de exergetische analysemethode die is ontwikkeld in het project IEA Annex 37 (Low Exergy Systems for heating and cooling of buildings) hierbij tot nieuwe inzichten kan worden gekomen. Deze exergetische benadering beschouwt impliciet de mogelijkheden van gecombineerde opwekking in combinatie met directe en indirecte inzet van duurzame energie. De exergieanalyses richten zich hierbij op een exergetische optimalisatie van verschillende scenario's en concepten.

Het onderzoek moet uiteindelijk de randvoorwaarden aangeven voor:

- toegepaste onderzoeken op locatieniveau
- productontwikkeling (op conceptniveau)

Deze ontwikkelingen dienen in een periode van 5 tot 10 jaar na dit onderzoek uitgevoerd te worden om over 10 jaar tot implementatie over te kunnen gaan.

3.2 Werkpakketten

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door de TU Delft in samenwerking met Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs BV, waarbij de volgende onderverdeling in deelwerkpakketen is aangehouden

WP3.1 (TU Delft): Analyse vooronderzoek bouwen en wonen na 2015

De (tussen)resultaten uit werkpakket 1 worden geanalyseerd in relatie tot de betekenis voor comfort installaties

WP3.2 (TU Delft): Analyse resultaten binnenmilieu en sturingsparameters (werkpakket 1) in combinatie met aanvullend literatuuronderzoek.

De (tussen)resultaten uit werkpakket 1 worden in combinatie met aanvullend literatuuronderzoek geanalyseerd in relatie tot de betekenis voor duurzame comfort installaties.

WP3.3 (TU Delft): Opstellen comfortvraagprofielen en klimaataanbodprofielen

Voor verschillende scenarios gebaseerd op de analyseresultaten van WP3.1. en WP3.2 worden comfortvraagprofielen opgesteld voor met name warmte en koelbehoefte en de daarmee gemoeide energievraag

De energievraag voor warmtapwater en kracht wordt in dit werkpakket niet behandeld. Deze kan worden meegenomen zodra afstemming van vraag en aanbod op wijkniveau aan de orde is. Bij het verzorgen van een goed binnenklimaat is er een sterke interactie tussen buitenklimaat, gewenst klimaat, gebouweigenschappen, regelmogelijkheden van den installaties, bewonersgedrag, enz. Bij warmtapwater en kracht is deze interactie niet in die mate aanwezig. Daardoor kan deze vraag afzonderlijk worden bepaald en aan die t.b.v. klimatisering worden toegevoegd en mee afgewogen.

De profielen worden zowel opgesteld voor korte termijn (dag) als lange termijn (jaar). Er wordt hierbij gebruik gemaakt van statistische gegevens van gebruiksonderzoeken en weergegevens. Deze worden geanalyseerd op probabiliteit in tijd en plaats (bijvoorbeeld door middel van regressie en Fourierreksen) waarbij de invloeden op warmte en koude behoefte (warmteverliezen en winsten) in samenhang zichtbaar worden gemaakt.

Er wordt vervolgens gezocht naar optimalisering tussen vraagbeperking en sturing enerzijds en warmte- en koelbehoefte anderzijds, gebruikmakend van periodieke eigenschappen van de vraag en aanbod. Er wordt een analyse gemaakt van de profielen in relatie tot het streven naar gecombineerde opwekking (welke profielen kunnen op elkaar afgestemd worden en op welke wijze) en de mogelijkheden die buffering heeft (wanneer is er mogelijk een energieoverschot en wanneer een gebrek). In WP 3.6 wordt gezocht naar concepten voor de technische uitvoering van deze optimalisatie.

WP3.4 (TU Delft, EOS-LT Exergie): Exergieanalyses

Van de verschillende energievragen worden exergie-analyses opgesteld waarbij de mogelijkheden van afstemming van de energiekwaliteit op vraag en aanbod zoveel mogelijk te optimaliseren.

WP3.5 (CHRI): Simulatieberekeningen energievraag en energieaanbod¹

Dynamische simulatieberekeningen met behulp van probabilistische energievraagmodellen.

WP3.6 (TU Delft): Definiëren van principeconcepten en opstellen randvoorwaarden voor vervolg in toegepast onderzoek en productontwikkeling

Hoewel de uitwerking van de resultaten in concrete concepten als toegepast onderzoek wordt beschouwd wordt in deze taak toch een eerste oriëntatie gedaan naar de vertaling van de resultaten uit de andere taken in concepten, als aanwijzingen voor toegepast onderzoek en productontwikkeling. Hierbij worden de doelstellingen ten aanzien van de verduurzaming (75% CO₂ reductie, 60% lokale duurzame elektriciteitsopwekking) als randvoorwaarden genomen. Deze taak wordt uitgevoerd in nauwe samenhang met taak WP1.3 WP2.1 en taak WP 3.5.

In de installatieconcepten is gecombineerde opwekking en exergetische benutting van energie verwerkt. Dit kan collectief op gebouw/wijkniveau zijn (verschillende opwekkers) en per woning zijnder andere de mogelijkheden beschouwd van:

- Buffering van warmte/koude (bijvoorbeeld PCM, thermoactieve bouwdelen, ondiepe bodem)
- Adaptieve regeling voor binnenklimaat en ventilatie ten aanzien van in te zetten energiedrager en energieopwekker
- Programma van eisen voor goedkope, betrouwbare en eenvoudige regeltechniek componenten en protocollen waarop apparaten en appendages zijn aan te sluiten. Behoeft bestaat aan een protocol waaraan iedereen zich conformeert of wat een natuurlijke standaard is geworden.

¹ In het oorspronkelijke projectvoorstel bestond deeltaak 3.5 uit Analyse van flexibiliteit van energiedragers.

3.3 Leeswijzer

In tabel 3.1 is een overzicht gegeven in welke hoofdstukken en bijlagen de resultaten van de verschillende deelwerkpakketten zijn terug te vinden.

Tabel 3.1 Resultaten deelwerkpakketten

	WP3.1	WP3.2	WP3.3	WP3.4	WP3.5	WP3.6
H4	X	X				
H5			X			
H6						X
H7		X				
H8			8.3	8.6	X	
H9						X
B1		X				
B2			X		X	
B3	X	X	X			X

4 Nieuwe inzichten in thermisch comfort

4.1 Inleiding

Op basis van de literatuurstudie van WP1 die eind 2007 is afgerond, aangevuld met een samenvatting van een recentere literatuurstudie in het kader van het EOS-FACET-project worden in de volgende hoofdstukken eisen en wensen gegeven voor een comfortabel binnenklimaat. Bij iedere eis of wens wordt een korte onderbouwing gegeven gebaseerd op de resultaten van beide literatuurstudies.

De eisen en wensen gelden in principe voor kantoren, woningen en scholen voor activiteiten met een lage lichamelijke inspanning (activiteitsniveaus van circa 1 tot 1,3 Met).

4.2 Samenvatting conclusies literatuurstudie

Deze samenvatting is gebaseerd op de literatuurstudie voor EOS DPO WP1 en is geactualiseerd met de belangrijkste bevindingen van de literatuurstudie van het EOS-FACET-project. Voor deze literatuurstudies zijn circa 100 bronnen bestudeerd afkomstig van verschillende Journal papers, Proceedings van congressen, boeken en rapporten.

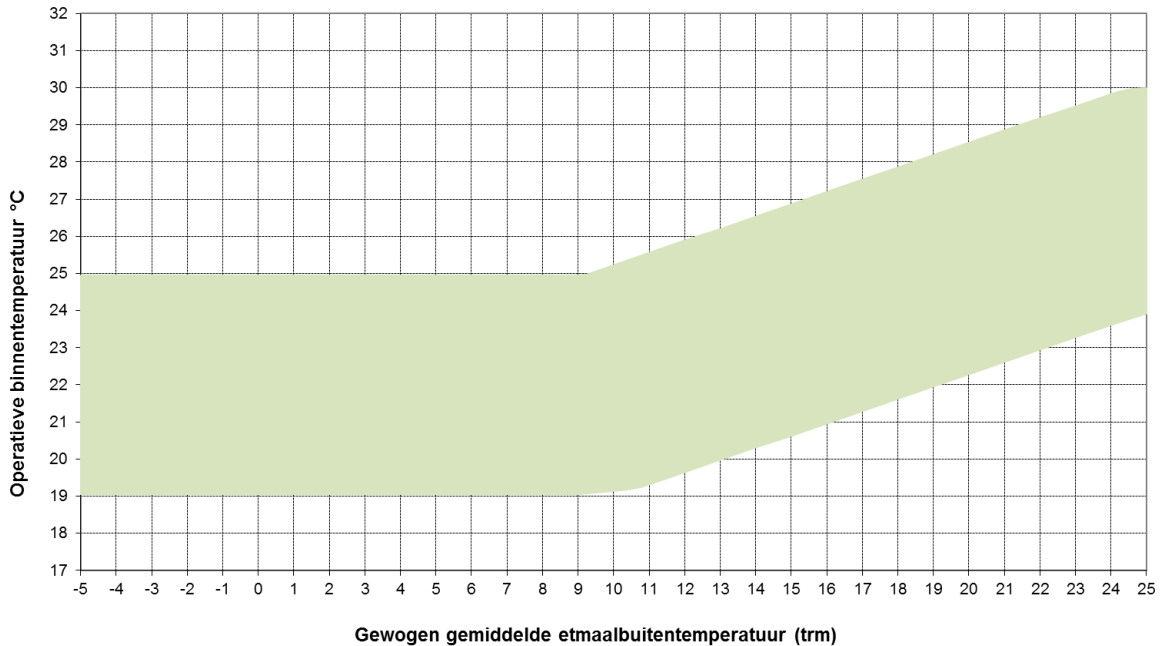
De belangrijkste conclusies uit de literatuur zijn:

- Thermisch comfort is geen 'product' dat aan bewoners wordt geleverd, maar een 'doel' dat de bewoners nastreven, als de mogelijkheden door het gebouw daarvoor worden geboden.
- Bewoners spelen een actieve rol in het gedrag van een gebouw en zijn niet slechts 'passieve ontvangers' van vooraf ingestelde omstandigheden.
- Mensen reageren op discomfort door of te trachten de omgeving aan te passen (ramen, thermostaat) of door hun 'vraag' aan te passen (kleding, houding). Het woongebouw moet dus aan de gebruikers de mogelijkheden bieden comfort te realiseren. Hiervoor moet het gebouw aan enkele voorwaarden voldoen:
 - *Gebruikelijke en voorspelbare temperaturen.* Gebouwen moeten gebruikelijke, voorspelbare temperatuur niveaus bieden, zodat de bewoners eenvoudig hun comforttemperatuur zo dicht mogelijk bij de heersende temperatuur kunnen brengen.
 - *Beïnvloeding door bewoners.* Er moeten eenvoudige, gemakkelijk bedienbare en effectieve beïnvloedingsmogelijkheden zijn.
 - *Veranderende temperaturen.* De temperaturen zijn niet vast, maar bewegen door veranderingen die binnen en buiten optreden. Snelle veranderingen leiden tot discomfort en klachten, terwijl geleidelijke veranderingen over dagen acceptabel zullen zijn.
 - Adaptatie is een fundamentele menselijke behoefte en het bieden van adaptieve mogelijkheden geeft een ruimer comfortgebied dan het gebied dat met "neutraal" wordt aangeduid.

- Bewoners van gebouwen zijn vooral gericht op het oplossen van alle vormen van discomfort, minder op het nastreven van de optimale situatie. Dit blijkt het makkelijkst te worden bereikt in een eenvoudig gebouw met veel gebruikersinvloed.
- Mensen verschillen, fysiologisch gezien, binnen en tussen verschillende sociale omgevingen en omdat gebouwen worden ontworpen om verschillende mensen te huisvesten is het de uitdaging om met deze variatie om te gaan bij het ontwerpen van gebouwen.
- Het blijkt dat een nauwere bandbreedte niet door de bewoners als comfortabeler of acceptabeler wordt ervaren. Er is bijvoorbeeld geen wetenschappelijke onderbouwing om gebouwen binnen de nauwe klasse A van de in bijlage 1 besproken normen en richtlijnen te regelen.
- De ervaren beïnvloedingsmogelijkheden in natuurlijk geventileerde gebouwen is groter dan in geconditioneerde gebouwen.
- Het fysiologische model van Fanger is misleidend, omdat het geen rekening houdt met het dynamisch opslaan van warmte en geen rekening houdt met menselijk gedrag dat streeft naar adaptatie.
- In woningen zijn slaapvertrekken het gevoeligst voor warmte-discomfort. De comforttemperatuur ligt lager en de adaptieve mogelijkheden zijn beperkter dan in andere vertrekken. Slaapvertrekken dienen koeler te zijn dan woonvertrekken.
- Ouderen ervaren de thermische omgeving anders dan jongeren als gevolg van fysiologische, gedragsmatige en psychologische verschillen.
- Eenduidige eisen voor temperaturen voor ouderen zijn moeilijk te geven. Hierdoor is regelbaarheid van temperaturen voor ouderen van extra groot belang.
- Voor toekomstige woningen voor ouderen worden passieve, architectonische oplossingen voorgesteld voor het beheersen van het binnenklimaat, aangevuld met technologische systemen in de vorm van automatisch sluiten van ramen, individuele temperatuurprofielen per kamer en airconditioning voor extreme weersomstandigheden.

4.3 Richtlijnen comforttemperatuur

- De *operatieve temperatuur* ligt binnen de aangegeven bandbreedte van figuur 4-1.
- De bandbreedte mag maximaal 5% van de tijd worden overschreden, omdat deze incidentele overschrijdingen, als gevolg van toevallige combinaties van factoren, niet of nauwelijks door de gebruikers zullen worden opgemerkt.



Figuur 4-1: Bandbreedte voor de operatieve binnentemperatuur, afhankelijk van de gewogen gemiddelde buitentemperatuur t_{rm} .

Toelichting op figuur 4.1:

- Op de verticale as is de operatieve binnentemperatuur weergegeven (gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur).
- Op de horizontale as is de gewogen gemiddelde buitentemperatuur weergegeven. De relatie tussen de door gebouwgebruikers verwachtte en acceptabele binnentemperatuur (in niet-gekoelde gebouwen) en de buitentemperatuur wordt weergegeven met de 'running mean outdoor temperature', t_{rm} , waarbij de gemiddelde dagtemperaturen worden gewogen op basis van de tijd tot vandaag, zie ook paragraaf 5.4, bijlage 1 en [19].

$${}_n t_{rm} = 0,2 \cdot t_{od-1} + 0,8 \cdot {}_{n-1} t_{rm} \quad (^\circ\text{C})$$

${}_n t_{rm}$ = de 'running mean outdoor temperature' op dag n, en ${}_{n-1} t_{rm}$ die van de dag ervoor.

t_{od-1} = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum gisteren

De bandbreedtes worden begrensd door de volgende vergelijkingen:

$$\bullet \quad t_{i \max} = 0,33t_{rm} + 21,8 \quad (^\circ\text{C})$$

$$\bullet \quad t_{i \min} = 0,33t_{rm} + 15,8 \quad (^\circ\text{C})$$

4.3.1 Free Running

Het klimaatsysteem (gebouw en installaties) is over een zo groot mogelijk gebied van de 'running mean outdoor temperature' (t_{rm}) free running, dat wil zeggen dat er geen actieve verwarming of koeling² wordt toegepast.

Om dat mogelijk te maken wordt in onderstaande stappen het gebouwontwerp bouwfysisch geoptimaliseerd:

1. Het door de schil toelaten van zoveel mogelijk gewenste zoninstraling, koude en warmte en het weren van zoveel mogelijk ongewenste zoninstraling, koude en warmte. Hierbij wordt gebruik gemaakt van thermisch actieve massa (opslag/vertraagde afgifte).
2. Het ondersteunen van passieve klimaatbeheersing met regelbare (bij voorkeur door de gebruiker) te openen ramen, nachtventilatie, dwarsventilatie en zonwering.
3. Verder ondersteunen van passieve klimaatbeheersing bijvoorbeeld een actieve gevel, Phase Change Materials, betonkernactivering of variabele isolatie.

In de gebruiksfase worden de maatregelen bij voorkeur in de volgende volgorde toegepast.

- a. Wanneer bij een lage (t_{rm}) de comfortgrenzen worden overschreden, wordt verwarmingsvermogen aangewend.
- b. Wanneer bij een hoge (t_{rm}) de comfortgrenzen worden overschreden, wordt eerst door middel van het verhogen van de luchtsnelheid de comfortgrens verhoogd, conform figuur 4-1 (door middel van *door bewoners te bedienen* open ramen, ventilatoren of andere middelen waarmee de luchtsnelheid kan worden verhoogd).
- c. Wanneer bij een hoge (t_{rm}) de comfortgrenzen worden overschreden en het toepassen van een verhoogde luchtsnelheid onvoldoende effect heeft, of niet mogelijk is, wordt actief koelvermogen aangewend.

² Koeling of verwarming wordt gezien als actief als er hiervoor externe energie wordt aangewend (elektriciteit, gas, langdurig opgeslagen warmte). Hulpenergie voor pompen, ventilatoren et cetera wordt gezien als een tussenstap.

4.3.2 Toelichting comforttemperatuur

In de huidige normen (NEN-EN15251, 2007, ASHRAE 55, 2010) 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 voorgeschreven. In ISSO74 (ISSO, 2004) wordt onderscheid gemaakt tussen Alpha- en Bètaklimaten. Een Alphaklimaat kan worden ontworpen wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast, beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is en de kledingisolatie 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. Omgekeerd geredeneerd blijken bewoners te wennen aan een gekoeld binnenklimaat. De tevredenheid in deze gebouwen is echter niet hoger en in de meeste gevallen lager dan in niet gekoelde gebouwen. 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 (o.a. Arens, 2010, Humphreys, 2010, Mendell, 2009, Nicol, 2009, Hellwig, 2006, Leaman, 2001). 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 verwarmd of gekoeld wordt, dus in de free-running modus, is er een samenhang 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.

Er wordt hier daarom niet voor een binnenklimaat gekozen dat wordt gedefinieerd door het PMV-PPD-model of een bètabinnenklimaat zoals in ISSO-74 (ISSO, 2004). Er wordt hier uitgegaan van een binnenklimaat op basis van de Europese database, het SCATs-onderzoek, waarop ook de NEN-EN15251 is gebaseerd (NEN-EN, 2007, Nicol & Humphreys, 2010).

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 ISSO-74. De ASHRAE-55 en de ISSO-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.
- 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).

- Eén bandbreedte toepassen in plaats van drie. Minimaal 80% vindt het dan acceptabel. Naarmate er meer adaptieve mogelijkheden zijn en de temperatuur voorspelbaarder is zal het comfortniveau hoger worden. In de meeste gevallen is de voorspelbaarheid voor de gebruikers het grootst bij wanneer de klimaatregeling zoveel mogelijk passief plaats vind. Bij actieve regelingen is de kans groter dat de temperatuur door het systeem zodanig bijgeregeld wordt dat dit niet bij het (onbewuste) verwachtingsniveau van de bewoners aansluit.

Daarom is hier gekozen om één bandbreedte te hanteren, gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek. Een bandbreedte zorgt voor minimaal 80% acceptatie.

4.3.3 Interpretatie temperatuuroverschrijdingsberekeningen

De resultaten van temperatuuroverschrijdingsberekeningen moeten met “gevoel” worden geïnterpreteerd, waarbij rekening wordt gehouden met de onzekerheden en de probabilistische verdelingen van de invoervariabelen en de invloed op de uitkomsten. Een overschrijding van 5% is toelaatbaar om te kunnen compenseren voor onzekerheden in de invoer en de modellen (NEN-EN15251). Overschrijdingen van de bandbreedte worden verminderd en weggenomen door bijvoorbeeld het vergroten de thermische massa, het beperken van interne en externe warmtelast, het bevorderen van persoonlijke beïnvloedingsmogelijkheden door goed bruikbare te openen ramen en het ontwerpen van installaties die overschrijdingen “vriendelijk” verminderen of een adaptieve gevel.

4.4 Beïnvloeding van temperatuur

- De temperatuur dient via een te openen deel regelbaar en tochtvrij te kunnen worden beïnvloed.

4.4.1 Toelichting beïnvloeding temperatuur

De bewoner heeft bij voorkeur de mogelijkheid invloed uit te oefenen op lichtomstandigheden, temperatuur, luchtverversing en lawaai en kan een afweging maken tussen invloed op lawaai of invloed op de temperatuur.

Om de bruikbaarheid van de bediening van de diverse voorzieningen te waarborgen moet aan de volgende uitgangspunten worden voldaan. Beïnvloedingsmogelijkheden moeten:

- worden aangebracht in de buurt van de systemen / in de ruimten die ermee bediend kunnen worden.
- goed zichtbaar en bereikbaar zijn.
- gebruiksvriendelijk vanuit het perspectief van de gebruiker (niet alleen de ontwerper).
- begrijpelijk zijn; liefst intuïtief / zonder uitleg, ook voor mensen die ze voor het eerst of sporadisch gebruiken.
- aangeven wat ermee beïnvloed kan worden.

- merkbaar effectief zijn.
- direct feedback geven als ze worden ingesteld.
 - Bij voorkeur is de verandering zelf direct merkbaar (bijvoorbeeld: het licht gaat uit).
 - als het langer duurt voor de regelactie merkbaar wordt (bijvoorbeeld verwarming) wordt feedback gegeven bijvoorbeeld d.m.v. een lampje.
- te allen tijde de status van het systeem aangeven.
- voldoende mogelijkheden geven om de instelling te verfijnen.
- niet absoluut zijn en geen nauwkeurigheid suggereren die er niet is.
- volledig in bedrijf gesteld worden bij oplevering.
- goed ingeregeld worden bij oplevering.

Ter verbetering van de energiebesparing kunnen de volgende mogelijkheden nog geïntegreerd worden:

- Automatische aanwezigheidssensoren gecombineerd met knoppen.
- Intervaltimers met uit/aan knoppen en andere noodzakelijke mogelijkheden om de automatische actie op te heffen door de gebruiker.
- Mogelijkheid van de interface tot het geven van niet bindend advies.

4.5 Temperatuurvariatie

4.5.1 Temperatuurvariatie binnen een dag

- De operationele temperatuur mag over de dag maximaal 2-3K variëren (Wagner, 2006, Nicol, 2009).
- Cyclische temperatuurvariaties met een periode van korter dan 15 minuten mogen maximaal 1,1K bedragen (ASHRAE, 2010)

4.5.2 Temperatuurvariatie tussen twee opeenvolgende dagen

Omdat mensen hun kledingisolatie van dag tot dag maar geleidelijk blijken te veranderen, mag het temperatuurverschil tussen twee opeenvolgende dagen maximaal 1K zijn en maximaal 3K over een week (Nicol, 2009).

4.5.3 Toelichting temperatuurvariatie

Temperatuurvariaties als gevolg van persoonlijk instelbare regelmogelijkheden zullen meestal door de bewoners worden geaccepteerd, zolang de temperaturen binnen het comfortgebied aangegeven in Figuur 4-1 blijft. Temperatuurvariaties die het gevolg zijn van actieve regelingen (installaties) zullen veel minder snel worden geaccepteerd.

4.6 Literatuur

- NEN-EN 15251, Binnenmilieugerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek, NEN 2007.
- ASHRAE standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, AHSRAE, 2010, ANSI 1041-2336.
- Thermische “Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen”, publicatie 74, ISSO, Rotterdam, maart 2004.
- Arens, E., Turner, S., Zang, H., Paliaga, G., “Moving Air for Comfort”, in *ASHRAE Journal*, May 2009, pp 8-18.
- Humphreys, M.A., Rijal, H.B., Nicol, J.F., Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors, Proceedings of conference: Adapting to Change: New thinking on Comfort, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 april 2010. London, Network for Comfort and Energy Use in Buildings.
- Mendell M. J., Mirer A. G. “Indoor thermal factors and symptoms in office workers: findings from the US EPA BASE study”, *Indoor Air 2009*; 19: pp. 291–302.
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., “New standards for comfort and energy use in buildings”, *Building Research & Information*, No 37(1) (2009), pp. 68-73.
- Hellwig, R.T., Brasche, S., Bischof, W., “Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning”, *Proceedings of Congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right*, Winsor 2006.
- Leaman, A., Bordass, B., “Assessing building performance in use 4: the Probe occupant surveys and their implications”, in *Building Research & Information*, Vol 29 (3/2001), pp. 129 – 143.
- Nicol, F., Humphreys, M., “Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251”, in *Building and Environment*, No 45 (2010), pp.11-17.
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., “New standards for comfort and energy use in buildings”, *Building Research & Information*, No 37(1) (2009), pp. 68-73.
- Wagner, A., Moosmann, C., Gropp, T., Gossauer, E., “Thermal comfort under summer climate conditions – Results from a survey in an office building in Karlsruhe, Germany”, *Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right*, Winsor 2006.

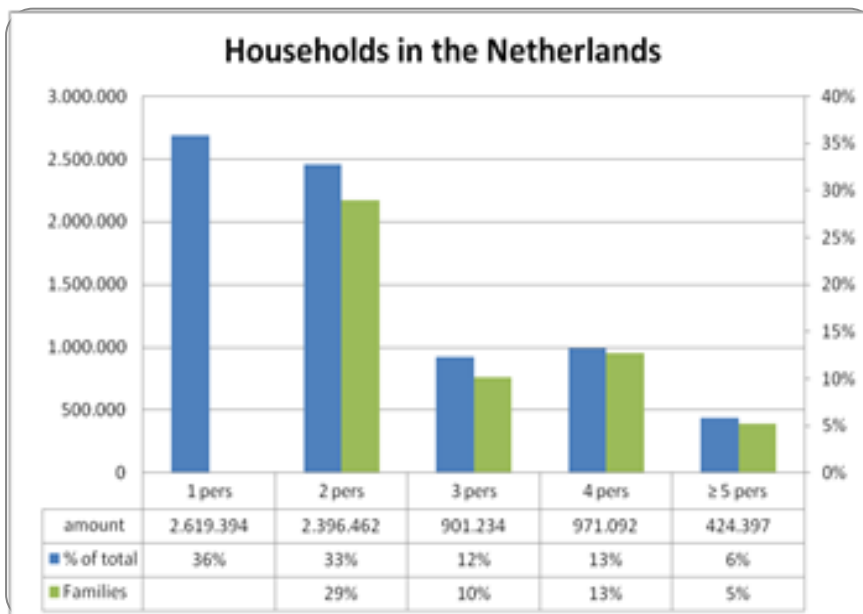
5 Uitgangspunten voor duurzame comfort installaties

5.1 Gebruikersgedrag in woningen

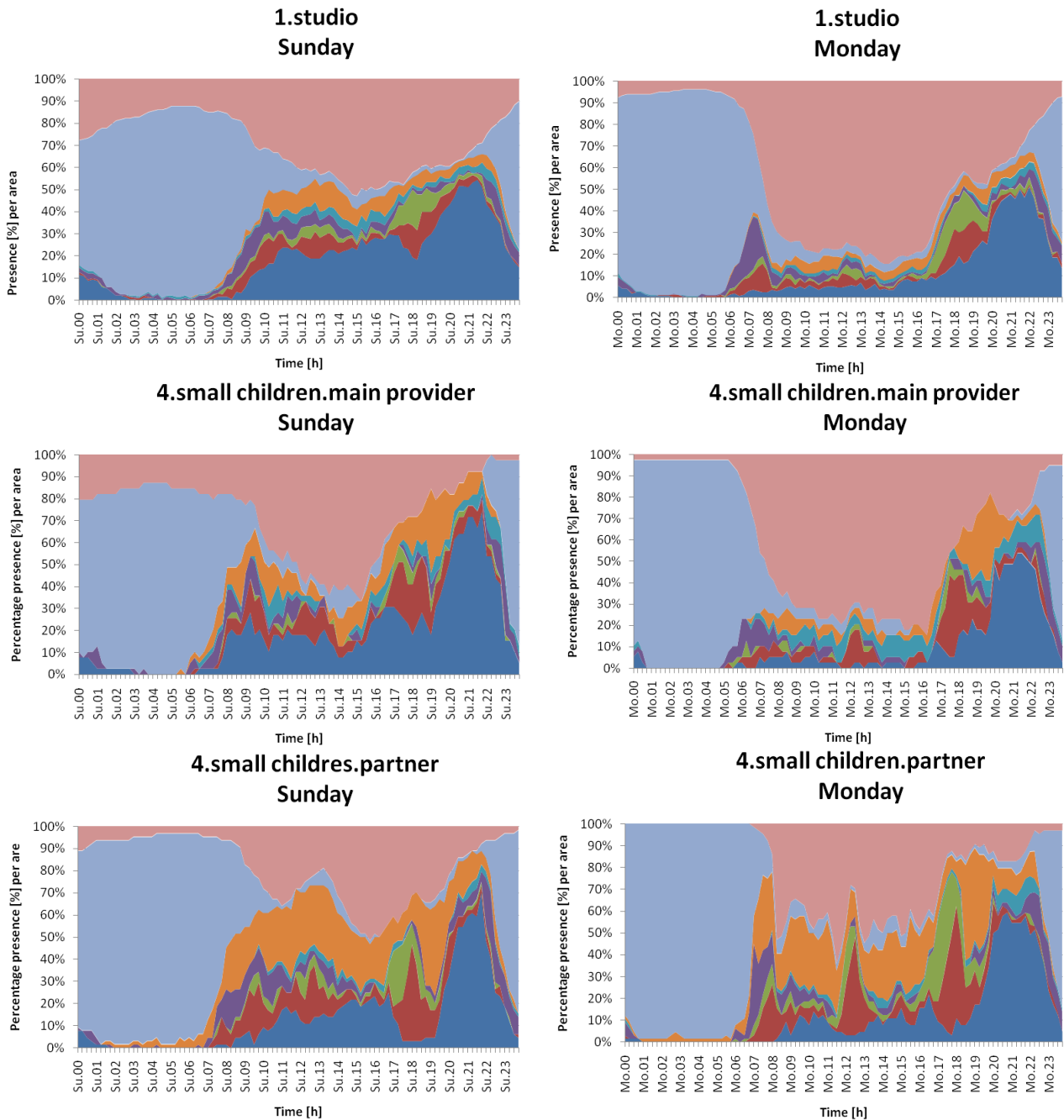
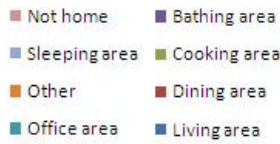
In een kantooromgeving, waar de setpointtemperatuur centraal geregeld wordt, is het verstandig om gemiddelde comforttemperaturen voor de doelgroep te bepalen, en zo de grootste kans op zo veel mogelijk tevreden mensen te hebben en de productiviteit te optimaliseren. In woningen zijn mensen echter autonoom en verantwoordelijk voor hun eigen omgeving en kunnen ze zelf hun setpointtemperatuur besturen. Bovendien is het aantal activiteiten dat in een woning kan plaatsvinden veel uitgebreider. De woning en het klimaatsysteem moeten de bewoner de mogelijkheid bieden zijn eigen omgeving aan zijn huidige activiteiten aan te passen, binnen een zekere marge met betrekking tot energiegebruik. *Dit verlegt de focus van een daadwerkelijke temperatuur naar een reeks van temperaturen die waarschijnlijk zullen worden geëist, en de inherente veranderlijkheid en marge hiervan.*

5.1.1 Bezetting en aanwezigheid

Zoals te zien is in figuur 5-1, bestaan de meeste huishoudens in Nederland uit 1 persoon (36%); op de tweede plaats komen de tweepersoons-huishoudens (33%) en er zijn iets meer 4-persoonshuishoudens (12%) dan huishoudens met 3, of 5 en meer personen. De meeste meerpersoonshuishoudens zijn gezinnen met of zonder kinderen [9].



Figuur 5-1: Distributie van omvang Nederlandse huishoudens



Figuur 5-2: Visualisatie van een tijdsindeling onderzoek in Nederland betreffende drie verschillende demografische groepen, een indicatie van de aanwezigheid in de woning in verschillende gebruikers ruimtes.

Om de methode die bij dit onderzoek is gebruikt te illustreren wordt een 1-persoonshuishouden met een studioappartement (1.studio) en een gezin met 2 kinderen jonger dan 5 jaar (4.small children) bekeken. Van het individu in het studioappartement wordt aangenomen dat deze overdag werkt en dus overdag niet thuis is. Voor het gezin wordt aangenomen dat in ieder geval één van de partners thuis is om voor de kinderen te zorgen en het huishouden te doen. Om de schema's voor deze profielen te bepalen is gebruik gemaakt van data van een Tijdbestedingsonderzoek, verkregen van het CBS. Het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) is het Nederlandse overheidsinstituut dat statistische informatie over Nederland verzamelt. Het Tijdbestedingsonderzoek was onderdeel van een groter onderzoek over de sociale omstandigheden in Nederland (POLS 2000) en is uitgevoerd door het Nederlands Instituut voor Wetenschappelijke Informatiediensten (NIWI) [48]. Ter vergelijking van de schema's zijn in 5-2 de statistieken van de twee typen huishouden te zien. Langs de verticale as is de verdeling van personen aanwezig in de verschillende 'activiteitengebieden'. De activiteitengebieden geven een indicatie van aanwezigheid op basis van een activiteit, onafhankelijk van de indeling van de woning; de eetkamer kan bijvoorbeeld een afzonderlijke ruimte of een gedeelte in een afzonderlijke keuken of woonkamer zijn. Langs de horizontale as is de tijd gedurende de dag verdeeld. Zoals te zien is in de figuren, zijn er significante verschillen in dagelijkse activiteiten, zowel tussen de groepen als binnen de groepen tussen weekdays en weekend en de verschillende leden van het gezin.

5.1.2 Temperatuurpreferenties

Peeters en De Dear [41] ontwikkelden Adaptieve TemperatuurGrens algoritmes voor drie soorten zones in Belgische woningen. In de casus van het studioappartement zijn de twee gebied types van de woonkamer en slaapkamer in één ruimte toegepast, om de mogelijke variabiliteit en reikwijdte binnen het vraagstuk te illustreren. Opgemerkt moet worden dat deze algoritmen alleen gebruikt zijn als voorbeeld om de methode uit te leggen, aangezien ze op de Belgische populatie gebaseerd zijn. Om culturele redenen kunnen deze data niet direct vertaald worden naar de Nederlandse situatie. Dergelijke databestanden zijn echter niet beschikbaar voor Nederlandse woningen en het Belgische klimaat is goed te vergelijken met dat in Nederland; het onderzoek geeft daarom dus toch een goed beeld van de dynamiek van thermisch comfort en de verschillen voor verschillende activiteiten. De methode is aangepast om elk ingezet algoritme, gerelateerd aan buitenklimaat en comfort met betrekking tot de verschillende activiteiten, op te nemen.

De schema's die gemaakt zijn voor dit rapport, zijn gebaseerd op maandelijkse gemiddelde temperaturen en de gemiddelde bezetting van deze specifieke groep. Tabel 5.1 geeft de maandelijkse gemiddelde temperatuur van de afgelopen 30 jaar in Nederland weer, gebaseerd op data verkregen van de website van het KNMI (2009).

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
T _{Mean}	3,11	3,43	6,11	9,13	13,18	15,59	17,79	17,51	14,51	10,69	6,70	3,82

Tabel 5. 1: Gemiddelde maandelijkse gemiddelde temperaturen op De Bilt, Nederland (1980-2009).

De algoritmen voor de Adaptieve Temperatuurgrens zijn als volgt overgenomen van Peeters [41]:

slaapkamers

$$\begin{array}{ll} T_n = 16 & \text{voor } T_{e,ref} < 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_n = 16 + 0,23 \cdot T_{e,ref} & \text{for } 0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{e,ref} < 12,6 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_n = 9,18 + 0,77 \cdot T_{e,ref} & \text{for } 12,6 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{e,ref} < 21,8 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_n = 26 & \text{voor } T_{e,ref} \geq 21,8 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

Bandbreedte

$$\begin{array}{l} T_{upper} = \min(26, T_n + w \cdot \alpha) \\ T_{lower} = \max(16, T_n - (1 - w) \cdot \alpha) \end{array}$$

Living area (reclining activity)

$$\begin{array}{ll} T_n = 20,4 + 0,06 \cdot T_{e,ref} & \text{for } T_{e,ref} < 12,5 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_n = 16,63 + 0,36 \cdot T_{e,ref} & \text{for } T_{e,ref} \geq 12,5 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

Bandwidth

$$\begin{array}{l} T_{upper} = T_n + w \cdot \alpha \\ T_{lower} = \max(18, T_n - w(1 - \alpha)) \\ 10\% \text{ PPD: } w = 5 ; \alpha = 0,7 \\ 20\% \text{ PPD: } w = 7 ; \alpha = 0,7 \end{array}$$

Correction factor for living area light household work

$$\Delta T_n = -8 \cdot (M - 1,4)$$

With:

T_n [°C]	= Statistical neutral temperature, in this work considered as comfort temperature.
$T_{e,ref}$ [°C]	= Outdoor reference temperature (regarded as the monthly mean temperature.)
T_{upper} [°C]	= Upper temperature limit
T_{lower} [°C]	= Lower temperature limit
w [°C]	= Width of the comfort band
α	= Statistical constant

M [met] = Metabolic rate

De bandbreedtes die Peeters gebruikt, zijn die van 10% en 20% ontevredenheid, volgens Fangers PPD schaal [20]. In deze studie is de bandbreedte niet als zodanig beschouwd, maar als een spreiding in gewenste comforttemperatuur. In dit verband is de bandbreedte equivalent aan 20% PPD gekozen, aangezien zo een grotere diversiteit in populatie vertegenwoordigd kan worden. Het zou echter goed kunnen dat de bandbreedte groter is. Dit moet bestudeerd worden door comfortonderzoeken in Nederland uit te voeren, voordat hier een uitspraak over gedaan kan worden. Om het verhoogde metabolisme tijdens licht huishoudelijk werk in rekening te nemen, is een correctiefactor volgens ISSO 74 gebruikt [27].

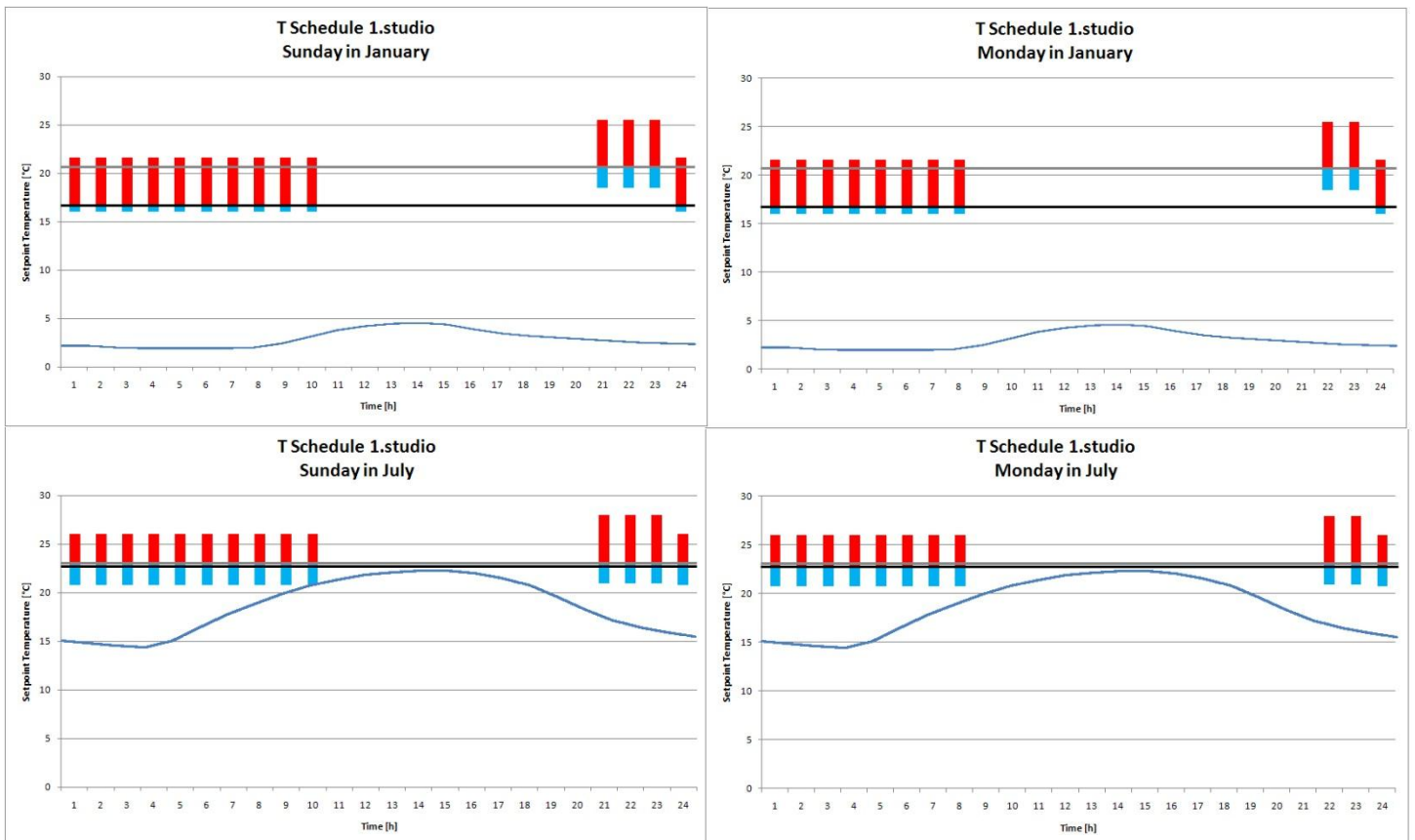
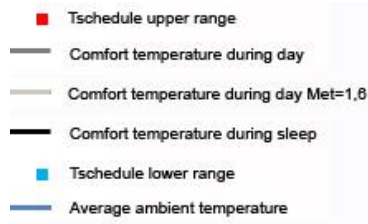
Sommige studies geven aan dat een stijging (en daling) in temperatuur van ongeveer 1,5 °C per uur niet opgemerkt wordt door de bewoners [3] [7]. Verder is in een Japanse studie gevonden dat het verhogen van de binnentemperatuur met 3 °C in de middag gunstig werkt op alertheid en stressniveaus verlaagt. Bovendien is het in de medische wetenschap bekend dat een wisselende thermische belasting ten gunste komt aan de gezondheid van hart en bloedvaten. Net als de warmtehuishouding wordt het cardiovasculaire stelsel geregeld door het sympathisch zenuwstelsel.

Deze twee systemen zijn gerelateerd. Er zijn aanwijzingen dat het stimuleren van de warmtehuishouding ten gunste komt van de gezondheid [51]. Deze onderzoeken impliceren dat een zekere variabiliteit en dus een vergroting van de reikwijdte gedurende de dag mogelijk is en wellicht zelfs de voorkeur heeft. Hoewel dit in deze studie niet is meegenomen, geeft dit mogelijkheden voor zelfs meer adaptieve en duurzame oplossingen binnen comfortsystemen. De manier waarop in dit rapport de profielen van bewonerswensen beschreven worden kan goed ingepast worden in nieuwe manieren om thermisch comfort te berekenen, door de algoritmen te wijzigen. De gekozen algoritmen laten de manier zien waarop het werkt.

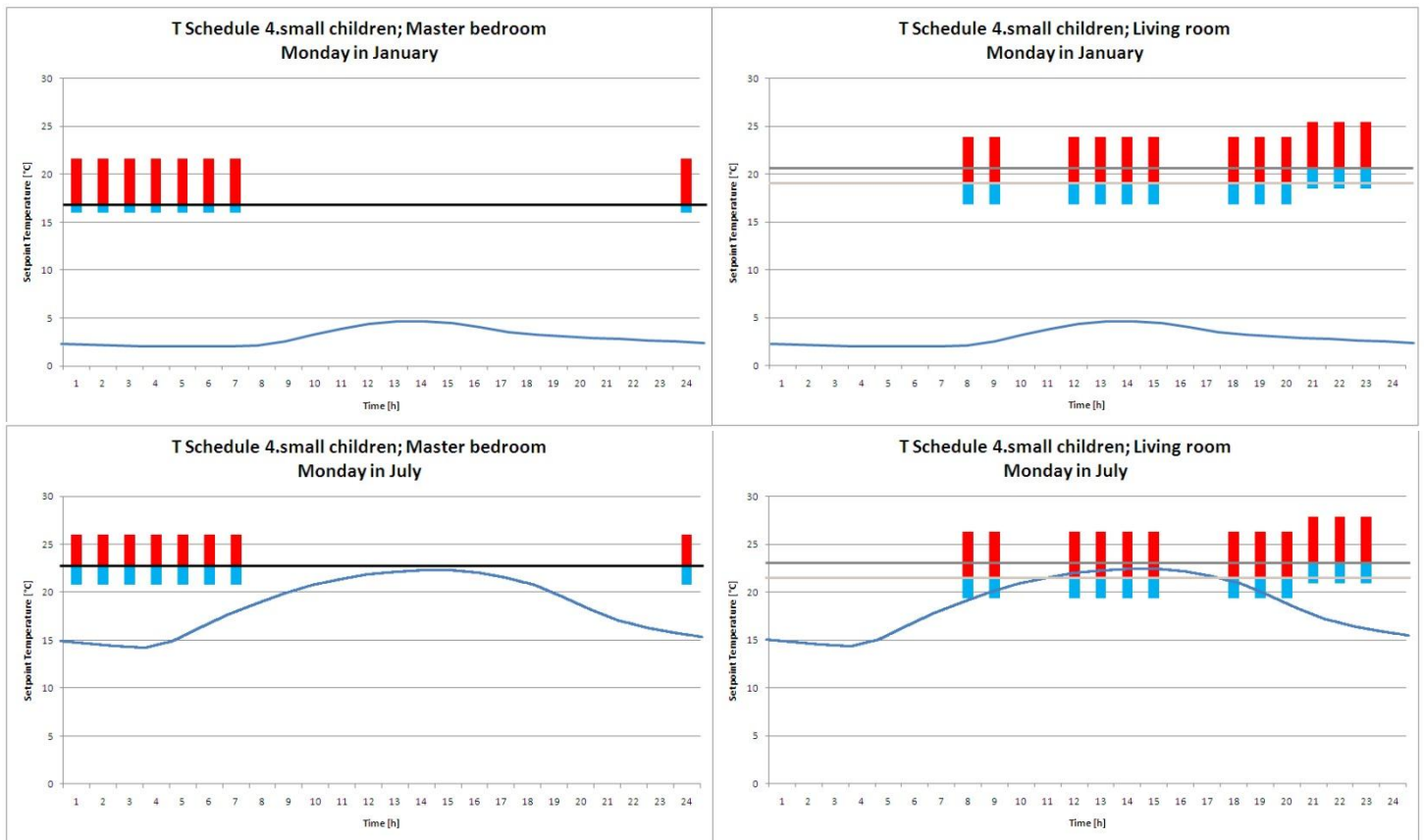
5.1.3 Gebruikersprofielen

Het combineren van de data van bezetting, activiteit en gemiddelde dagtemperatuur leidt tot comforttemperatuurreeksen in de schema's in figuur 5-3, voor het studioappartement in januari en juli, wat respectievelijk de koudste en warmste maand van het jaar zijn. Langs de horizontale as wordt de tijd van de dag weergegeven. Langs de verticale as staat de comforttemperatuur uitgezet (gebaseerd op gemiddelde weeromstandigheden) en het gebied onder en boven deze temperatuur. De lijnen voor de comforttemperatuur in de figuur geven de neutrale temperatuur van een activiteit weer, om het verschil tussen twee verschillende activiteiten te illustreren. Opgemerkt moet worden dat deze comforttemperaturen volgens eerder genoemde studies kunnen variëren gedurende de dag, zelfs binnen hetzelfde activiteitsniveau. In dit rapport is dit niet meegenomen. In de loop van dit onderzoek zal hier echter rekening mee gehouden worden. Zoals gezien kan worden in figuur 5-3, zijn in de winter de comforttemperaturen voor de slaap- en dagactiviteiten erg verschillend, terwijl ze in de zomer bijna hetzelfde zijn. Het verschil in het bereik van setpoints en omgevingstemperatuur is significant minder dan dit zou zijn als het huis de hele dag door volgens de 21 °C norm verwarmd zou worden. Figuur 5-3 laat zien dat er slechts twee of drie uren per dag zijn wanneer deze temperatuur nodig zou zijn, en om energieverbruik te verminderen kan dit gemakkelijk een paar graden lager zijn, zonder afbreuk te doen aan het comfort. Verder kan de ventilatie tijdens afwezigheid erg laag zijn. Als de woning goed geïsoleerd is zal de temperaturodaling tijdens afwezigheid ook laag zijn.

Figuur 5-4 laat de gebruiksprofielen voor de woonkamer en hoofdslaapkamer van de gezinswoning zien. Omdat deze woning meer dan één kamer heeft, kan er voor elke ruimte een schema gemaakt worden. In dit rapport worden alleen de woonkamer en hoofdslaapkamer getoond, en ook alleen maandagen, om zo de schema's met het studioappartement te kunnen vergelijken. Hoewel er een geringe variatie in comforttemperatuur binnen de woonkamer is, als gevolg van verschillende activiteitsniveaus (liggende activiteit en licht huishoudelijk werk), is dit minder dan in de studioruimte. Het totaalschema per ruimte is meer constant en er zijn meer bezettingsuren. Aangezien er gedurende de hele dag een comfortvraag is, kan er meer gebruik gemaakt worden van potentieel directe opvang van zonstraling.



Figuur 5-3: Gebruiksprofielen van comfort temperatuur en bandbreedte voor een één persons huishouden in een studio appartement, bij gemiddelde weersomstandigheden.



Figuur5-4: Schedules of comfort temperature and bandwidth according to occupancy schedules of a family with two small children.

5.2 Dynamische eigenschappen van het weer

5.2.1 Klimaataanbodprofielen

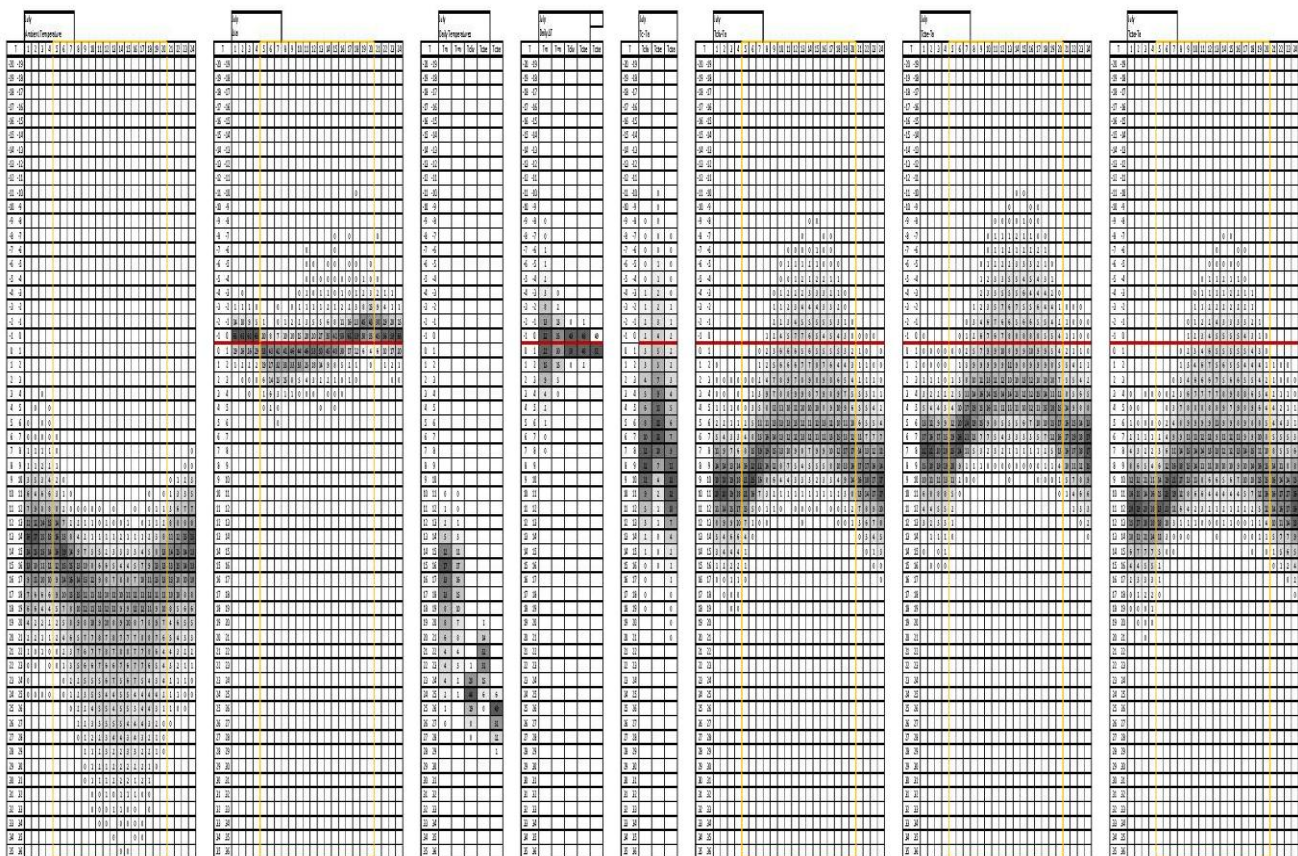
Om het systeem in staat te stellen om te gaan met elke denkbare situatie, moet een analyse van de mogelijke variaties gedaan worden, zodat bekend wordt welk soort van combinaties van factoren het meest waarschijnlijk voorkomen en welke situaties zo zeldzaam zijn dat ze weggelaten kunnen worden. Een combinatie van frequentieverdeling, wekelijkse bezettingsprofielen, simulaties en belastingduurkrommen zullen in deze studie gebruikt worden. De volgende weervariabelen hebben de meeste invloed op het binnenklimaat en zullen verzameld worden in frequentietabellen voor de afgelopen 30 jaar in weerstation De Bilt (Nederland):

- Omgevingstemperaturen
- Zonnestraling (totaal op oppervlak) (gedurende de dag)
- Dagelijkse en uurlijkse temperatuurfuctuaties
- (windsnelheid en windrichting)

Het samenvallen van sommige weervariabelen kan extra beperkingen op het binnenklimaat en comfort teweegbrengen. Deze worden bijeengebracht in kruisfrequentieverdelingen, om te zien waar de grootste vraag zal voorkomen, bijvoorbeeld:

- Hoge omgevingstemperatuur + hoge zonstraling
- Lage omgevingstemperatuur + hoge windsnelheid in het bijzonder uit het noorden

Het weer in Nederland is in kaart gebracht om te onderzoeken wat het gemiddeld voorkomende weer gedurende het jaar, per maand, per dag en per uur is. Na het bepalen van het gemiddelde is het weer van de afgelopen 30 jaar geanalyseerd om de voorkomende stapsgewijze veranderingen te bepalen (drastische wijzigingen van dag tot dag), wat nog belangrijker is. Deze veranderingen zijn verzameld in weerdatabestanden voor simulaties, om zo het effect te zien die extreme veranderingen hebben op verschillende comfortleverende systemen.

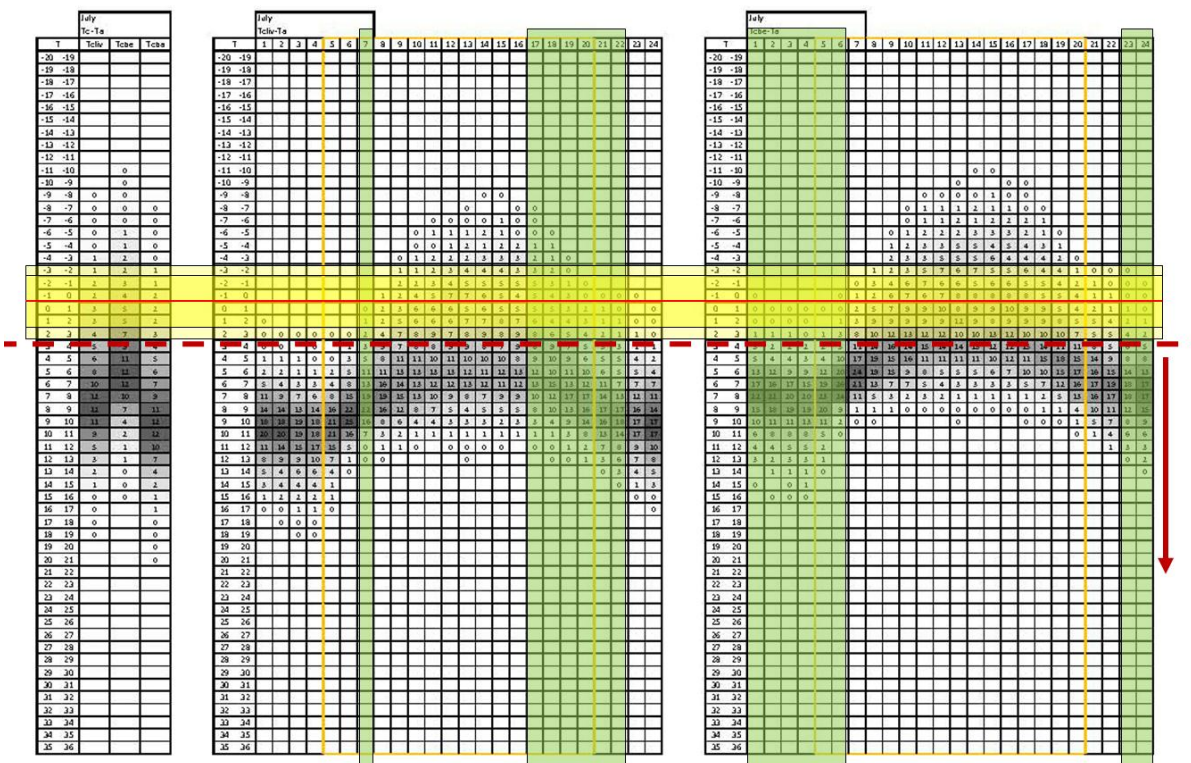


Figuur 5.5: Frequentie table voor de temperatuur per uur van de dag in Juli op 'De Bilt' (Nederland)

Met de frequentietabellen per uur van de dag (buitentemperatuur) en de bezettingsprofielen per ruimte wordt een schatting gemaakt van het verschil tussen vraag en aanbod. Met simulatieberekeningen wordt deze informatie voor de de situaties die problemen veroorzaken of een hoog energieverbruik hebben, verder uitgewerkt, om zo oplossingsrichtingen vinden. Verder kunnen door vergelijking van de verschillende bezettingsprofielende verschillen tussen bezetting en vraag geanalyseerd worden, om te zien waar ze het meest afwijken. Uitgezocht moet worden of er ook een enkel systeem kan zijn wat in staat is thermisch comfort te leveren voor alle soorten bewoners, of dat er misschien een noodzaak is voor verschillende systemen.

Het voorbeeld van een frequentietabel hierboven (figuur 5-5) laat de frequenties zien van voorkomende temperaturen tijdens de verschillende uren van de dag in juli van de afgelopen 30 jaar in De Bilt. Het verloop van grijs tinten geeft de meest voorkomende temperaturen in het donker weer en de minst voorkomende in wit. Ter vergelijking zijn de gemiddelde temperaturen voor deze periode gemarkeerd in de vakken. Het blijkt dat de gemiddelde temperatuur niet noodzakelijkerwijs de meest voorkomende temperatuur is. Deze afbeelding laat in één oogopslag zien welk gemiddelde verloop over de dag en welke variantie verwacht kan worden.

In figuur 5.6 zijn frequentietabellen van "categorien" van voorkomende temperaturen op tijdstippen van een dag in de maand Juli, gemeten over 30 jaar (1980-2009) gegeven. Hierbij zijn de verschillen tussen comforttemperatuur en buitentemperatuur weergegeven. De rode ononderbroken lijn stelt de lijn voor dat de buitentemperatuur gelijk is aan de gemiddelde comforttemperatuur en het gele gebied betekent dat de buitentemperatuur binnen de comfortbandbreedte ligt. De onderbroken lijn geeft de situaties aan waarin de buitentemperatuur onder de comfortbandbreedtegrens ligt en waarbij dus de mogelijkheid bestaat om, bij dreigende oververhitting, met buitenlucht te koelen.



Figuur 5-6 Voorbeeld van een frequentietabel van verschil tussen comforttemperatuur en buitentemperatuur (links: daggemiddeld, midden: woonkamer, rechts: slaapkamer)

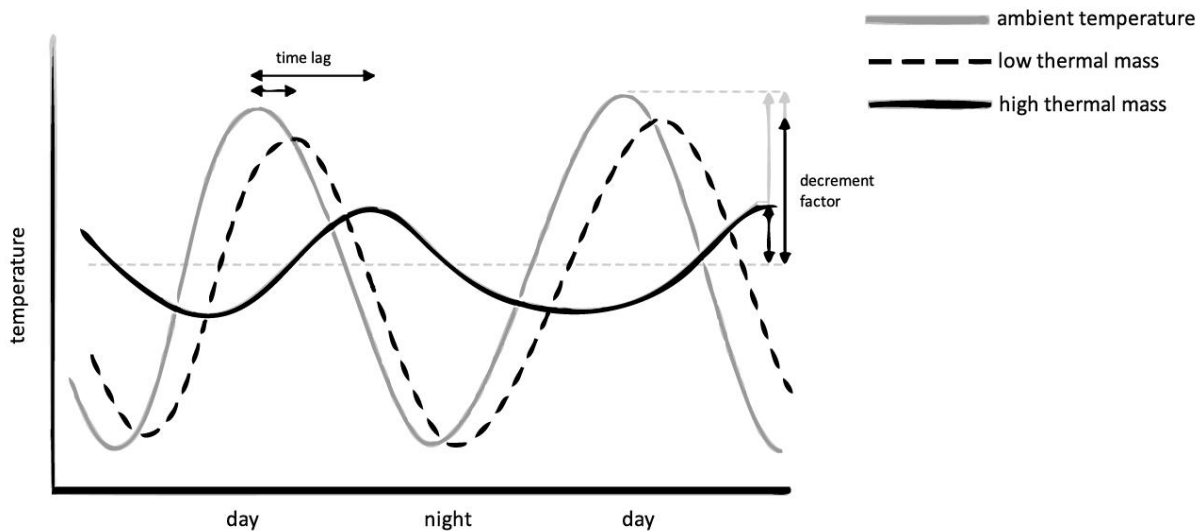
5.3 Algemene strategieën voor verwarmen en (preventief passief) koelen.

5.3.1 Het stookseizoen, tussenseizoen en zomerseizoen.

Volgens de Trias Energetica wordt allereerst de energievraag tot een minimum beperkt. Dat wil zeggen dat de strategieën genoemd in Werkpakket 2 zoveel mogelijk ingezet worden zodat een zo groot mogelijk deel van het jaar het gevraagde binnenklimaat verzorgd kan worden zonder actieve verwarming of koeling (het aanwenden van energie om warmte of koude op te wekken) te gebruiken.

5.3.2 Dynamisch-thermisch gedrag van gebouwen.

Het dynamisch-thermisch gedrag van een gebouw kan teruggebracht worden tot een aantal specifieke eigenschappen. Hiervan zijn de eigenschappen van vertraging en demping van het verloop van de binnentemperatuur ten opzichte van het verloop van de buitentemperatuur het belangrijkste. Deze worden bepaald door de isolatiewaarde, de benutte zonnewarmte en de thermische massa van het geheel, maar zeker ook de volgorde van de opbouw van de thermische schil van binnen naar buiten. Dit is bepalend voor de "bereikbaarheid" van de thermische massa. Een muur opgebouwd uit metselwerk met isolatie aan de binnenzijde zal anders reageren dan een muur die is opgebouwd met identieke elementen maar waar de isolatie aan de buitenzijde zit. De waarden van vertraging en demping kunnen gevonden worden door de numerieke methode van Szokolay [52] of gevonden worden door gebouwsimulaties met bijvoorbeeld TRNSYS [54]. Meer informatie hierover is te vinden bij werkpakket 2.



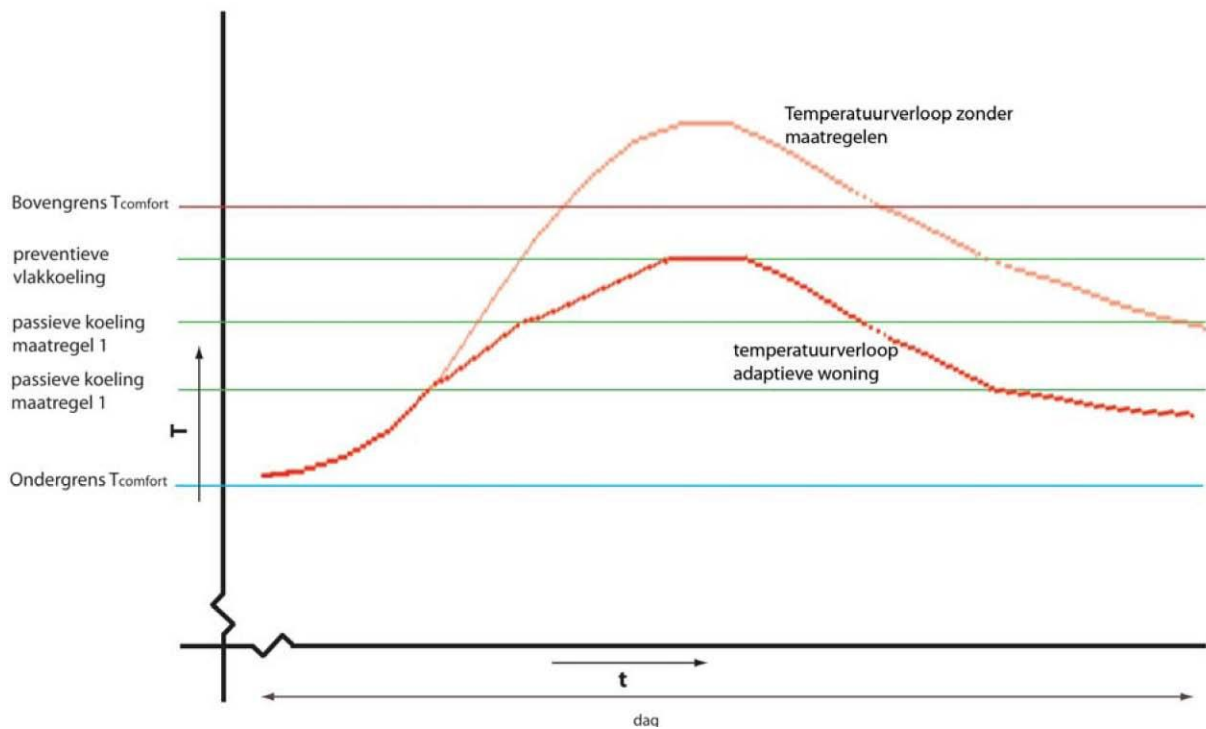
Figuur 5-7: Dynamisch-thermische van gebouwen eigenschappen gevisualiseerd (Remco Looman, WP2).

In de temperatuurgrenzen die worden aangegeven wordt onderscheid gemaakt tussen het stookseizoen en het zomerseizoen. Het stookseizoen is de periode waarin het lopende gemiddelde van de buitentemperatuur zodanig laag ligt, dat de temperatuur binnenshuis niet de comforttemperatuur bereikt die het volgens de Adaptieve Comfortmodellen zou moeten zijn, zonder aanvullende verwarming. Dit kan verschillen per woning, door verschillen in mate van isolatie van de gevel, warmteverlies door infiltratie en in mindere mate de thermische massa (zie ook WP2, Remco Looman). Bovendien kan per huishouden de gevraagde comforttemperatuur verschillen. Dit stookseizoen zal dus per situatie bepaald moeten worden. Door middel van simulatie kan per woningtype en gezinssamenstelling een voorspelling gemaakt worden waar deze grenswaarde voor het lopende gemiddelde ligt.

Het tussenseizoen is die periode waarin zowel een warmte als een koude vraag kan zijn. Het zomerseizoen is die periode waarin eventuele maatregelen toegepast dienen te worden tegen oververhitting.

5.3.3 Het zomerseizoen

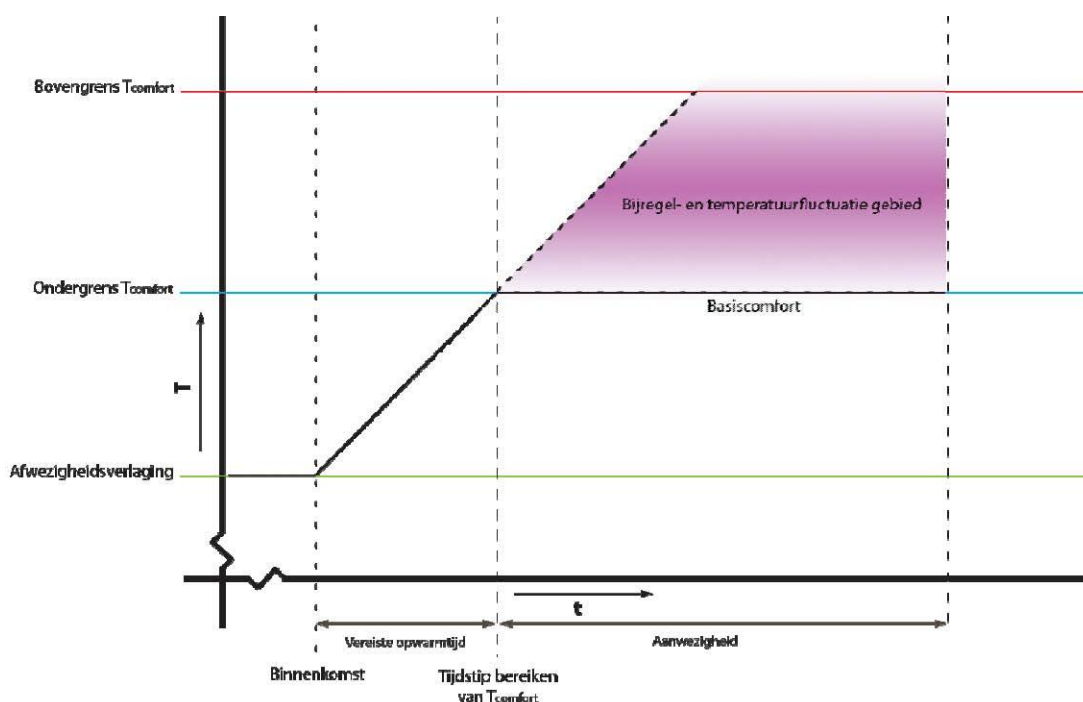
Het zomerseizoen verschilt vooral van het stookseizoen omdat de aandacht erop gericht is actieve koeling geheel te vermijden door met passieve middelen te zorgen dat de bovengrens van de comforttemperatuur niet overschreden wordt (ook niet bij afwezigheid). Deze passieve maatregelen zijn echter traag en kunnen niet voorkomen dat op het moment van inschakelen de temperatuur nog doorstijgt. Echter deze maatregelen kosten, afgezien van beperkte hulpenergie voor bijvoorbeeld ventilatoren, geen energie en zullen dan ook preventief ingezet worden, wanneer de temperatuur de bovengrens nog niet bereikt heeft maar wel stijgend is en ook tijdens afwezigheid. Het Nederlandse klimaat is geschikt om woningen te realiseren waarin tenminste 95% van de tijd van het jaar het gevraagde binnenklimaat op deze manier verzorgd kan worden. Net als bij het opwarmingsgedrag, varieert per woningtype het afkoelgedrag. Per woningtype zal dus bepaald moeten worden door simulaties bij welke temperatuur preventief passief gekoeld moet worden om de temperatuur niet te laten stijgen tot boven de temperatuurgrens.



Figuur 5-8: Voorbeeld van temperatuurverloop over een dag bij voorgestelde strategie van passief en preventief “koelen”.

5.3.4 Het stookseizoen

Gelijk aan het zomerseizoen en het tussenseizoen worden eerst alle middelen ingezet om, in het geval de buitentemperatuur onder de comforttemperatuur ligt, zoveel mogelijk warmte binnen te houden en eventuele zonnewarmte direct te benutten, onder andere door de maatregelen voorgesteld in Werkpakket 2. Indien dit niet voldoende is en verwarming nodig is, heeft het verwarmingspatroon bij voorkeur een volgend verloop (met oog op comfort en energiebesparing/beperking opgesteld vermogen):



Figuur 5-9; Gewenst verwarmingsverloop adaptieve woning

In principe kan de verwarming bij het verlaten van de kamer meteen uitgeschakeld worden. De temperatuur zal niet snel zakken in een goed geïsoleerde woning. Het kan voor een systeem echter wenselijk zijn om een bepaalde minimum tijd te hebben dat deze aan of uit is. Dit is bijvoorbeeld bij een warmtepomp het geval. Dan kan het raadzaam zijn om een op het systeem aangepaste tijd te hanteren van uitschakelen na het verlaten van de kamer.

Mits de mogelijkheid bestaat tot corrigeren van de temperatuur binnen het paarse gebied en het verloop voorspelbaar is (bijvoorbeeld stijgend in de loop van de dag) mag binnen deze grenzen de temperatuur fluctueren met een snelheid van max 2K/h. Deze snelheid wordt nauwelijks opgemerkt en heeft geen negatief effect op comfort en productiviteit [47]. In woningen bewoond door ouderen en minder validen wordt aangenomen dat dit maximaal 1K/h mag zijn.

Het is raadzaam om niet te verwarmen boven de 24 graden in het stookseizoen. Buiten het feit dat het onnodig veel energie zal kosten, is het ook niet gunstig voor de waargenomen luchtkwaliteit. Hetzelfde geldt voor teveel koelen in de zomer [37].

Vereiste opwarmtijd wordt bepaald door de verandering van de thermische toestand bij binnenkomst en in mindere mate de afname van het metabolisme na binnenkomst (lopen/fietsen). Aangenomen wordt vooralsnog dat 15 minuten een goede opwarmtijd is, met de mogelijkheid deze te verkorten tot 5 minuten in het geval dat de woning bewoond wordt door ouderen. Bij de simulaties kan eventueel gekeken worden of dit reëel en haalbaar is; er dient ook een afweging gemaakt te worden tussen geïnstalleerd vermogen en de basistemperatuur op basis van de gewenste opwarmtijd. Deze zal verschillend zijn voor trage (zware) gebouwen en snelle (lichte) gebouwen. Dit zal mede geoptimaliseerd worden door de simulaties.

Uitgegaan wordt van de situatie dat er verwarmd wordt naar het minimum comfortniveau (voor woonvertrekken 19 graden volgens Figuur 4-1 (bladzijde 15) en dat vanaf het bereik van deze temperatuur naar behoefte bijgeregeld kan worden (naar beneden mag ook, maar is niet waarschijnlijk). De temperatuur mag zoals gezegd beperkt fluctueren binnen de comfortgrenzen door andere factoren (zoals afkoeling buiten, zoninstraling, interne warmtebronnen etc.). Deze bandbreedte functoneert als een zogenaamde *dode zone* van temperatuur, welke gelijk ligt aan de bandbreedtes, voorgesteld bij de temperatuurgrenzen voor de verschillende vertrekken. Ook deze dode zone kan geregeld worden naarmate personen gevoeliger zijn voor fluctuaties, bijvoorbeeld voor ouderen.

5.3.5 Het tussenseizoen

In de tussenseizoenen zal, afhankelijk van de warmte of koudevraag een combinatie van strategieën toegepast worden. Sommige passieve maatregelen kunnen echter seizoensgebonden variëren, zoals thermische massa. Juist in de tussenseizoenen, waar de vraag kan variëren tussen koude en warmtevraag kan tijdelijke opslag van warmte uitkomst bieden.

5.4 Comfortgrenzen algemeen

De aangegeven temperaturen zijn operationele temperaturen. Mits het temperatuurverschil tussen de vlakken alsook tussen de vlakken en de luchttemperatuur niet te groot is (zie tabellen), kan de luchttemperatuur dus lager zijn dan het setpoint in combinatie met een hogere stralingstemperatuur. Dit kan dus ook een relatief lage binnenluchttemperatuur betekenen met gebruikmaking van de zoninstraling.

Category	Radiant temperature asymmetry °C			
	Warm ceiling	Cool wall	Cool ceiling	Warm wall
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

Tabel 5-1: Toegestane verschil tussen luchttemperatuur en de verschillende vlakken (stralingsasymetrie) ter voorkoming van lokaal discomfort (A, B en C zijn verschillende comfortklassen)

Category	Floor surface temperature range °C
A	19 to 29
B	19 to 29
C	17 to 31

Tabel 5-2: Toegestane vloertemperaturen bij vloerverwarming (en koeling) ter voorkoming van lokaal discomfort. (Tabellen afkomstig uit ISO 7730, pagina's 16 en 17)

De waarden in tabel 5-1 dienen gezien te worden als veiligheidsmarges. De temperatuurverschillen zijn gebaseerd op laboratoriumonderzoek en dienen bij voortschrijdend inzicht uit lopende onderzoeksprojecten aangepast of uitgebreid te worden. De temperaturen die hier rood omlijnd staan aangegeven worden in deze studie aangehouden.

In de comfortvergelijkingen die hieronder volgen wordt de bandbreedte weergegeven waarbinnen volgens de Adaptieve Comfortmodellen verwacht wordt dat 80% van de gebruikers geen discomfort ervaart. Dit zegt echter nog niet alles over de voorkeurstemperatuur op individueel niveau. 90% van de gebruikers zal geen discomfort ervaren in het donkerpaarse gebied, maar er zullen op individuele basis ook mensen zijn die juist een voorkeur hebben voor een wat hogere of lagere temperatuur (lichtpaarse gebieden). Er zullen ook mensen zijn die een voorkeur hebben voor een temperatuur buiten beide gebieden, maar dit zal statistisch gezien een verwaarloosbare groep zijn. Dit zal in de praktijk overigens slechts leiden tot enige extra energiebesparing omdat er minder geconditioneerd behoeft te worden. Overconditioneren van een ruimte wordt om andere redenen dan comfort overigens al ontraden (zoals eerder aangegeven), terwijl “onderconditioneren” zal worden gestimuleerd.

5.4.1 Woonvertrekken

In de zomersituatie (waarbij uitgegaan wordt van het voorkomen van actieve koeling) wordt de volgende relatie aangehouden tussen het heersende buitenklimaat en de comforttemperatuur [19] (zie ook 5.1.2).

$$T_{i_{\max}} = 0,33T_{rm} + 21,8$$

$$T_{i_{\text{gemiddeld}}} = 0,33T_{rm} + 18,8$$

$$T_{i_{\min}} = 0,33T_{rm} + 15,8$$

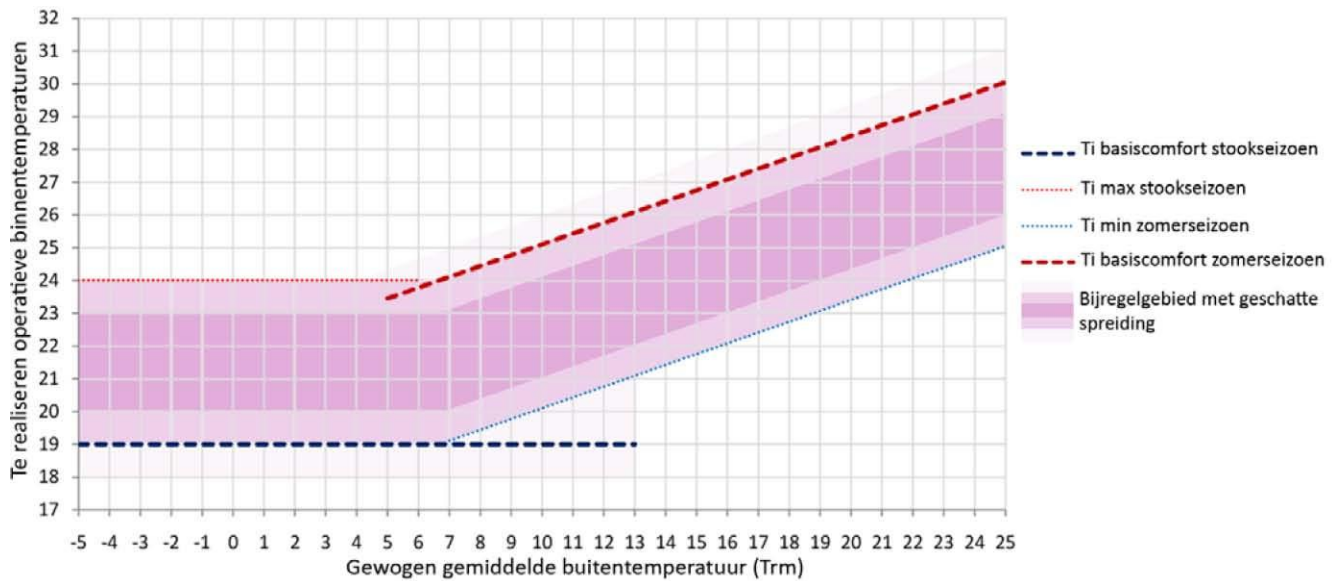
$$T_{i_{p_n}} = 0,33T_{rm} + C_{p_n}$$

$${}_nT_{rm} = 0,2 \cdot {}_{\text{tod-1}} + 0,8 \cdot {}_{n-1}T_{rm}$$

Met: $T_{i_{\max}}$ = Maximaal toegestane temperatuur $T_{i_{\text{gemiddeld}}}$ = Gemiddelde comfort temperatuur (setpoint) $T_{i_{\min}}$ = Minimaal toegestane temperatuur $T_{i_{p_n}}$ = Gevraagde comfort temperatuur persoon n (setpoint) ${}_nT_{rm}$ = Lopende gemiddelde buitentemperatuur* over n dagen

In het stookseizoen moet de temperatuur tussen de 19 °C en de 24 °C liggen. Voor hogere MET waarden bij het uitvoeren van bijvoorbeeld huishoudelijke taken kan de volgende correctie worden gehanteerd: $\Delta T_n = -8 \cdot (M - 1,4)$

De “running mean outdoor temperature” is een exponentieel gemiddelde van de daggemiddelde buitentemperatuur over de voorgelegen dagen waarbij verder terug in de tijd gelegen daggemiddelde waarden steeds minder meetellen. Zie bijvoorbeeld [19].



Figuur 5-10: Woonvertrekken: te regelen basiscomforttemperaturen en het bijregelgebied met de globale spreiding van waarschijnlijkheid bij een gemiddeld metabolime van 1,2 MET, afhankelijk van het heersende buitenklimaat

De variatie van T_n over de verschillende mensen bij de gebruikers wordt mede bepaald door verschil in gevoeligheid voor warmte/koude, verschil in activiteit en verschil in kledinggedrag. Het is niet van belang deze precies te voorspellen, maar om te onderzoeken wat deze verschillende waarden betekenen voor het energiegebruik en als randvoorwaarden voor de systemen. Het kan voornamelijk interessant zijn wat het betekent voor het gedrag van de installaties (regeling, opwarm/afkoelsnelheid en grootte van de verschillende bediende “zones”) als twee verschillende personen in 1 woning leven.

5.4.2 Slaapkamers

Tijdens de slaap is men het meest gevoelig voor “warm discomfort”. Koude wordt doorgaans opgevangen door een dekbed of deken. De comforttemperatuur ligt daarom lager en bovendien zijn de adaptieve mogelijkheden *tijdens* de slaap beperkt [35]. De studie van Peeters [41] geeft wel een indicatie voor de comfortvergelijking voor slaapkamers in de Belgische woningen onderzocht in deze studie. Opgemerkt dient te worden dat dit gemeten temperaturen zijn en dat deze in principe minder zeggen over de comforttemperatuur. Men ziet hierbij dan ook een grotere spreiding dan bij de comforttemperaturen van de SCATS database [19]:

$$T_n = 16 \text{ voor } T_{e,ref} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_n = 16 + 0,23 \cdot T_{e,ref} \text{ voor } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_{e,ref} < 12,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_n = 9,18 + 0,77 \cdot T_{e,ref} \text{ voor } 12,6 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_{e,ref} < 21,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

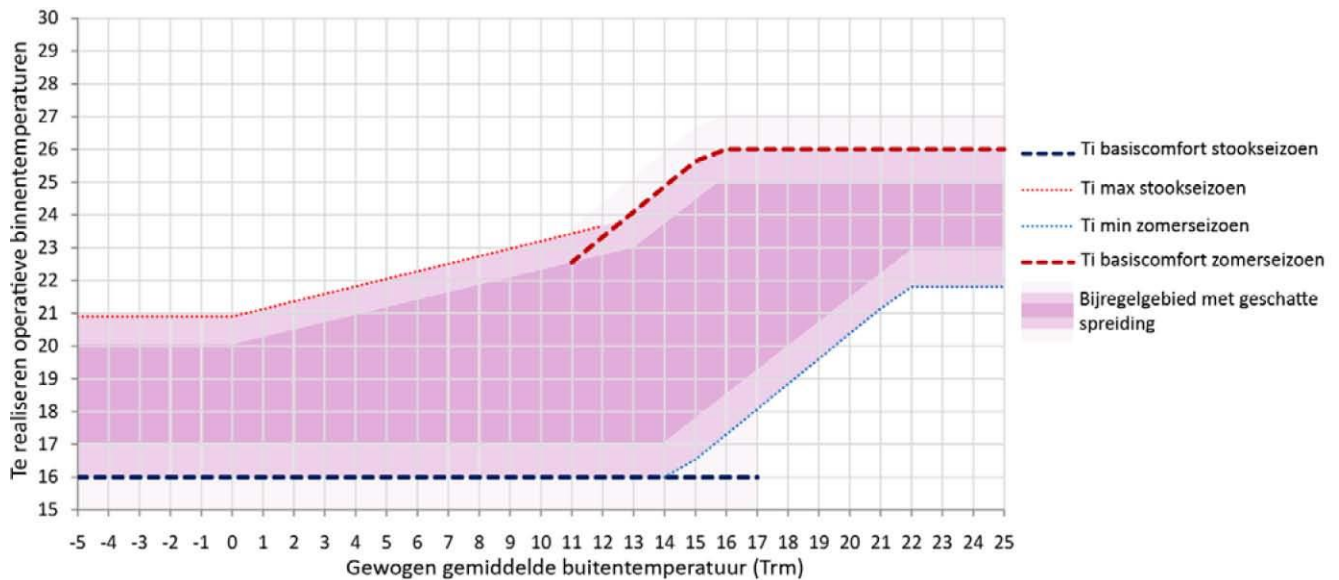
$$T_n = 26 \text{ voor } T_{e,ref} \geq 21,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De boven en ondergrenzen worden als volgt berekend:

$$T_{\text{upper}} = \min(26, T_n + 4,9)$$

$$T_{\text{lower}} = \max(16, T_n - 4,2)$$

(Met een absolute ondergrens van 16 °C en een bovengrens van 26 °C)



Figuur 5-11: Slaapvertrekken: te regelen basiscomforttemperaturen en het bijregelgebied met de globale spreiding van waarschijnlijkheid, afhankelijk van het heersende buitenklimaat

Deze waarden worden voorlopig aangenomen voor het comfort in slaapvertrekken. Net als bij woonvertrekken geldt voor de individuele comforttemperatuur dat de constanten gevarieerd kunnen worden.

Net als bij de woonvertrekken kan een persoonlijke voorkeurstemperatuur bepaald worden door de constanten in de bovenstaande vergelijkingen te variëren.

NB: In slaapkamers kunnen ook andere activiteiten plaatsvinden zoals studeren en werken. In het geval dat dit voorkomt dienen de temperatuurgrenzen voor woonvertrekken aangehouden te worden. Aangezien dit enkele graden kan schelen in comforttemperatuur kan dit een extra eis vormen voor de slaapkamers en de installaties daarvoor.

5.4.3 Badkamers

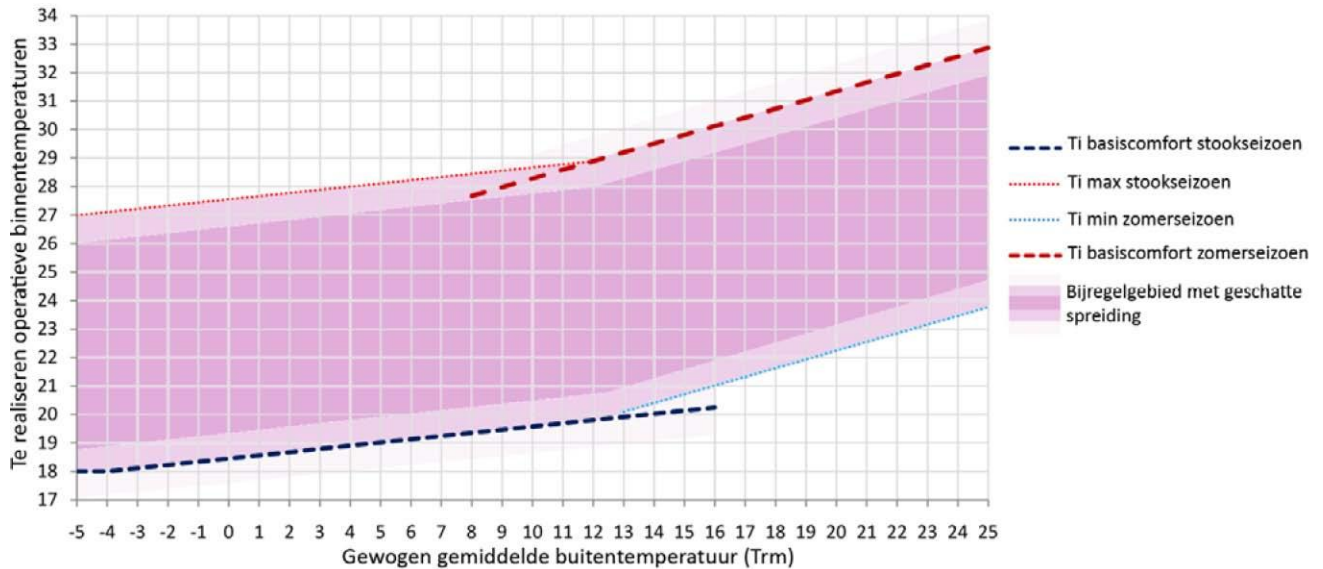
In een badkamer is men ontkleed en is men dus vooral gevoelig voor discomfort door koude. Het verblijf is meestal kort en daardoor is men minder gevoelig voor te hoge temperaturen. Voor een badkamer wordt uitgegaan van een snelle en plaatselijke verwarming. Door geleiding zal bij blote voeten veel warmte verloren gaan door de vloer. Een (snelle) vloerverwarming heeft daarom de voorkeur, aangezien men slechts korte warmte nodig heeft en behalve via de algemene verwarming ook vooral onder de voeten. Voorlopig worden de comfortalgoritmen van Peeters aangenomen voor het comfort in badkamers.

De comfort algoritmen van Peeters voor langer verblijf in badkamers zijn als volgt;

$$T_n = 22,65 + 0,112 \cdot T_{e,ref} \text{ voor } T_{e,ref} < 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_n = 20,32 + 0,306 \cdot T_{e,ref} \text{ voor } T_{e,ref} \geq 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

De bandbreedtes kunnen, net als bij woonvertrekken, berekend worden met de bovenstaande formules.



Figuur 5-12: Badkamers: te regelen basiscomforttemperaturen en het bijregelgebied met de globale spreiding van waarschijnlijkheid, afhankelijk van het heersende buitenklimaat

5.5 Ventilatie

Voor ventilatie worden de richtlijnen zoals gegeven in de rapportage van TNO (werkpakket 1) gebruikt. Ventilatie wordt slechts behandeld voor wat betreft de invloed op de temperatuur van de vertrekken en is daarmee meer een randvoorwaarde dan een rechtstreeks te regelen parameter. Wel kan ventilatie ingezet worden vanwege het koelend effect. Als er een warmtevraag is wordt dus de ventilatie geminimaliseerd op het niveau dat voor personen noodzakelijk is. Als er een koelvraag is, zal men eerst proberen dit op te lossen door extra ventilatie. Hierbij moet ook gedacht worden aan preventieve koeling door nachtventilatie.

Ventilatiestrategieën (overgenomen uit het rapport van TNO; WP 1.2 en 1.3):

Daar waar mensen aanwezig zijn kan worden geregeld op de vraag van personen (strategie niveau A). Op plaatsen waar vocht wordt geproduceerd zal meestal de relatieve vochtigheid bepalend zijn voor de ventilatie (strategie niveau B). Zijn er geen mensen aanwezig dan wordt de vraag geen nul, maar het minimum dat nodig is om de bouw- en inrichtingsmaterialen naar een verantwoord niveau terug te dringen (strategie niveau C).

Niveau A: Bij aanwezigheid van mensen is CO₂ als indicator van door de mens geproduceerde verontreinigingen het meest geschikt. Dit zal leiden tot een aanvaardbaar geurniveau en vrijwel altijd tot een aanvaardbaar hygiënisch niveau. In de simulaties wordt alleen de aanwezigheid van personen

geregistreerd en niet de CO₂ productie. Een andere mogelijkheid is om het Bouwbesluitniveau aan te houden: 0,9 dm³/s.m² verblijfsgebied. Ook is het mogelijk een hoeveelheid per gezinslid te geven bijvoorbeeld aan de hand van het activiteitsniveau. Tijdens “opstoken” kan de eis eventueel tijdelijk tot een minimum waarde worden terug gebracht.

Niveau B: Bij gebruik van de douche en de keuken dient het bouwbesluitniveau (*14 dm³/s voor de badkamer; 21 dm³/s voor keuken*) aangehouden te worden voor de afvoer van vochtige lucht en geurtjes, met een “nadraaitijd” van 2 uur. De aanvoer van de lucht komt vanuit de rest van de woning.

Niveau C: Volgens het Bouwbesluit is een minimumventilatie vereist van *0,15 dm³/s.m²* bij afwezigheid, voor de gehele gebruiksoppervlakte. Uit onderzoek van TNO blijkt dat dit voldoende is voor het voorkomen van vochtproblemen en te hoge concentraties door VOC's mits voor de hele woning een minimum wordt aangehouden van *6 dm³/s* per gezinslid.

Toilet: Minimaal *3 dm³/s* en bij gebruik *7 dm³/s*, met een nadraaitijd van 30 minuten. Voor de simulatie ontbreekt de informatie over toiletbezoek en gezien de geringe invloed van de ventilatie van het toilet op de temperatuur, zal in de simulaties altijd een niveau aangehouden worden van *7 dm³/s*.

5.6 Profielen

Ten behoeve van de simulaties zijn op 15 minuten basis een aantal profielen samengesteld met aanwezigheid en activiteit per persoon voor verschillende huishoudsamenstellingen. De profielen zijn gegeven voor een week. Samen met de voorkeuren voor een hoge temperatuur of een lage temperatuur kan daarmee per kwartier de warmtebehoefte worden berekend, waarop de installatie geregeld dient te worden. Door een aantal wezenlijk verschillende profielen te nemen kan bepaald worden wat de bandbreedte aan comfortvraag kan zijn bij een bepaalde gebouwconstructie en bij een bepaalde installatie en vice versa. Afwijkingen en weken van afwezigheid worden vooralsnog niet meegenomen, maar behoren wel tot de mogelijkheden van onderzoek.

5.7 Exergetische analyse

5.7.1 Definities en begrippen bij exergieanalyse

5.7.1.1 Energie en de 1e wet van de thermodynamica

Energie kent vele verschijningsvormen, zoals elektrische energie, chemische energie, potentiële energie, kinetische energie, warmte en arbeid, waarbij de twee laatste eigenlijk manieren van energieoverdracht zijn. Wanneer de ene vorm van energie in de andere vorm omgezet wordt, gaat er geen energie verloren, volgens de eerste wet van de thermodynamica.

Maar sommige vormen van energie kunnen slechts in beperkte mate worden omgezet in andere vormen van energie, volgens de 2^e wet van de thermodynamica. Het begrip energie en de 1e wet van de thermodynamica doen geen uitspraak over de mogelijke omzetting van energie naar een andere vorm van energie.

5.7.1.2 Exergie en de 2e wet van de thermodynamica

Exergie is gebaseerd op de tweede wet van de thermodynamica en richt zich op de ideale omzetbaarheid van de ene energievorm in de andere. Het is gedefinieerd als *de maximale theoretische arbeid die verkregen kan worden van een systeem als het in thermodynamisch evenwicht met de referentieomgeving komt*. De exergie is dus de maximale hoeveelheid arbeid die verkregen kan worden van een ideale omzetting. In het kort kan exergie gedefinieerd worden als 'ideaal arbeidspotentieel'.

Volgens de tweede wet van de thermodynamica gaat er geen exergie verloren in ideale processen, wat betekent dat het uitgaande arbeidspotentieel gelijk is aan het ingaande arbeidspotentieel. Een thermodynamisch ideaal proces is daarom een omkeerbaar proces; de oorspronkelijke situatie kan opnieuw verkregen worden als ideale omzettingen plaatsgevonden hebben. In werkelijke processen echter wordt exergie altijd vernietigd, soms weinig, maar vaak in grote hoeveelheden.

5.7.1.3 De toegevoegde waarde van exergie analyse

De exergetische analyse identificeert en kwantificeert de vernietiging van exergie in een proces. Deze verliezen in 'kwaliteit van energie' worden niet onderkend in een energetische analyse, maar geven een maat hoe veel het proces theoretisch verbeterd kan worden. Dit betekent: hoeveel meer output in theorie mogelijk zou kunnen zijn, of hoeveel minder input theoretisch nodig zou zijn. Dit inzicht in thermodynamische verliezen en dus thermodynamische verbetering van potentieel is een belangrijke toegevoegde waarde van exergetische analyse.

5.7.1.4 Exergie factor

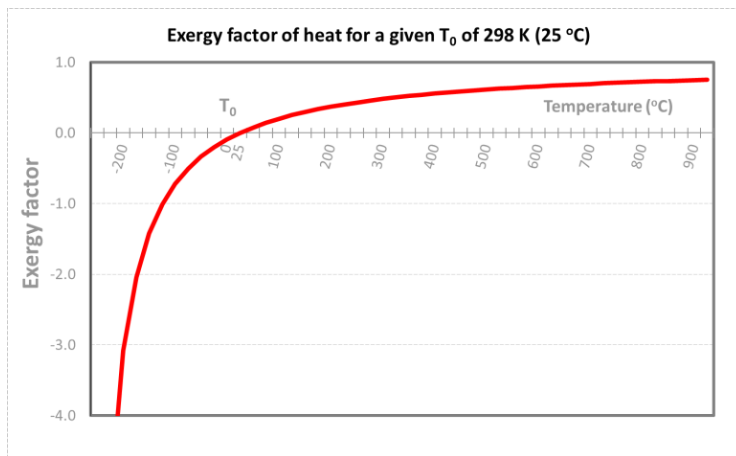
In literatuur wordt vaak naar exergie verwezen als 'de kwaliteit van energie'. Deze kwaliteit is dus gemeten in ideaal arbeidspotentieel (of exergie) per eenheid van energie. De exergiefactor (of kwaliteitsfactor) wordt gedefinieerd als de verhouding tussen exergie en energie bij een gegeven energievorm. De exergiefactor van elektriciteit, kinetische en potentiële energie is 1, en de exergiefactor van chemische energie (zoals bijvoorbeeld opgeslagen in natuurlijk gas) zit dichtbij 1.

De exergiefactor van warmte is afhankelijk van de temperatuur van de warmtebron volgens de volgende vergelijking:

$$\frac{Ex}{Q} = 1 - \frac{T_0}{T} [K]$$

waarin T_0 de omgevingstemperatuur is en T de temperatuur van de warmtebron.

Deze vergelijking is gebaseerd op het Carnot-proces, wat een ideaal (en dus omkeerbaar) proces van thermisch vermogen is. Voor de exergetische berekening is aangenomen dat de omgeving een van de thermische reservoirs is. De vergelijking is getoond in de figuur hieronder.³



Figuur 5-13.: de exergiefactor van warmte. De negatieve waarde van de exergiefactor voor temperaturen $<T_0$ betekent dat de exergieoverdracht van warmte bij deze temperaturen de andere kant op gaat dan de energieoverdracht.

Figuur 5.13 laat zien dat:

- Wanneer T oneindig benadert, nadert de exergiefactor naar 1, wat betekent dat warmteoverdracht bij hoge temperaturen theoretisch volledig kan worden omgezet in arbeid.
- Wanneer $T < T_0$, is de exergiefactor (of kwaliteitsfactor) negatief. Omdat 'kou' een gebrek aan energie is in verhouding tot de omgeving, is dit gedefinieerd als negatief, wat betekent dat een koud reservoir ook in staat is arbeid te produceren.
- Wanneer T nadert tot 0 graden Kelvin, nadert de exergiefactor (of kwaliteitsfactor) min oneindig. Dit betekent dat warmteoverdracht naar koellichamen met erg lage temperaturen (indien beschikbaar, bijvoorbeeld cryogene gassen) een grote hoeveelheid arbeid kan verrichten. Dit betekent ook dat een grote hoeveelheid arbeid moet worden aangeleverd om lage temperaturen te bereiken.
- De exergiefactor bij temperaturen dicht bij de omgevingstemperatuur is erg laag. Dit betekent dat de vraag voor verwarming en koeling in de gebouwde omgeving weinig exergie vertegenwoordigt en zou theoretisch geproduceerd kunnen worden met een kleine arbeid input.

In paragraaf 8.5 is een exergetische analyse toegepast op de warmtebehoefte van een woning.

³ Soms worden in de vergelijking voor de exergiefactor ook absoluutstrepen gebruikt ($Ex/Q = |1 - T_0/T|$). Hiermee wordt de exergiefactor bij $T < T_0$ ook positief. Door de absoluut tekens gaat de informatie over de richting van het exergieoverdracht verloren, daarom moet deze vergelijking met enige voorzichtigheid worden toegepast.

6 Interactie klimaat en gebouw – klimaatactieve ontwerpstrategie

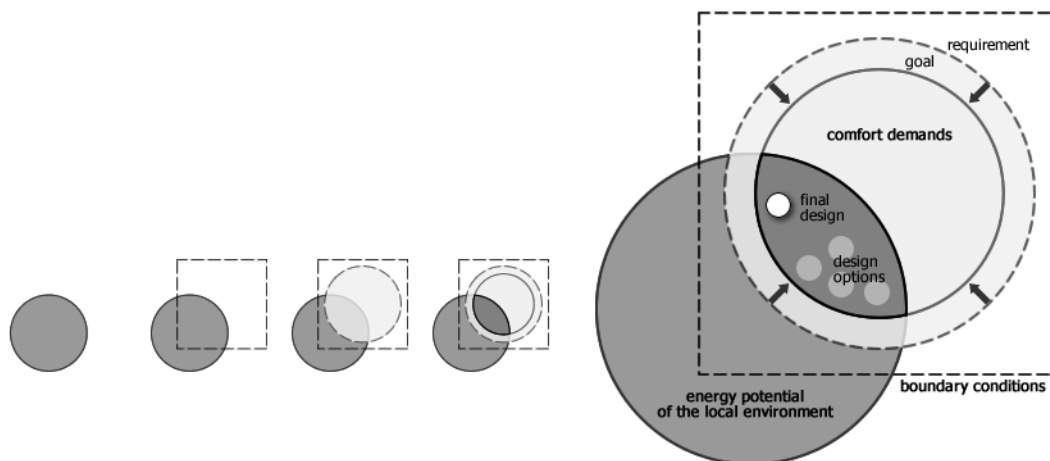
6.1 Ontwerpstrategie

In dit hoofdstuk wordt er een klimaatactieve ontwerpstrategie voorgesteld, voor het toepassen van het maximale potentieel van klimaatactieve bouwcomponenten bij het ontwerpen of renoveren van huizen. De cruciale informatie die van invloed is op mogelijke consequenties van de gemaakte beslissingen wordt gedetailleerder onderzocht, aangezien dit nodig is voor verdere ontwikkeling van het ontwerpproces.

De mogelijke toepassing van deze strategie wordt geïllustreerd door een uitwerking van een onderzoek verricht door Remco Looman [33]. Dit onderzoek heeft als beginsel de verbetering van het thermische milieu in een standaardgeval, gebaseerd op een alledaags gebouwontwerp, door het beoordelen van een verscheidenheid aan samengevoegde ontwerp oplossingen als een alternatief voor mechanische comfortsystemen.

6.2 Inleiding

Een klimaatactief gebouw vormt een geïntegreerd bouwconcept dat contextuele, architectonische en technische oplossingen combineert in één ontwerp, dat synergie creëert tussen comforteisen en het energie aanbod. Door het complexe karakter van dergelijke ontwerp opgaven zal normaal gesproken meer dan één toepasbare oplossing aanwezig zijn. Al deze ontwerp mogelijkheden zijn onderworpen aan specifieke randvoorwaarden, gedefinieerd als ontwerpdoelen en -beperkingen, bepaald door wetgeving of eisen van de cliënt. In klimaatactieve ontwerpen is het primaire doel het genereren van een bevredigend (en functioneel) binnenklimaat door het gebruikmaken van de potentiële energie van de lokale omgeving (figuur 6.1).



Figuur 6-1: Schematische weergave van mogelijke ontwerp oplossingen binnen de gegeven delen en randvoorwaarden bij "climate responsive design".

Randvoorwaarden, vanuit regelgeving of eisen vanuit de opdrachtgever kunnen het gebruik van sommige potentiële oplossingen beperken. De minimum comforteisen (als een primair ontwerpdoel) omvatten geven ruimte voor een hele set ontwerp oplossingen, die terug gebracht worden in aantal als er meer ambitieuze ontwerpdoelen worden gesteld.

De randvoorwaarden van het ontwerp kunnen het gebruik van potentiële energie uit de omgeving beperken⁴. Deze voorwaarden behelzen beperkingen op onder andere comfort, bereikbaarheid, functionaliteit, veiligheid en duurzaamheid. Sommige van deze voorwaarden zijn gedefinieerd in reglementen en zijn aldus juridisch bindend. Andere voorwaarden, die door de opdrachtgever zijn opgelegd, kunnen onderhandelbaar zijn. Omdat comfort het uitgangspunt van klimaatactief ontwerpen is, omvatten de comforteisen de uiteindelijke reeks aan ontwerp mogelijkheden. Wanneer de opdrachtgever of het ontwerp team ambitieuzer is, kunnen ze de comforteisen op een hoger niveau brengen door het stellen van een einddoel. Hierdoor wordt het aantal ontwerp mogelijkheden beperkt. Het definitieve ontwerp is de geselecteerde ontwerpoptie die het beste voldoet aan secundaire ontwerpdoelen zoals financiën, prestaties en architectuur. Zoals eerder gemeld, integreert een klimaatactief gebouwconcept verschillende contextuele, architectonische en technische ontwerp oplossingen tot een uniform ontwerp. Het is daarom van fundamenteel belang om het klimaatactieve concept te ontwikkelen (d.w.z. een energieconcept dat de principes van een klimaatactief ontwerp volgt) in de eerste fases van het ontwerp proces. In de volgende paragraaf wordt een ontwerpstrategie voorgesteld en de essentiële informatie, benodigd voor het volwaardig ontwikkelen van een klimaatactief ontwerpconcept, wordt onderzocht en besproken.

6.3 Klimaatactieve ontwerpstrategie

Elk (typisch) proces van het genereren van ontwerp mogelijkheden die aan de genoemde ontwerpdoelen en voorwaarden voldoen is opgedeeld in vier onderdelen:

- Analyse; verkennen van mogelijkheden en beperkingen
- Conceptontwikkeling; het daadwerkelijke proces van conceptontwerpen – genereren van ontwerp mogelijkheden
- Beoordeling; evaluatie van de concepten
- Selectie; de selectie van de ontwerp mogelijkheden van voorkeur en de basis voor het definitieve ontwerp.

6.3.1 Analyse

Voordat het echte proces van conceptontwikkeling begint, moeten alle energie- en comfortgerelateerde mogelijkheden en beperkingen van de ontwerp opdracht worden onderzocht. Het speelveld dat alle mogelijke ontwerp oplossingen bevat is hiermee uitgezet. Deze eerste analytische stap creëert de initiële input voor de conceptontwikkeling. Deze analytische fase kan worden verdeeld in de volgende onderdelen:

- identificeren van ruimtelijke en functionele randvoorwaarden
- identificeren van gebruikersgerelateerde doelen en beperkingen
- inventarisatie van het lokale klimaatpotentieel

⁴ Bijvoorbeeld kan de Waterwet verbieden dat er gebruik wordt gemaakt van grond- of oppervlaktewater. Andere voorbeelden zijn reglementen op behoud van monumenten en omgevingserfgoed die kunnen leiden tot beperkingen op het gebied van de visuele kwaliteiten van het gebouw, en die aldus beperkend zijn voor de toepassing van sommige klimaatactieve bouwcomponenten.

Identificeren van ruimtelijke en functionele randvoorwaarden

Het programma van eisen, de specificatie van de ontwerptaak, bevat veel ruimtelijke en functionele eisen die van invloed zijn op het energieconcept. Bijvoorbeeld de vereiste bouwdichtheid die bepaalt welk deel van het energiepotentieel van een bepaald stuk grond elk van de bouweenheden kan 'opeisen', aangezien er geen absolute hoeveelheid energie gewonnen kan worden. Het identificeren van deze eisen en de consequenties op het energieconcept is de eerste analytische stap. De ruimtelijke en functionele randvoorwaarden zijn aangegeven in [33, hoofdstuk 2] en samengevat in tabel 6-1.

Tabel 6-1: Ruimtelijke en functionele randvoorwaarden en de gevolgen daarvan op het energie concept.

boundary condition	description	design considerations
site selection and planning	The energy potential of one site may be better fit for a certain design problem than the other. However, in many design cases the plot is already decided for by the principal. This only leaves site-specific energy potential of the selected site to the architect.	<ul style="list-style-type: none"> • Consideration of site specific features such as plot orientation, situation (urban or rural) and potential of (existing) landform and vegetation.
building density	The total amount of units on a certain plot. With higher densities more units need to benefit from the same energy potential.	<ul style="list-style-type: none"> • Increased densities require more stringent measures on reducing energy demand. • Higher densities allow sharing of design solutions that can boost effectiveness as opposed to when applied on the scale of a single building unit. • Higher densities allow (more) cost-effective application of shared solutions.
organisation and stacking of dwellings	For example apartment building, terraced dwellings or detached house. The dwelling type determines the ratio between specific areas of the building skin (ground floor, façade, roof) available for energy harvest.	<ul style="list-style-type: none"> • Apartments have a low unit-specific surface exposed to ambient conditions, no specific surface to the soil and large surface adjacent to other apartments. Energy is therefore particularly to be harvested at the façade or through communal systems. • A detached house has large surfaces exposed to ambient conditions, a significant surface exposed to the soil and no surface adjacent to other buildings. This makes that energy can be harvested virtually from any side of the building. However, as a result, the large effective heat loss area requires special attention to limit energy losses.
target group	Presence and related comfort requirements differ from group to group: families with children, two-income couples with no children, single persons, elderly, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Elderly spend most time indoors and require a smaller band width in which the comfort zone may vary. This would put more emphasis on sustained retention of certain comfort levels. • Two-income families with no children and single persons use the house (and its living spaces) more intermittently, which would benefit more from a decentralized demand-driven comfort control strategy. • Families with children will use the house more continuous, occupying different zones at the same time. This would call for an individual operable demand-driven control strategy.
price range	The price range of the development (e.g. social housing or penthouses) partly set the available budget for comfort-control related investments.	<ul style="list-style-type: none"> • Future occupants of social housing projects are best helped by low operational costs. • Development of more expensive dwellings give an opportunity to apply more expensive solutions.

Identificeren van gebruikergerelateerde doelen en beperkingen

Wat we definiëren als comfortabel heeft verstrekende gevolgen voor de manier waarop we gebouwen ontwerpen en hoe we deze gebruiken, en dus ook het energiegebruik voor het controleren van een binnenklimaat voor het behouden van een bepaald comfortniveau. Bijvoorbeeld het toepassen van passieve zonnewarmte direct gerelateerd aan de daadwerkelijke warmte-eis, en dus geoptimaliseerd voor de meest veeleisende situaties, en alleen aangevuld met strategieën voor thermische buffering en opslag. De identificatie van de meeste gebruikergerelateerde doelen en beperkingen (bijvoorbeeld de minimale binnenklimaat-eisen, gebruikergerelateerde comforteisen) vormen een beginsel voor klimaatactief ontwerpen. Deze zijn onderzocht in [33, hoofdstuk 2] en bijeengebracht in tabel 6-2.

Tabel 6-2: comfort gerelateerde randvoorwaarden en de gevolgen daarvan op het energie concept.

comfort-related parameter	description	design considerations
Thermal comfort requirements and target values (traditional vs. adaptive)	Determines the general heating and cooling strategy.	<ul style="list-style-type: none"> Tune passive heating strategies to the heating demand, thus optimize for the times most needed, and complement with strategies of conserving or storing energy. Group zones with similar requirements and position them in the building plan (orientation, floor level) according to the energy offer.
Summer comfort	Strategies to prevent and overcome issues of overheating.	<ul style="list-style-type: none"> Prevent issues of overheating by keeping heat out or accelerated discharge of gained heat. Apply passive cooling strategies using lower temperature sources in the surroundings.
Air quality requirements (e.g. maximum CO ₂ concentration)	Ventilation strategy: when and where to ventilate.	<ul style="list-style-type: none"> Eliminate contamination sources as much as possible. Employ demand-control ventilation: design for decentralized ventilation with heat recovery in cold periods.
Humidity requirements	Defines humidity-control measures.	<ul style="list-style-type: none"> Moisture buffering strategies (e.g. hygroscopic interior wall and ceiling finish) is a supplement to typical control strategies based on ventilation. Buffering techniques enable moisture control spread over time, eliminating the need for direct increased ventilation and possible accompanying issues of discomfort.
Acoustic requirements	Acoustical behaviour of elements and finishes	<ul style="list-style-type: none"> Unobstructed flow of (ventilation) air throughout the building should match requirements on noise levels.
Illumination requirements	Defines window size and arrangement, glare protection measures and privacy control.	<ul style="list-style-type: none"> Allowance for sufficient daylight admission in tune with heat transfer (solar access and transmission losses). Special attention to daylight admission is needed in densely built environments. Highly placed windows can be more effective.
User intervention	Adaptive control measures	<ul style="list-style-type: none"> Although it sometimes may seem that adaptive control measures are in conflict with a low-energy strategy, this is not per se true since adaptive control measures improve comfort experience and the acceptance of short-term deviations. A valid climate-responsive concept is able to minimise the negative energy effects of user intervention. In addition users can be made aware of the energy and comfort impact of their actions.

Inventarisatie van het lokale klimaatpotentieel

Het energiepotentieel van het lokale klimaat is een drijvende kracht voor klimaatactief ontwerpen. Dit potentieel, en hoe een gebouwde omgeving zijn microklimaat creëert, is onderzocht in [33, hoofdstuk 2], resulterend in een opsomming van milieu-ontwerpparameters (tabel 6-3). Bijvoorbeeld, de blootstelling van de gebouwschil aan de zon in een stedelijke omgeving, op basis waarvan het potentieel voor passieve of actieve zonnestraling strategie is bepaald. In een dicht bebouwde omgeving is het winnen van zonne-energie beperkt voor de verdiepingen dicht bij het maaiveld. De bovenste verdiepingen en het dak kunnen nog wel goed blootgesteld zijn aan de zonnestraling.

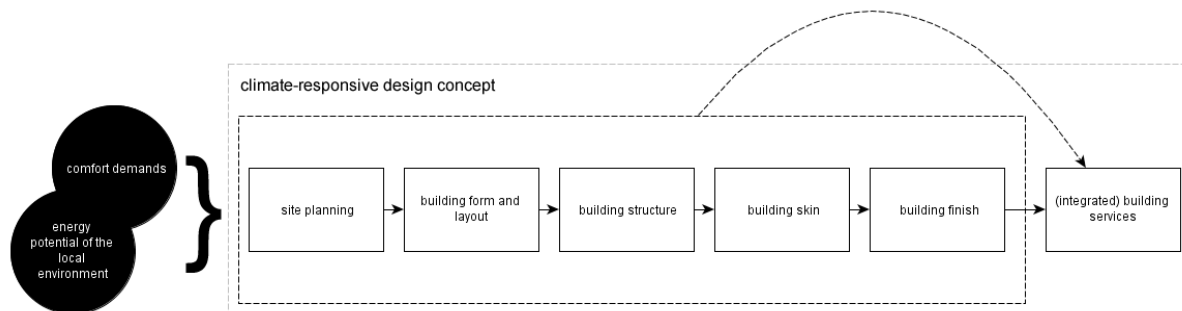
Tabel 6-3: Klimaat en context gerelateerde randvoorwaarden en specifieke aandachtspunten bij de ontwikkeling van een energie concept.

environmental parameter	points of particular attention
Urban pattern, vegetation and solar geometry	Solar access to building envelope (shadow casting, etc.) determines potential for passive and active solar strategies. In densely built areas solar harvest is limited at levels of the building skin low to the ground. The uppermost storeys and the roof can still be well exposed to the sun. On-site vegetation can block sun access to the building, which can be beneficial to the purpose of solar shading.
Urban pattern, landform, vegetation and distribution of wind direction and speed	Wind behaviour in urban canyon and urban canopy determines potential for natural ventilation and wind power. A high density causes natural air to flow over the building rooftops, while limiting the air flow at street level. When no clear prevailing wind direction is available wind is best harvested using a strategy that is able to 'catch' wind from different directions. Landform and vegetation may block wind access to the building, which can be beneficial to the purpose of wind screening.
Annual temperature distribution, soil composition and ground cover	Energy exchange potential of shallow layers of the soil. Soil composition and (soil) temperature at shallow depths follows seasonal trends in air temperature of the location. Directly underneath the building the energy balance is also fed by heat flows from the building.
Average annual temperature, soil composition and groundwater flows	Energy storage potential of deeper layers of the soil. Soil temperatures at depths of 10 m and more are quite stable and close to the average annual air temperature at the location. In addition, groundwater flows affect the energy balance of the soil, either boosting or blowing the heating (or cooling) potential for prolonged periods.
Air temperature distribution (extreme values, mean values) and solar geometry	Primary steering factor of general thermal energy balance of the building. Use a quick-scan method to explore heating and cooling demands of an initial design
Solar path in periods with high chance on overheating	By using a quick-scan method the need for preventive measures according to the time of year and time of day can be mapped. Fixed shading devices then block the solar radiation from corresponding sun angles.
Natural light access to the envelope	Strategic use of daylight minimizes need for additional electric lighting.

6.3.2 Conceptontwikkeling

Na de analytische fase volgt de fase van conceptontwikkeling, waarin geprobeerd wordt om verschillende ontwerpmogelijkheden te generen, opties die voldoen aan de hiervoor genoemde ontwerpeisen op het gebied van energie en comfort. Dit gaat hand in hand met de optimalisatie van de natuurlijke energiebronnen in de gebouwde omgeving. Het startpunt is hier het zodanig inzetten van het gebouw dat het actief deelneemt aan het beheer van alle energiestromen.

Zoals eerder vermeld, is het ontwerp van een dergelijk klimaatactief ontwerp een geïntegreerd concept dat contextuele, architectonische en technische oplossingen combineert. Een grote verbetering van de energie-eis is mogelijk wanneer deze soorten oplossing elkaar aanvullen op een geïntegreerde manier. Dit betekent dat de contextuele oplossingen de basis vormen voor het ontwerp, en dat de architectonische oplossing verder de energievraag vermindert door het profiteren van de natuurlijke energiestromen die ontstaan. Ten slotte, het gebruik van technische oplossingen is een aanvulling op de ruimte en massa van het gebouw die als primaire rol heeft om te bemiddelen tussen het winnen van energie en het leveren van comfort (figuur 6.2).



Figuur 6-2: Schematische representatie van een klimaat actieve ontwerp concept ontwikkeling.

Zoals onderkend in [33, hoofdstuk 7] is het in het vroege ontwerpproces van belang dat de informatie over verborgen energiepotenties of energiedoelen van gebouwcomponenten aan de architect wordt doorgegeven, waardoor mogelijke conflicten als gevolg van specifieke principes of oplossingen al voorgelegd kunnen worden, en door het in kaart brengen van het synergetische effect bij het samenvoegen van ontwerpprincipes en -oplossingen.

Verborgen energiepotenties van gebouwcomponenten

De selectie van ontwerpcomponenten zou moeten beogen om het energieconcept naast het voldoen aan de primaire functies als veiligheid en functionaliteit te plaatsen. Bijvoorbeeld zou een funderingspaal kunnen functioneren als een verticale grondgekoppelde warmtewisselaar, naast zijn primaire functie om het gebouw te dragen. En ander voorbeeld is de toepassing van zolderruimte voor het verzamelen van zonnestraling en het opvangen van kostbare warmte die opstijgt uit de lagere verdiepingen van het gebouw. Tabel 6.4 geeft een overzicht weer van de indirecte energiedoelinden van bouwcomponenten, supplementair aan hun primaire functie.

Conflicterende effecten

Conflicterende doelen zijn onvermijdelijk in een zeer complex ontwerpproces. Elke ontwerpbeslissing kan gevolgen hebben op toekomstige beslissingen. Dit kan andere ontwerp oplossingen uitsluiten of hun doeltreffendheid verminderen als er niet adequaat mee omgesprongen wordt. Bijvoorbeeld, compacte en gestapelde gebouwontwerpen verminderen het oppervlak van de gebouwschil dat wordt blootgesteld aan de buitenomgeving. Dit kan voordelig zijn in barre omstandigheden waar de gebouwschil primair opereert als bescherming maar zal ook op momenten dat kostbare energie gewonnen kan worden de mogelijkheid van interactie met de buitenomgeving verminderen. De sleutel is om in een vroeg stadium alert te zijn op de mogelijke conflicten, zodat er creatieve oplossingen bedacht kunnen worden om de algehele prestatie van het ontwerp te verbeteren.

Synergetische effecten

Sommige klimaatactieve principes hebben een belangrijke potentie om de prestaties algeheel te verbeteren door middel van samenwerking. Bijvoorbeeld het ontwerpen van zonwering die voor het raam geplaatst kan worden en, tevens kan functioneren als additionele thermische isolatielaag. Naast het oplossen van conflicten bij creatieve oplossingen, is een tweede uitdaging van conceptontwikkeling het exploiteren van deze synergetische effecten.

Tabel 6-4: *Bouwcomponenten en hun 'verborgen' energiepotenties.*

	Component	Primary function(s)	Hidden energy purpose(s)
	Building site	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibility • outdoor space 	<ul style="list-style-type: none"> • improvement of microclimate through vegetation and water bodies • shading from vegetation • wind protection
	Staircase	<ul style="list-style-type: none"> • internal routing 	<ul style="list-style-type: none"> • increase height difference to enforce natural ventilation potential
	Hallways	<ul style="list-style-type: none"> • internal routing 	<ul style="list-style-type: none"> • thermal distribution • thermal buffer zone
	Attic	<ul style="list-style-type: none"> • storage space • additional living space 	<ul style="list-style-type: none"> • solar collection • internal heat collector (from rising warm air)
	Construction pile	<ul style="list-style-type: none"> • building support 	<ul style="list-style-type: none"> • earth coupling
	Ground floor slab	<ul style="list-style-type: none"> • building support 	<ul style="list-style-type: none"> • thermal mass • direct earth-coupling
	Basement	<ul style="list-style-type: none"> • utility and storage space 	<ul style="list-style-type: none"> • energy storage facility
	Load bearing wall	<ul style="list-style-type: none"> • building support 	<ul style="list-style-type: none"> • thermal mass
	Column	<ul style="list-style-type: none"> • building support 	<ul style="list-style-type: none"> • thermo-activation • energy distribution
	Beam	<ul style="list-style-type: none"> • building support 	<ul style="list-style-type: none"> • thermo-activation • energy distribution
	Floors	<ul style="list-style-type: none"> • building support • internal organization of spaces • floor separation • fire protection 	<ul style="list-style-type: none"> • thermal mass • thermo-activation • energy distribution
	External walls	<ul style="list-style-type: none"> • shelter 	<ul style="list-style-type: none"> • microclimate improvement from green walls • thermal conservation
	Windows	<ul style="list-style-type: none"> • daylight admission • natural ventilation • outdoor view 	<ul style="list-style-type: none"> • thermal conservation
	Roof	<ul style="list-style-type: none"> • shelter • rainwater drainage 	<ul style="list-style-type: none"> • microclimate improvement from green roofs • thermal conservation
	Internal walls and floors	<ul style="list-style-type: none"> • internal organization of spaces • room separation • fire protection 	<ul style="list-style-type: none"> • thermal mass
	Ceiling	<ul style="list-style-type: none"> • aesthetical feature 	<ul style="list-style-type: none"> • surface characteristics for optimization of daylight, thermal mass and acoustics
	Floor coverings	<ul style="list-style-type: none"> • aesthetical feature 	<ul style="list-style-type: none"> • surface characteristics for optimization of daylight, thermal mass and acoustics
	Wall coverings	<ul style="list-style-type: none"> • aesthetical feature 	<ul style="list-style-type: none"> • surface characteristics for optimization of daylight, thermal mass and acoustics

6.3.3 Beoordeling

Na het generen van een energieconcept, wordt een objectieve beoordeling van de genoemde eisen gemaakt die zal bepalen of het gegenereerde concept als een ontwerpoptie kan worden gemarkeerd. De beoordeling is gebaseerd op de van te voren gedefinieerde parameters die in het specifieke geval van klimaatactief ontwerpen de volgende zijn: energiegebruik, bijdrage aan het comfort en architectonische impact. Belangrijk is het bepalen van een goed afgebakende set van toetsingsregels die de beoordelende parameters bevatten, zoals het gewenste detailniveau, de apparaten die gebruikt worden en de presentatiestijl van de resultaten.

6.3.4 Selectie

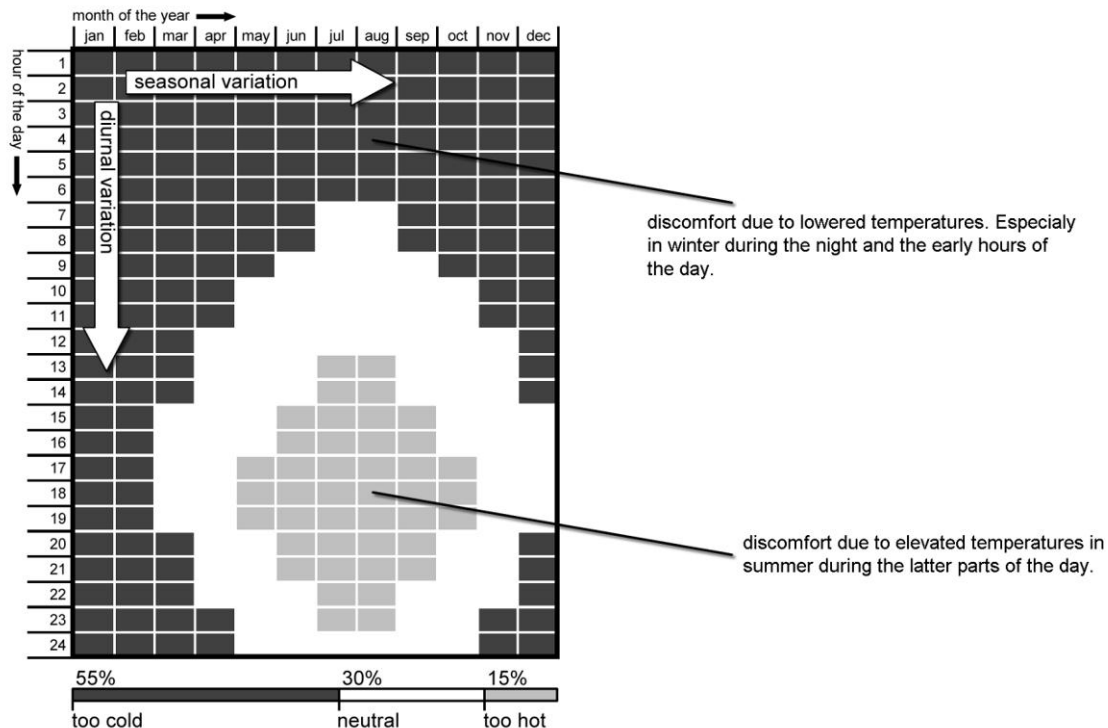
De selectie impliceert meer dan alleen de bepaling van de best presterende ontwerpoptie, gebaseerd op de beoordeling van parameters. Secundaire ontwerpdoelen, zoals andere elementen van duurzaam ontwerpen en de kosten, mogen dan fungeren als beslissende factor bij de selectie van het definitieve ontwerp.

6.4 Illustratie van de ontwerpstrategie in de praktijk

Een mogelijk gebruik van de ontwerpstrategie is weergegeven door de uitwerking van een onderzoek [32]. Het onderzoek heeft als beginsel de verbetering van de thermische omgeving van een standaard gebouwwontwerp, door het beoordelen van een verscheidenheid aan samen gevoegde ontwerpoplossingen als alternatief voor mechanische comfortsystemen. Deze weergave kan worden gezien als een methode om aan te geven wat het potentieel is voor het bijwerken van de huidige woningbouwontwerpen en om de mogelijke verbeteringen ervan in renovatie projecten⁵ te tonen.

De ontwerpstrategie is gebaseerd op een visuele beoordelingsmethode voor het thermisch comfort, waarbij temperatuurvlakken gebruikt worden om de prestaties te visualiseren [Figuur 6-3]. Het gebruik van dergelijke visuele beoordelingsmethodes maakt het mogelijk om het ontwerp te sturen in de richting waar verbeteringen gemaakt moeten worden, zodat de prestaties verbeterd worden. Verder kan het helpen bij het maken van beslissingen.

⁵ Klimaatactief ontwerpen is bevorderlijk voor elk bouwtype en in elk klimaat omdat het de comfort eisen en de dynamiek van microklimaten als uitgangspunt neemt. Hoewel het is gelimiteerd door een aantal vastgestelde ontwerpparameters, kan klimaatactief ontwerpen ook voordelen hebben bij transformatie- en renovatieprojecten.



Figuur 6-3: Temperatuur vlakken met een score kaart. De temperatuur vlakken tonen tegelijk seizoens en dagelijkse variaties van de temperatuur. Resulterende temperaturen zijn met kleur gecodeerd aan de hand van de genoemde thermische comfort limieten. Deze kleuren zijn gelabeld als te koud, neutraal, of te warm. De score kaart geeft een snel overzicht van de algehele prestaties, door het incidentie percentage van elk label over het jaar te tonen.

6.4.1 Uitgangspunten

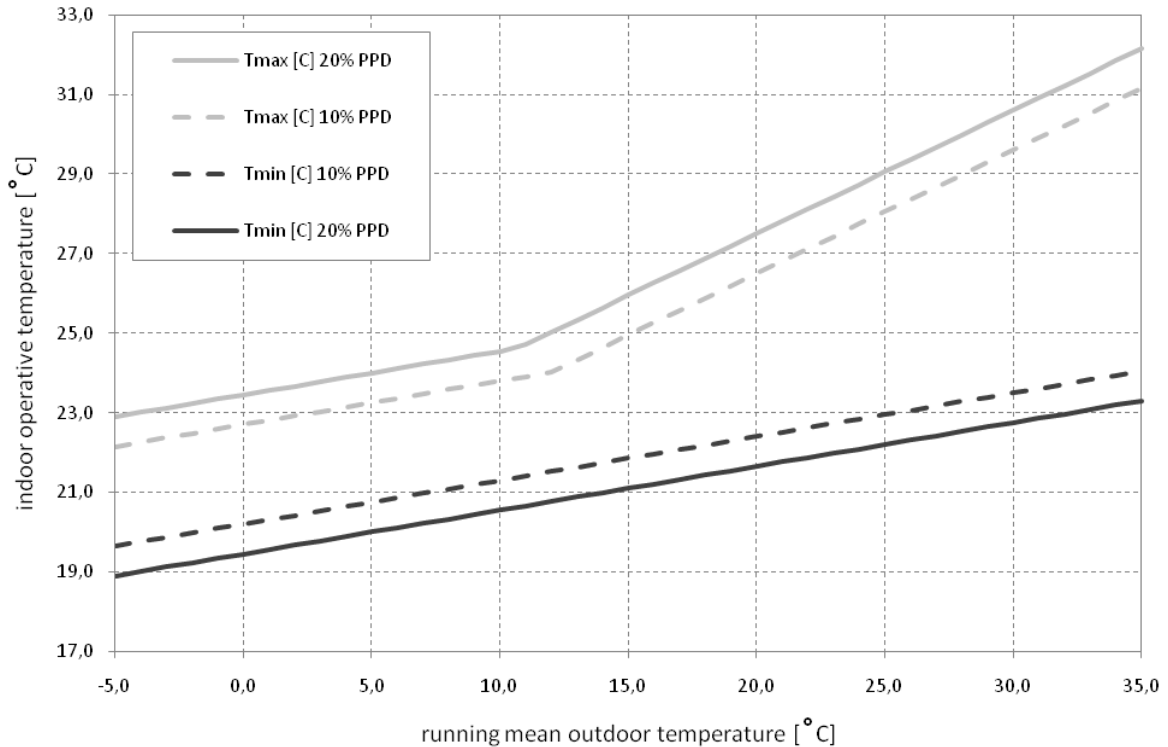
Klimaat parameters

De berekeningen zijn verricht met de TMY2 referentie-klimaatdata voor De Bilt in Nederland (met coördinaten: 52° 06' N 5° 11' E). Het klimaatbestand bevat metingen uit 1995. Gemiddelde omgevingstemperaturen variëren van 2.2°C in de winter tot 16.9°C in de zomer met piektemperaturen van -11.8°C en 30.7°C.

Thermische comfort beoordeling.

De luchttemperatuur van de woonkamer, als de primaire verblijfsruimte, is als te beoordelen comfortparameter gekozen⁶. De temperatuur is bepaald als functie van de meerdaagse ontwikkeling van de omgevingstemperatuur (figuur 6-4). De comfortgrenzen zijn zo gedefinieerd dat daartussen 80% van de bewoners thermisch comfort ervaart (20% PPD). De beoordeling van de prestatie op thermisch comfort is gedaan door het berekenen van het aantal keer dat deze grenzen werden overschreden.

⁶ In het oorspronkelijke onderzoek [31] werd thermisch comfort beoordeeld door gebruik te maken van traditionele thermische comfort standaarden, die bestaan uit vaste temperatuurreksen waarbij de binnentemperatuur kan variëren zodat er een specifiek comfortniveau gehandhaafd wordt. De onder- en bovengrenzen van de binnentemperaturen waren respectievelijk 20°C en 26°C voor verblijfsruimten.



Figuur 6-4: Adaptieve comfort temperatuurgrenzen als een functie van de “running mean outdoor temperature” voor verschillende niveaus van acceptatie. Deze waarden gelden voor gebouwen met een hoge graad van adaptieve mogelijkheden (bijvoorbeeld, afzonderlijke thermische zones, individuele controle en bedienbare ramen). Bij aanhoudend hoge buitentemperaturen is worden ook hogere binnentemperaturen geaccepteerd

Strategie voor passieve zonne-energie

Het verwarmen van ruimtes is gewoonlijk de belangrijkste gebouw-gerelateerde energieverbruikspost voor woningen in Nederland. Het uitgangspunt van dit onderzoek is daarom het verminderen van de warmtevraag door het toepassen van passieve zonverwarming. Het nauwkeurig afstemmen van de opvang van zonnestraling, thermische isolatie en het bufferen van warmte in de avond bepalen tot op welke hoogte zonnestraling iets kan toevoegen aan het verwarmen van ruimtes gedurende het jaar. Het verzamelen van zonnestraling wordt verbeterd door het vergroten van het raamoppervlak en het toevoegen van een serre als thermische bufferruimte. Warmteverliezen worden verminderd door het toevoegen van meer isolatie en het buffereffect wordt gecreëerd door toevoeging van meer thermische massa. Samen met die van het standaardgeval, zijn de parameters van het te beschouwen ontwerp bijeen gebracht in tabel 6-5.

Tabel 6-5: Geselecteerde ontwerp oplossingen voor passieve zonnewarmte strategie. Eigenschappen gemarkeerd als variant 0 behoren tot de standaardgeval en alle andere configuraties tenzij anders vermeld.

Passive solar heating strategy		Variant	Properties
<i>Solar radiation collection</i>			
OR	Orientation	0	South
WS	Window size	0	73 %
		+	90 %
SS	Sunspace	0	no sunspace
		1	Sunspace used as thermal buffer
		2	Sunspace used both as thermal buffer and to preheat fresh air
<i>Thermal conservation</i>			
INS	Insulation ($R_{c,wall}$; $R_{c,floor}$; $R_{c,roof}$)	0	3.0 m ² K/W; 3.0 m ² K/W; 4.0 m ² K/W
		+	4.0 m ² K/W; 4.0 m ² K/W; 5.0 m ² K/W
		++	8.0 m ² K/W; 8.0 m ² K/W; 10.0 m ² K/W
WC	Window configuration	0	$U_{glass} = 1.27 \text{ W/m}^2\text{K}$; g-value = 0.591
<i>Thermal buffering</i>			
TM	Thermal mass	0	160 kJ/m ² K
		+	410 kJ/m ² K

Standaard situatie

Het standaardgeval is een ééngezins rijtjeswoning. Het is het meest voorkomende type in Nederland, zowel in de bestaande woningbouw als in de nieuwe stedelijke ontwikkelingsgebieden. De gebouworientatie, -vorm, -layout, het glaspercentage, de raampositie en isolatielagen voor het standaardgeval zijn gebaseerd op de praktijk. Het twee verdieping tellende gebouw met een plat dak heeft een oppervlak van 91 m² met een verdieping hoogte van 2.6 meter en is gemaakt van massieve bouwelementen zoals beton en metselwerk. De ondoorzichtige bouwcomponenten voldoen aan de standaard (thermische) isolatie eisen en alle ramen bevatten HR⁺⁺ glas. In totaal wordt 160 m³/h aan verse lucht geleverd aan verblijfsruimten, wat voldoet aan de minimale eisen in Nederland.

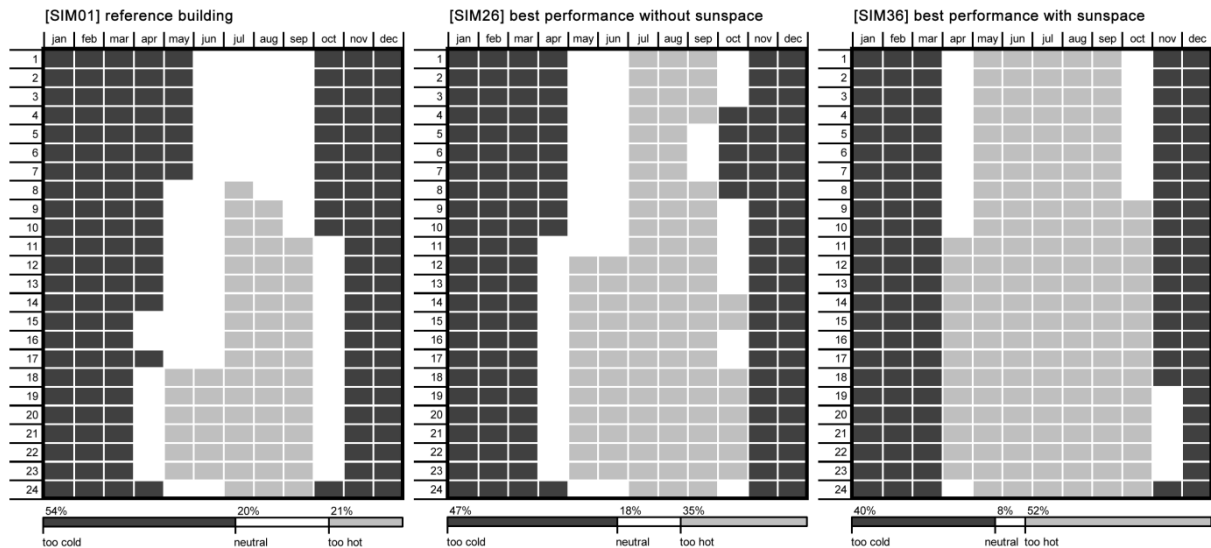
6.4.2 Resultaten

De resultaten van de simulaties zijn weergegeven in tabel 6-6. Het resultaat laat duidelijk een verscheidenheid zien in de totaalprestatie als gevolg van de interactie tussen verschillende ontwerp oplossingen. In elke vergelijkbare opzet leiden verhoogde isolatie waarden (INS⁺⁺) tot verbeterde prestaties, evenals verhoogde transparante, op de zon georiënteerde openingen (WS+). De serre, gebruikt voor het voorverwarmen van ventilatielucht, (SS2) is winstgevend in elke configuratie, alleen in het geval waar de serre louter gebruikt werd als thermische buffer (SS1) was dit niet vanzelfsprekend.

Tabel 6-6: Impact van passieve zonnewarmte strategie. De resultaten zijn gerangschikt aan de hand van de frequentie dat temperaturen 'te koud' werden gelabeld. De frequentie van het referentie gebouw (REF) is geïndexeerd met 100.

Rank		WS+	TM+	INS+	INS++	SS1	SS2	thermal comfort [index] 'too cold'
1	SIM36	√	√		√		√	69
2	SIM34	√			√		√	69
3	SIM35		√		√		√	70
4	SIM33				√		√	70
5	SIM24	√	√	√			√	73
6	SIM23		√	√			√	73
7	SIM22	√		√			√	73
8	SIM21			√			√	74
9	SIM20	√	√				√	75
10	SIM18	√					√	76
11	SIM19		√				√	76
12	SIM17						√	76
13	SIM26	√			√			86
14	SIM28	√	√		√			86
15	SIM25				√			90
16	SIM32	√	√		√	√		91
17	SIM30	√			√	√		91
18	SIM08	√	√	√				92
Rank		WS+	TM+	INS+	INS++	SS1	SS2	thermal comfort [index] 'too cold'
19	SIM27		√		√			92
20	SIM06	√		√				92
21	SIM29				√	√		93
22	SIM31		√		√	√		94
23	SIM04	√	√					95
24	SIM02	√						95
25	SIM14	√		√		√		95
26	SIM16	√	√	√		√		95
27	SIM07		√	√				96
28	SIM05			√				96
29	SIM12	√	√			√		98
30	SIM15		√	√		√		98
31	SIM10	√				√		98
32	SIM13			√		√		98
33	SIM03		√					99
34	REF							100
35	SIM11		√			√		100
36	SIM09					√		101

De temperatuurvlakken van de best presterende configuraties met en zonder serre (SIM26 en SIM36) zijn, samen met de temperatuurvlakken van het standaardgeval (REF), weergegeven in figuur 6.5. De voorgestelde passieve bezonningsstrategie verbetert effectief de benutting van zoninstraling en verkleint significant de verwarmingsperiode. Een gevolg hiervan is echter dat de binnentemperatuur in de zomer ook stijgt, wat weer tot ongemak leidt. Het toepassen van een serre vraagt overduidelijk om een strategie die oververhitting voorkomt in de zomer.



Figuur 6-5: Van links naar rechts: temperatuur vlakken van het standaardgeval (REF), best presterende configuratie zonder serre (SIM26) en de best presterende configuratie met serre. De vermindering van ongemak door verlaagde temperaturen is significant, maar als een gevolg hier van is er een toename van ongemak door verhoogde temperaturen in de zomer als er geen koeling maatregelen worden getroffen.

Strategieën om oververhitting te voorkomen

De impact van de verschillende koelstrategieën is geanalyseerd door gebruik te maken van SIM36 als nieuwe standaard situatie. De koelstrategieën zijn gebaseerd op zonwering, natuurlijke luchtkoeling, of een combinatie van beide. Zonwering is een effectieve manier om hoge stralingsniveaus van de zon in de zomer te beheersen. Wanneer alleen het bovenste gedeelte van het glas van de serre van zonwering is voorzien, zou een voldoende hoeveelheid natuurlijk licht gegarandeerd moeten zijn. Bij uitwendige toepassing wordt 70% van de zonnestraling die de zonwering raakt gereflecteerd. Deze is alleen geplaatst van mei tot september, de periode wanneer oververhitting plaats vindt.

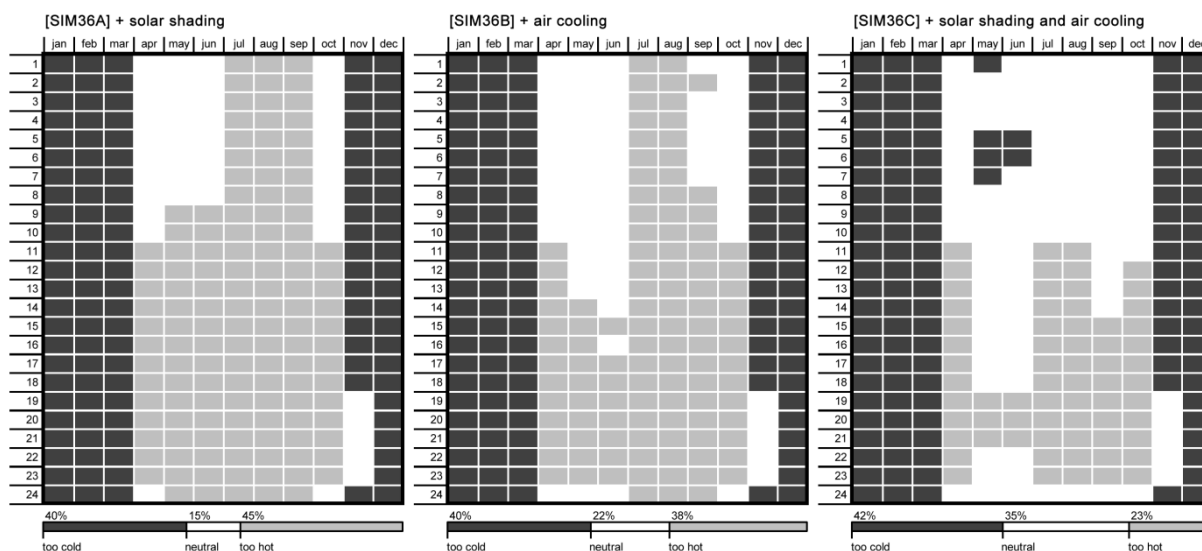
Omgevingstemperaturen overschrijden zelden de bovenste thermische comfortlimiet in Nederland. Daarom heeft dit ook een groot koelpotentieel. Een strategie is het ventileren van de woonkamer met buitenlucht in de hete zomerperiode, van mei tot september, in plaats van warme lucht uit de serre. Ventilatiesnelheden blijven constant, zodat ongemak door tocht (bij te grote hoeveelheden lucht) wordt voorkomen.

De resultaten zijn weergegeven in tabel 6-7. Beide koelstrategieën hebben een significante impact op het terug brengen van de temperatuur in de zomer, met een nog beter resultaat als beide strategieën tegelijk worden toegepast.

Tabel 6-7: Impact van de koelstrategie. De resultaten zijn gerangschikt aan de hand van de frequentie dat temperaturen 'te warm' worden gelabeld. De frequentie van het nieuwe standaard geval, (SIM36) is geïndexeerd met 100.

#		cooling strategy		thermal comfort [index]
		SHAD	AIRCOOL	'too hot'
1	SIM36C	√	√	42
2	SIM36B		√	69
3	SIM36A	√		84
4	SIM36			100

De prestatieverbetering kan ook worden gevisualiseerd met de hulp van de temperatuurvlakken (figuur 6.6). Extra koelmaatregelen hebben een positief effect tijdens periodes waarbij de binnentemperatuur de bovengrens van het thermische comfort overschrijdt. Het is echter wel zaak dat de koelstrategie zo nauwkeurig ontworpen wordt dat er ook weer niet te weinig warmte wordt verzameld, met als gevolg dat de temperatuur onder het thermische comfortniveau valt tijdens de eerste uren van de dag.



Figuur 6-6: Temperatuurvlakken van de best presterende configuratie met serre (SIM36) met toegevoegde koelstrategie. Van links naar rechts; zonwering, natuurlijke luchtkoeling, natuurlijke luchtkoeling en zonwering.

7 Gebruikersinteractie en regeltechnische componenten

7.1 Introductie: De noodzaak van regeling

Om de optimale balans tussen energie-efficiëntie en interne omstandigheden te behouden, moeten de technische installaties en de RBE's (Responsive Building Elements) bediend worden. De bediening moet echter zo worden ontworpen dat rekening wordt gehouden met een aantal verschillende voorwaarden. Zowel de buitenomstandigheden als de beschikbaarheid van duurzame bronnen zijn variabel, evenals de vraag van het binnenklimaat, afhankelijk van factoren zoals activiteiten, voorkeuren en het moment van de dag. Bij een goed ontwerp kan de regeling de inwoners en de activiteiten op elk moment van de dag van de juiste omstandigheden voorzien, terwijl tegelijkertijd energie wordt bespaard door alleen te ventileren, verwarmen of koelen waar en wanneer dat nodig is. In de praktijk zijn er echter veel regelsystemen die slecht functioneren, wat tot ongemak van de gebruiker en bijna altijd tot inefficiënte toepassing van het systeem leidt [4]. Daarom worden een aantal belangrijke aspecten voor het ontwerp van de regeling besproken.

7.2 Programma van eisen voor regelingen

7.2.1 Adaptatie

Om mensen van de vereiste invloed op hun omgeving te voorzien, rekening houdend met energie-efficiëntie, is het belangrijk om basaal menselijk gedrag voor het reguleren van thermisch comfort te begrijpen. Dit gedrag wordt *adaptatie* genoemd. Volgens Brager en De Dear [17] zijn er drie categorieën van adaptatie.

1. Gedragsadaptatie:

Alle aanpassingen die gemaakt worden om de thermische balans tussen lichaam en omgeving te veranderen, verdeeld in drie subcategorieën

- a) aanpassingen van persoonlijke variabelen ten opzichte van de omgeving, zoals het aanpassen van kleding, activiteit, houding, of verplaatsen naar een andere omgeving.
- b) aanpassingen van de omgeving, zoals ramen, ventilatie, jaloezieën en verwarmingen.
- c) culturele aanpassingen, onder andere plannen van activiteiten, siësta's, kledingsvoorschriften

2. Fysiologische aanpassingen:

Alle veranderingen in de fysiologische reacties op de thermische omgevingsfactoren die leiden tot geleidelijke vermindering van de spanning veroorzaakt door deze factoren.

3. Psychologisch:

Een aangepaste waarneming van en reactie op zintuiglijke informatie. Deze vorm van adaptatie beïnvloedt de "comfort-setpoints" van de gebouwbewoners, die variëren naar tijd en plaats. Minder strikte verwachtingen ten aanzien van het binnenklimaat kunnen worden geassocieerd met het concept van gewenning in de psychofysica; herhaaldelijk of chronische blootstelling aan een stressfactor in de omgeving leidt tot een vermindering van de opgewekte gevoelsintensiteit.

Het is belangrijk om rekening te houden met de andere typen van adaptief gedrag van mensen, want deze zullen een sterke invloed hebben op de beleving van comfort van de bewoner, en dus de betekenis van de parameters die bestuurd moeten worden.

7.2.2 Bruikbaarheid

Voor het ontwerpen van een bruikbare regeling voor het gebruiken van een energie-efficiënt en comfortabel gebouw, zijn er een aantal essentiële ontwerpprincipes die behandeld moeten worden. Leaman en Bordass [4] stellen het volgende;

1. Waar is de regeling voor?

Er zijn 2 primaire redenen om regeling in het gebouw te integreren:

- het mogelijk maken voor gebruikers om omstandigheden te selecteren die ze prefereren en het vermijden van omstandigheden die ze niet willen
- het besparen van energie en andere bronnen

2. Wanneer wordt de regeling gebruikt?

De regeling wordt voornamelijk gebruikt bij de volgende gelegenheden:

- bij binnenkomst en vertrek
- wanneer de omstandigheden niet passend zijn

3. Voor wie is de regeling?

De belangrijkste gebruikersgroepen zijn;

- gebruikers/bewoners
- bezoekers
- onderhoudspersoneel
- gebouwbeheerders

4. Waar moet de bediening van de regeling geplaatst zijn?

Regelmogelijkheden voor de gebruiker moeten geplaatst zijn op een van de volgende plekken;

- de ingang van een vertrek
- nabij het te regelen element
- op de plek waar de gebruiker het nodig heeft

5. Is de ontwerpintentie duidelijk voor de eindgebruiker?

Als de gebruiker op een juiste manier gebruik wil maken van de regeling, moet zowel de functie van de regeling duidelijk zijn als het gebruik ervan. De regeling zou de volgende informatie moeten bevatten:

- de parameters die geregeld worden (temperatuur, ventilatie)
- de actie die door de gebruiker verricht wordt (draaien, duwen)
- de richting van de parameter (hoger, lager)

6. Is de systeemstatus helder voor de gebruiker?

Om het gevoel van controle voor de bewoners en hun begrip van de omgeving te verbeteren, is het cruciaal om de gebruiker te voorzien van feedback, om hen zo te informeren over de gevolgen van de regelacties die genomen zijn.

- Geef direct, voelbare feedback (zoals een klik), om aan te geven dat de gebruiker de regeling gebruikt
- Indien mogelijk, laat de gebruiker zien, voelen of horen dat het te regelen apparaat in werking treedt of van status verandert
- Geef snelle feedback om aan te tonen dat het beoogde effect heeft plaatsgevonden (aflezing, indicatie licht).

7. Is de regeling goed geïntegreerd en energie efficiënt?

- automatische bezettingssensoren combineren met knoppen
- intervaltimer met uit-knop en andere noodzakelijke voorrang faciliteiten
- soms moet de regeling advies geven

8. Hoe lang mag een gebruiker de automatische bediening overrulen?

7.2.3 Regelparameters

De regelparameters vormen de basis voor de regelstrategie. Een regelparameter is elke soort van informatie die invloed heeft op bijvoorbeeld de ventilatiestrategie, de verwarming, de koeling, enz. De informatie kan direct worden verkregen door middel van speciale sensoren of afgeleid vanuit een reeks van omstandigheden. Het gedrag van de bewoner moet in het regelalgoritme zijn verwerkt. De sturende parameters zijn [6]:

- Buitenklimaat (temperatuur, luchtvochtigheid, verontreinigingsniveau
 - temperatuur
 - windsnelheid
 - luchtvochtigheid
 - verontreinigingsniveau
 - zonnestraling
 - neerslag
- Gebouw- of componenteigenschappen
 - voorziening voor passieve zonne-energie (RBE)
 - openen / sluiten van ramen
 - Licht- / zontransmissie (zonwering / rolluiken)
 - Thermische isolatie
 - luchtdichtheid (ventilatie)
- Ventilatiesysteem: luchtstromen, drukverschillen
- Binnenklimaat:
 - temperatuur
 - ventilatie

- luchtvochtigheid
- binnenluchtkwaliteit
- verlichting
- warm water
- Bezetting van verblijfsruimtes (aanwezigheid, of indirect door CO₂-niveau, luchtvochtigheidsniveau,....)
- Geuren in overige ruimtes (keuken, toiletten)
- Luchtvochtigheid in overige ruimtes (keuken, badkamer)

Het gebruik van de regelparameters hangt af van het soort besturingsstrategie dat wordt toegepast. Het zou ook kunnen dat de gebruiker de gene is die de informatie verwerkt en tot actie overgaat zonder enige vorm van kunstmatige intelligentie.

De sturingsmodellen kunnen zijn:

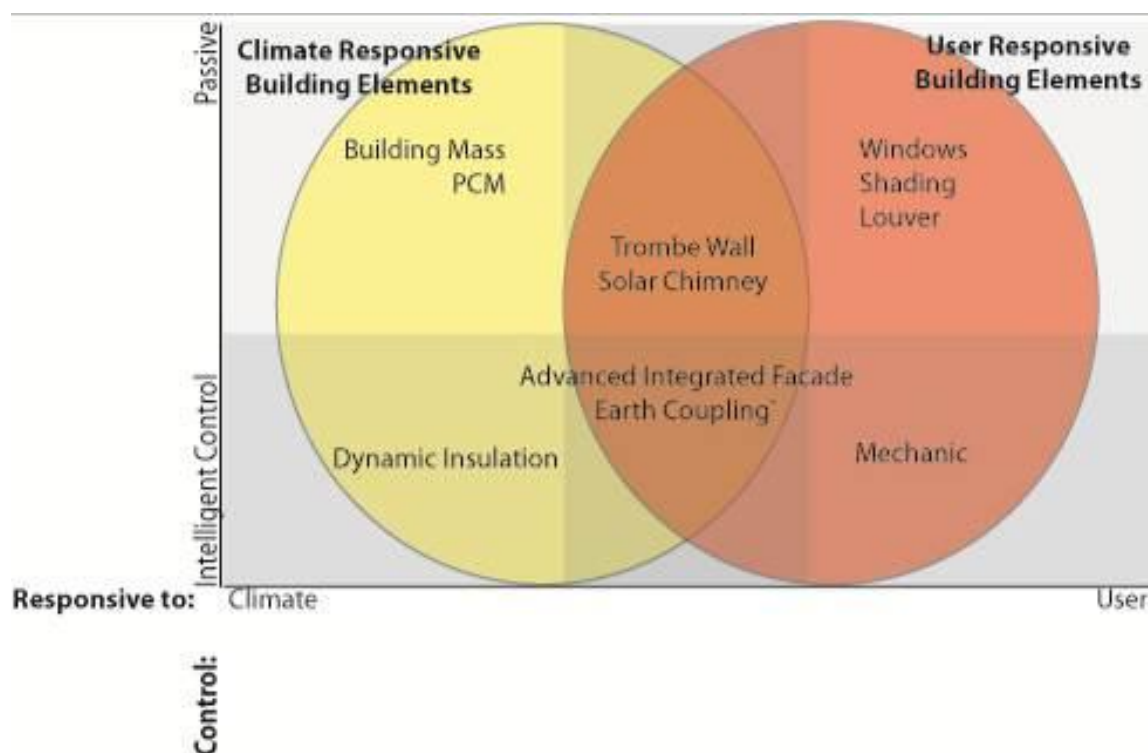
- aan/uit
- discreet
- modulerend

7.3 Responsive Building Elements

RBE's zijn componenten die op een adequate manier reageren op de veranderingen in buiten- en binnenomgeving en de eisen van bewoners om zo de optimaal aangepaste comfortomstandigheden te behouden, en tegelijkertijd bij te dragen aan het verminderen van het energieverbruik voor de besturing van het binnenklimaat.

Sommige RBE's kunnen bestuurd worden door het beïnvloeden van de richting en de snelheid van het dragend medium als water of lucht, of het beïnvloeden van andere eigenschappen zoals isolatiewaarden (dynamische isolatie) of doorzichtigheid. Sommige technieken geven geen mogelijkheid tot sturing, zoals thermische massa of PCM's. Deze functioneren echter vooral door afzwakking van de temperatuurfluctuaties.

Voor de gebruiker zal de RBE wellicht als een 'black box' werken. Energie in een of andere vorm betreedt het systeem van buiten, wat een proces in werking brengt, dat resulteert in beïnvloeding van het binnenklimaat. In het geval van een te openen raam, zal het gevolg van openen en sluiten waarschijnlijk duidelijk zijn voor de gebruiker, net als conventionele zonnewering. Echter, in het geval van Geavanceerde Geïntegreerde Gevels, kan dit onduidelijk zijn voor de gebruiker. Om de gebruiker de nodige informatie te geven, moet er een slimme interface zijn, die duidelijk te begrijpen is voor de gebruiker en die de prestaties van bouwcomponenten stuurt om naar de wens van de gebruiker invloed te hebben op het binnenklimaat, dit met specifieke aandacht voor de leesbaarheid en feedback naar de gebruiker.



Figuur 7-1: Reactievermogen van klimaat systemen

Zoals in figuur 7-1 wordt weergegeven, sommige systemen kunnen zowel gebruiker- als klimaatresponsief zijn. Het leveren van regelmogelijkheden aan de gebruiker is erg belangrijk, want het is bewezen in verscheidene onderzoeken dat mensen neigen een groter spectrum aan omstandigheden als comfortabel te accepteren, wanneer ze het gevoel hebben hierop invloed uit te kunnen oefenen.

Het meest geavanceerde type regeling is een Gebouwmanagementsysteem (GBS): een GBS is een systeem waarbij componenten met elkaar kunnen communiceren en daarbij is er een centrale “opzichter” die vanuit één locatie toezicht houdt op het gebouw en de regeling aanstuurt. Dit soort geavanceerde type regeling kan opereren zonder enige interactie met de gebruiker. Duidelijk is echter dat de hiervoor genoemde gewenste beïnvloedingsmogelijkheden door de gebruiker daarin ook opgenomen moeten worden. Het GBS moet alleen de basis instellingen goed regelen, waarbij er naregelmogelijkheden moeten zijn voor de gebouwgebruikers.

8 Simulatieberekeningen

8.1 Methodiek

Om het effect van adaptieve comfortstrategieën die in de voorgaande hoofdstukken zijn beschreven te onderzoeken zijn simulatieberekeningen gemaakt met twee verschillende modellen. Eerst is met een vereenvoudigd 1e-orde model het effect van de belangrijkste adaptieve modelparameters globaal geanalyseerd. Dit model maakt het mogelijk om per tijdstap een optimale instelling van isolatie en zonwering te bepalen. Daarmee wordt een indicatie verkregen van de mate waarin in ideale omstandigheden de energievraag bij toepassing van adaptieve maatregelen beperkt kan worden.

Met een meer gedetailleerd dynamisch simulatieprogramma is een aantal realistische adaptieve concepten doorgerekend, waarbij het gebruikersgedrag met een probabilistisch model is benaderd. De rekenexercitie is niet bedoeld om een volledig beeld van alle mogelijke oplossingen te verkrijgen. Het doel is te laten zien dat met maatregelen zoals aangegeven in de ontwerpstrategie inderdaad het doel (75% besparing op CO₂ emissie en 60% besparing op, uit fossiele brandstoffen opgewekte electriciteit) wordt bereikt.

Voor het toepassen van de bekeken principes in het ontwerp is er tenslotte de ontwerpstrategie. Het is niet mogelijk (en in feite ook ongewenst) de zaak te versimpelen tot een aantal concepten.

8.1.1 Te onderzoeken woningconcepten

Op basis van de resultaten van het onderzoek als beschreven in de voorgaande hoofdstukken zijn samenhangende adaptieve woningconcepten ontwikkeld, waarmee naar verwachting de energiebesparingsdoelstelling wordt gehaald.

Voor de concepten is zoveel mogelijk aangesloten bij bestaande conceptbeschrijvingen en de daarvoor uitgevoerde berekeningen (o.a. Toolkit nieuwbouw en Toolkit bestaande bouw).

Voor het bepalen van de bereikte vermindering van CO₂-emissie en elektriciteitsgebruik geldt 2006 als peiljaar. De referentieconcepten zijn daarom op de stand van zaken in de bouw van dat jaar gebaseerd (epc, R-waarde, ventilatie, enz.).

Voor alle varianten is een tussenwoning (“NOVEM referentiewoning”) als uitgangspunt genomen.

Voor enkele varianten in het maatregelenpakket is ook een berekening voor een tussenappartement gemaakt.

Basisvarianten (referentie)

- 1a. Nieuwbouw tussenwoning 2005 zwaar (gietbouw)
- 1b. Nieuwbouw tussenwoning 2005 licht (houtskeletbouw)
2. Bestaande tussenwoning zwaar, ca. 1980
3. Bestaand tussenappartement zwaar, ca. 1980

In alle gevallen c.v. (water) en natuurlijke ventilatie (toevoer) en mechanische afzuiging (keuken, douche, toilet).

Gebruiksprofielen (aanwezigheid en ventilatie)

Op deze basisvarianten zijn een aantal aanpassingen gemaakt wat betreft

- Gebruiksprofiel
- Ventilatieregime

Wat betreft gebruik wordt gekeken naar drie gezinssamenstellingen [1]:

- Ouders en 2-3 kinderen
- Tweeverdieners zonder kinderen
- Ouderen (hele dag thuis en hogere temperatuurwens in de winter)

Wat betreft ventilatie (zie ook rapportage TNO):

- Basisventilatie (Bouwbesluit) 24 uur per dag
- Ventilatie alleen als bewoners thuis zijn
- Ventilatie alleen in de gebruikte vertrekken en afgestemd per persoon

Daaroverheen het effect van warmteterugwinning uit de ventilatielucht. In beginsel alleen als het effect van warmteterugwinnen op zich, zonder een concrete vertaling in maatregelen of installaties.

Isolatieniveau en thermisch isolerende luiken

Voor een aantal varianten is het effect van verhogen van de isolatie bepaald:

- Dichte delen $R_c = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- Glas $U = 1,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (inclusief kozijn)
- Thermisch isolerende luiken
 $R_c = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (totaalpakket, glas + luik)

Zonnecollectoren

Aan een aantal varianten is het gebruik van zonnecollectoren voor warmtapwater én ruimteverwarming toegevoegd:

- 7,5 m² zonnecollectoren
- 250-500 liter opslagvat

en nog een grotere variant: 15 m² en 750 liter

Installatieconcept

Tot hier toe is uitsluitend gekeken naar hoe de verschillende maatregelen uitpakken bij een normale c.v. (water). Daarbij is in feite alleen gekeken naar de warmtevraag (te dekken door de eindapparaten: radiatoren) en is nog niet gekeken naar de manier van warmte opwekken en naar andere manieren van verwarmen.

Voor een enkele varianten wordt gekeken naar:

- Vloerverwarming / wandverwarming
- Luchtverwarming (houtskeletbouw)
- Supersnelle wandverwarming (zie hieronder)

De manier van warmte opwekken (ketel, warmtepomp, al dan niet op wijkniveau) wordt apart bekeken. Het effect van de verschillende manieren van warmte opwekken is voor alle woningconcepten in beginsel namelijk gelijk.

Hetzelfde geldt voor de manier van warmteterugwinnen uit ventilatielucht. Het effect van warmterugwinnen op zich wordt in de varianten hiervoor al berekend. Afzonderlijk kan worden bekeken wat de implicaties voor het energiegebruik (en dus voor de CO₂ uitstoot en het elektriciteitsgebruik) zijn als deze warmteterugwinning op verschillende manieren plaats vindt. Te denken valt aan (semi) passieve methoden (Climarad, FiWiHex), gebalanceerde ventilatie met wtw, warmtepompboiler en andere manieren.

Echte vraagsturing / snel reagerende verwarming / zonerings van de woning

De ultieme manier van vraagbeantwoorden betekent “a la minute” de temperatuur op het gewenste niveau kunnen brengen. In beginsel moet dit bij benadering kunnen met een heel dunne wandverwarming, geheel (thermisch) geïsoleerd van de achterliggende muur.

Er wordt (net als bij de andere varianten) gestuurd op resulterende temperatuur. Als de gebruiker binnenkomt wordt binnen zeer korte tijd (elektrisch of met een heel dun waternet) de wandoppervlakte op een zodanige temperatuur gebracht dat de resulterende temperatuur aan de gewenste waarde voldoet. Zo'n systeem moet nog ontwikkeld worden, maar is zeker denkbaar.

Bij zo'n verwarmingssysteem moet ook gekeken worden naar het effect van massa en naar zonerings van de woning.

De berekeningen zijn met name bedoeld om de grootte orde van het effect te bepalen. De feitelijke ontwikkeling van dit soort systemen moet nog plaatsvinden.

Actieve warmteopslag en pcm's

Anders dan het hiervoor bedoelde effect van massa van de bouwconstructie kunnen ook varianten worden bestudeerd met actieve opslag van warmte. Bijvoorbeeld in de begane grond (beton)vloer via een extra register pijpen (slangen) of in een watertank.

Behalve voor de winter is dit waarschijnlijk het meest interessant voor de zomersituatie.

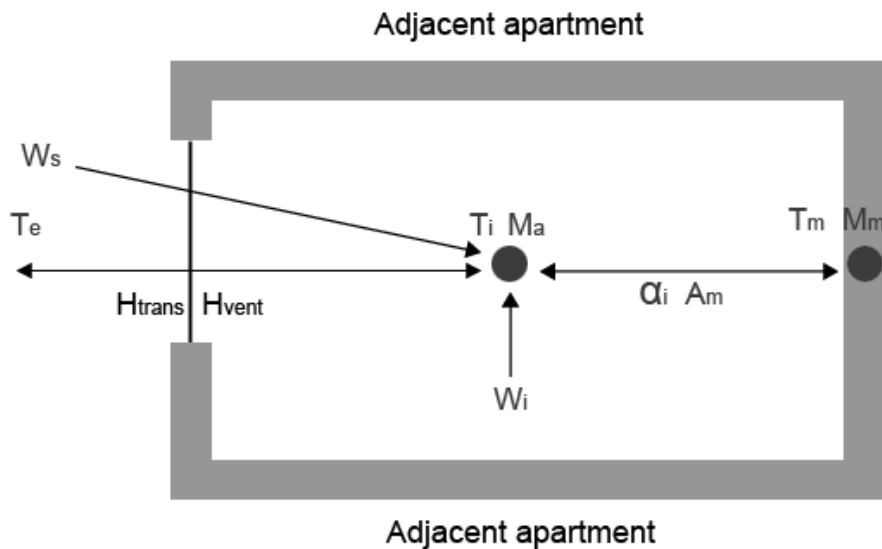
Dit geldt ook voor de toepassing van phase change materials.

8.2 Optimale energievraag: 1^e-orde modelbenadering

8.2.1 Beschrijving 1^e-orde model

Het model dat gebruikt is om de invloed van verschillende adaptieve maatregelen op het energieverbruik van een huishouden te berekenen, is een eerste-ordemodel dat per uur de energiebalans berekent voor een enkele ruimte, gerepresenteerd door twee massaknoppen: een lucht-knoop en een knoop voor de totale constructiemassa. Het model is gebouwd in Microsoft Excel met behulp van Visual Basic. Bovenal is het onderzoek toegespitst op controlestrategieën van zowel verwarming en koeling als ventilatie en zonwering.

Daarnaast zijn de thermische isolatie en thermische massa regelbaar gemaakt, om het potentiële effect daarvan te onderzoeken. Door een dergelijk model te gebruiken, wordt het duidelijk welke invloed alle maatregelen hebben, zonder conflicterende effecten van veel versturende variabelen. Hoewel de absolute uitkomst van het energiegebruik niet erg betrouwbaar is, kunnen de te onderzoeken mechanismen herkend worden.



Figuur 8-1: Representatie van het eerste orde model gebruikt in dit onderzoek.

Waarin:

T_e = buitenluchttemperatuur [$^{\circ}\text{C}$]

H_{trans} = karakteristiek warmteverlies door de gehele constructie (gebouwmhulling) [W/K]

H_{vent} = karakteristiek warmteverlies door ventilatie [W/K]

T_i = binnenluchttemperatuur [$^{\circ}\text{C}$]

M_a = totale thermische massa van het luchtvolume [J/K]

T_m = temperatuur van de constructielaag (eerste 60 mm) [$^{\circ}\text{C}$]

M_m = totale thermische massa van de constructielaag voor de eerste 60mm [J/K]

W_s = zone-energie winst [W]

W_i = interne warmteontwikkeling [W]

α_i = warmte overdrachtscoëfficiënt [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

A_m = oppervlakte van de constructie [m^2]

De simulatie berekent hoeveel energie nodig is om te voldoen aan de verwachte comfortvraag, gebaseerd op het extensieve onderzoek over bezettingsprofielen, eerder genoemd. Om de geldigheid van de berekeningen te controleren, zijn dezelfde mechanismen berekend met TRNSYS, een gevalideerd programma voor energiesimulaties in de gebouwde omgeving. Het model maakt gebruik van gemeten weergegevens van het KNMI. De zonnestraling op elk oppervlak wordt berekend door TRNSYS, met gebruik van het Lorenz model om directe en diffuse zonnestraling te scheiden van globale straling, verstrekt door de weergegevens. De inkomende zonnestraling is op de luchtknoop toegepast, net als de interne warmtelast van apparaten en personen, en het warmteverlies door transmissie en ventilatie.

De knoop voor de constructiemassa (TmMm) wisselt warmte uit met de lucht-knoop (TiMa) door convectie en radiatie, weergegeven door de warmteoverdrachtscoëfficiënt α_i .
De uitkomsten zijn gevalideerd via simulaties in TRNSYS.

Variabelen

Deze studie is uitgevoerd om een groot aantal variabelen te onderzoeken. Een opsomming van alle beschouwde variabelen is hieronder gegeven.

Gebouw:	standard appartement (ap) grenzend aan andere appartementen aan 4 zijden
Ruimten:	woonkamer (wk) hoofdslaapkamer (sk1)
Bezettingsprofielen:	eenpersoonshuishouden, student (1_st) tweepersoonshuishouden, werkend (2_w) vierpersoonshuishouden, twee ouders en twee kleine kinderen (4_kl)
Jaren:	1980-2009
Maatregelen:	Klokthermostaat (KT) Klokthermostaat met een standaard verwarmingsschema Woonkamer: verwarmd tot 21.5°C van 07:00 tot 23:00 Slaapkamer: verwarmd tot 19°C van 23:00 tot 07:00 de volgende ochtend Te Openen Ramen (OR) Ramen worden beschouwd geopend te worden als de temperatuur de comfortgrens overschrijdt en er iemand aanwezig is. Thermische Rolluiken (TR) Thermische rolluiken worden het hele seizoen 's nachts gebruikt. De thermische rolluiken worden gerepresenteerd door een verhoogde isolatie. Altijd verwarmen / koelen aan (AA) De temperatuur wordt constant op een niveau van 21.5 °C gehouden. Schema aanwezigheid (S) Verwarming en koeling wordt alleen toegepast als er iemand aanwezig is. Verwarming- / koelingsinstelwaarde volgens ATL (ATL) Verwarming en koeling volgens het model van de Adaptieve Temperatuur Limiet Aanwezigheidsgestuurde ventilatie (AC) Ventilatie wordt gestuurd op basis van aanwezigheid van personen. Brede temperatuur-dode band (BD) De instelwaarde voor verwarming is de comforttemperatuur. Wanneer deze temperatuur bereikt wordt, wordt echter de verwarming uitgeschakeld tot de ondergrens van de comfortzone bereikt is. Vervolgens wordt de ruimte verwarmd tot de comforttemperatuur en herhaalt de cyclus zich. Het is bewezen dat dit principe geen negatieve impact heeft op thermisch comfort zolang het binnen comfortgrenzen blijft [19].

Algoritme voor het optimaliseren van het ventilatievoud (AV)

Met een ventilatievoud van 0,1 tot 8.

Het ventilatievoud wordt geoptimaliseerd zowel voor aanwezigheid als temperatuur. Als de binnentemperatuur de comfort(temperatuur)grens overschrijdt wordt extra ventilatie toegepast om de warmte af te voeren, tenzij de buitentemperatuur hoger is dan de comforttemperatuur.

Algoritme voor het optimaliseren van de zonwering (ZTA-waarde) (AG)

ZTA varieert van 0,25 – 0,8.

De ZTA-waarde wordt geoptimaliseerd voor zowel zoninstraling als binnentemperatuur, niet alleen om ongewenste zoninstraling te voorkomen, maar ook om optimaal gebruik te maken van gewenste zontoetreding (passieve zonne energie).

Algoritme voor optimalisatie van de U-waarde, thermische isolatie (AU)

In een range van 0.1 – 0.37 W/m².K voor ondoorzichtige oppervlakken

In een range van 1.6 – 5 W/m².K voor transparante oppervlakken

De U-waarde wordt geoptimaliseerd voor de buitentemperatuur en de comforttemperatuur om zo de energiestroom door de constructie te beperken of juist te vergroten

Hoge thermische massa (HTM)

De aanname van een zware bouwmethode.

Lage thermische massa (LTM)

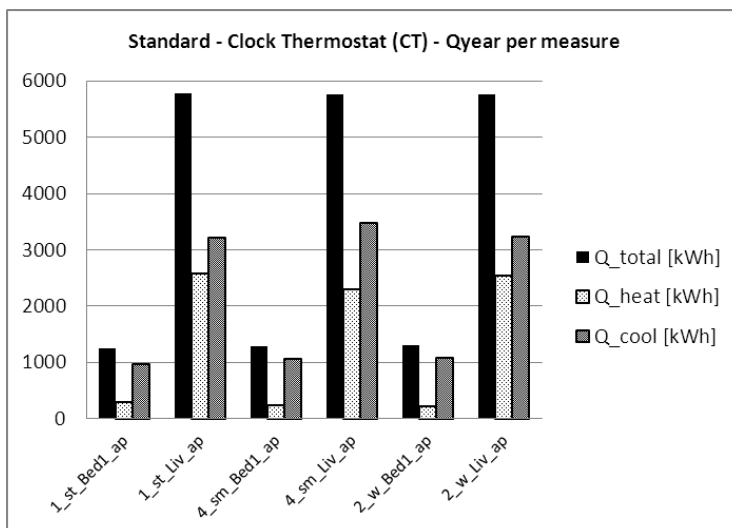
De aanname van een lichte bouwmethode.

Variabele thermische massa (VTM)

Variabele thermische massa volgens dagelijkse temperatuurfluctuatie en warmte- of koelvraag

8.2.2 Analyses van de energievraag

De resultaten van de verschillende maatregelen zijn zowel afzonderlijk als in verschillende combinaties weergegeven, om het energieverbruik te vergelijken. Er is een selectie van de meest illustratieve combinaties gemaakt om te laten zien hoeveel energie bespaard kan worden met behulp van deze maatregelen. Deze resultaten zijn van het jaar 2003, een jaar dat vaak gebruikt wordt in simulaties in Nederland vanwege de hete zomer. De referentiesituatie is die van een ruimte met een kamerthermostaat met een instelwaarde van 21.5 °C in de woonkamer en 19°C in de slaapkamer. Het energiegebruik van dit systeem is het referentie-energiegebruik waarmee alle andere strategieën vergeleken worden. De grafiek hieronder laat het percentage energiegebruik ten opzichte van het referentiesysteem zien. Het energiegebruik is verdeeld in verwarmingsenergie, koelingsenergie en totaal energiegebruik. Het besparingspotentieel is afgebeeld per bezettingsprofiel om de efficiëntie van de verschillende strategieën in verschillende bezettingsscenario's te vergelijken.



Figuur 8-2: Jaarlijkse energie consumptie van een standard woning met een klokthermostaat per kamer met verscheidene gebruiker profielen.

1_st_Bed1_ap = schema voor één student; hoofdslaapkamer van een appartement

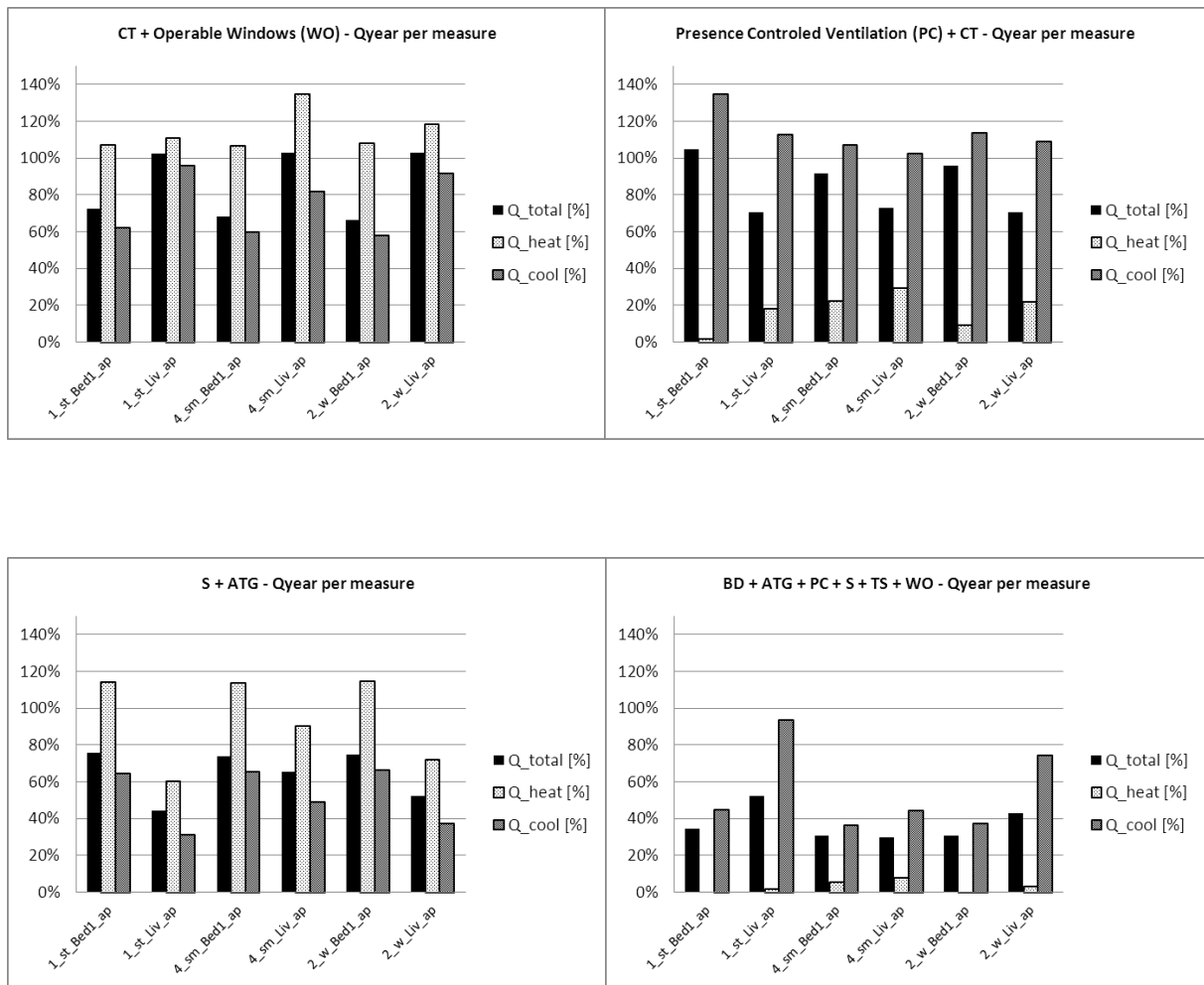
1_st_Liv_ap = schema voor één student; woonkamer van een appartement

4_sm_Bed1_ap = schema voor een gezin met twee kleine kinderen; hoofdslaapkamer van een appartement

4_sm_Liv_ap = schema voor een gezin met twee kleine kinderen; woonkamer van een appartement

2_w_Bed1_ap = schema voor tweeverdieners; hoofdslaapkamer

2_w_Liv_ap = schema voor tweeverdieners; woonkamer



Figuur 8-3: Jaarlijkse energie consumptie van verschillende hedendaagse controle mechanismen gebruikt in woningen vergeleken met de standard klokthermostaat verwarming van verscheidene gebruikers profielen. De koeling energie representeerd de energie die nodig is om oververhitting van de kamer te voorkomen.

CT = Klokthermostaat

WO = Te openen ramen

PC = Aanwezigheids gestuurde ventilatie (in de praktijk op basis van CO₂ concentratie)

BD = Brede dode band voor verwarming

ATG = Verwarming en koeling op basis van Adaptieve Temperatuurgrenzen

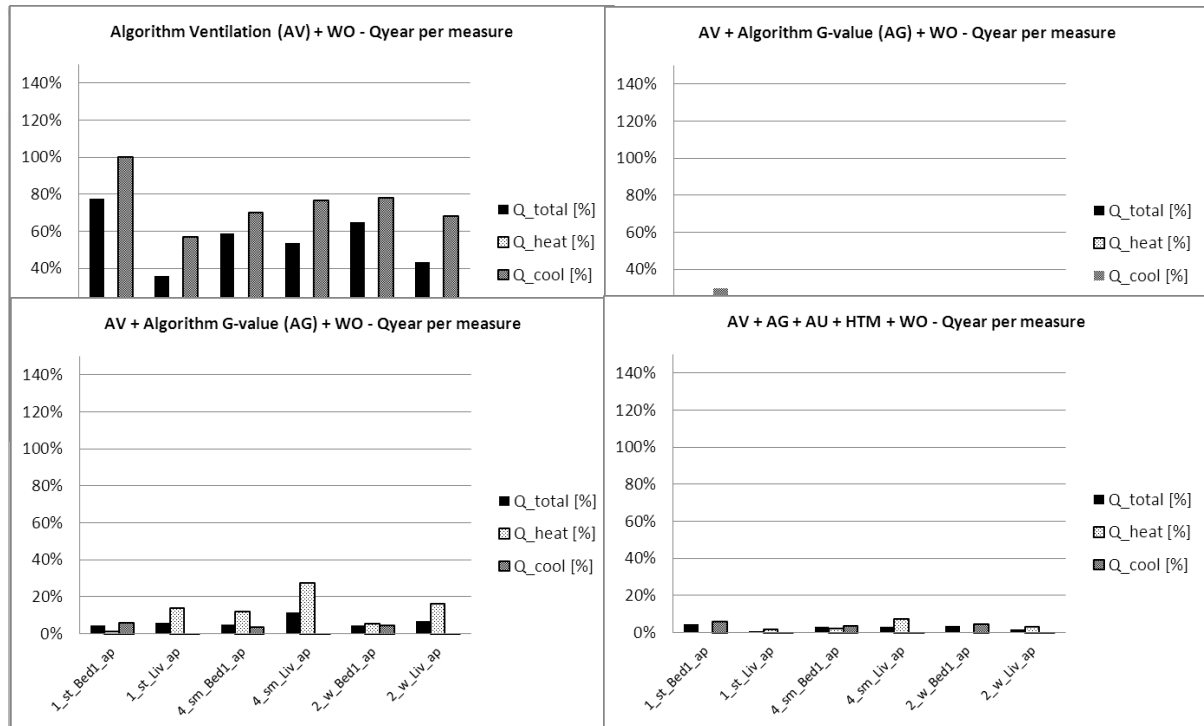
S = Verwarming en keeling alleen bij aanwezigheid van personen

TS = Thermisch isolrende luiken, altijd gesloten tijdens de nachturen

Zoals in figuur 8-3 te zien is, hebben de nu gangbare maatregelen vooral invloed op de verwarmingsvraag. Vooral het limiteren van de ventilatiehoeveelheid door middel van aanwezigheidsgecontroleerde ventilatie werkt vrij goed. Echter, als alleen deze methode wordt toegepast, doet zich in het referentiegeval zonder te openen ramen ernstige oververhitting voor, dus zijn extra maatregelen nodig.

De laatste variant in figuur 8-3 laat zien dat er zelfs met alle tegenwoordig gebruikte maatregelen nog steeds een significante hoeveelheid koeling toegepast moet worden om de bovengrens (temperatuur) van het comfortgebied niet te overschrijden. Dit is vooral het geval bij aanwezigheidsgecontroleerde ventilatie en gedurende de nacht gesloten thermisch isolerende rolluiken.

Dit betekent overigens niet dat ook daadwerkelijk gekoeld moet worden. De getoonde koellast wordt hier gebruikt als maat (indicatie) van de mogelijke oververhitting.



Figuur 8-4: Jaarlijks energiegebruik bij verschillende regel algoritmen zoals voorgesteld in dit onderzoek, vergeleken met een standaard verwarming met klok thermostaat en verschillende gebruiksprofielen.

AV = Algoritme voor ventilatieregeling op basis van aanwezigheid, binnen- en buitentemperatuur

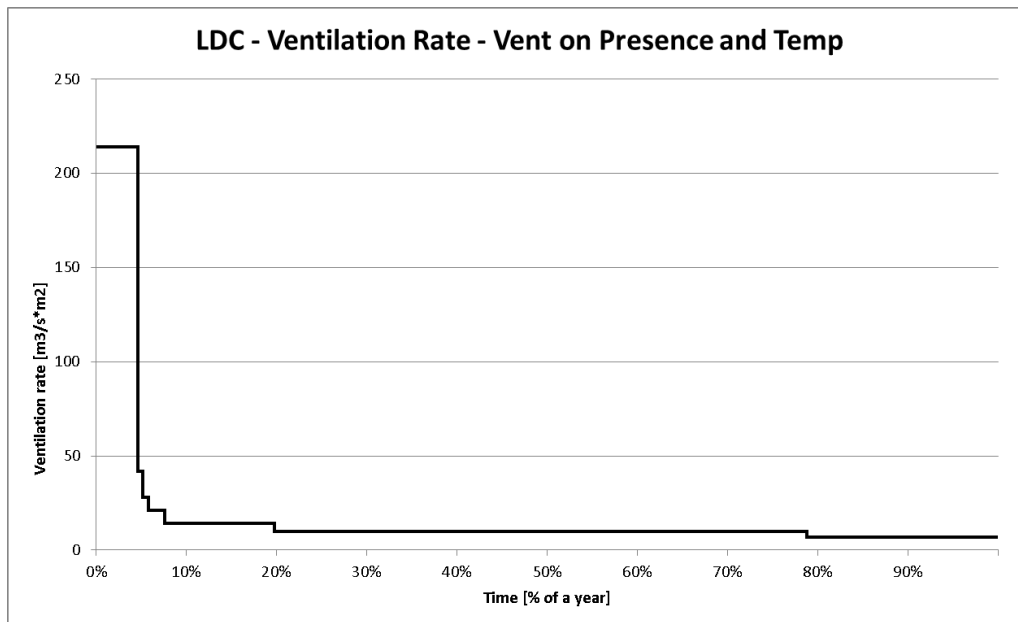
AG = Algoritme voor bediening van de zonwering op basis van binnentemperatuur en zonnestraling

AU = Algoritme voor aanpassing van de U-waarde op basis van binnen- en buitentemperatuur

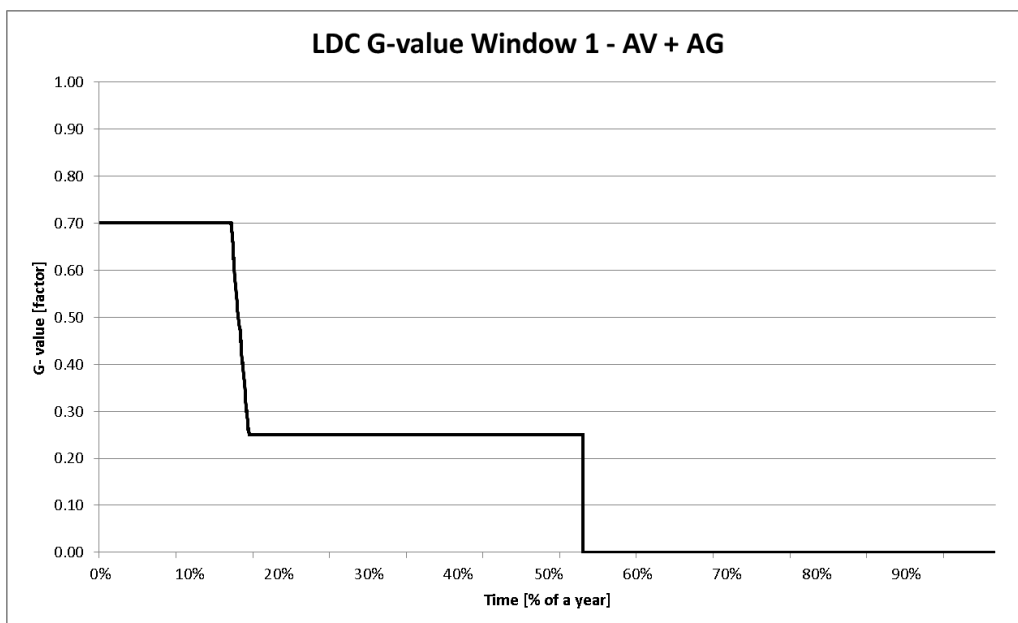
HTM = Hoge thermische massa, bijvoorbeeld alle wanden en vloeren in beton

Uitgaande van de standaardmaatregelen van figuur 8-3 vermindert het controleren van ventilatie en zonwering op basis van temperatuur en aanwezigheid het energiegebruik met ongeveer 25% van het oorspronkelijk energieverbruik, en soms zelfs nog beter, zoals te zien is in figuur 8-4. Hier beginnen ook de verschillen in efficiëntie per gebruikersprofiel zich af te tekenen. De voorgestelde maatregelen zijn nog steeds in elk profiel erg effectief, maar de efficiëntie verschilt per bezetting. Het kan zijn dat er voor het ontwerpen van het comfortstelsel al rekening is gehouden met de verwachte bezetting om zo de meest geschikte installatie te kiezen. Dit kan de woning echter minder flexibel voor toekomstig gebruik maken. Dit zijn overwegingen die gemaakt moeten worden met het ontwerpen van de woningen en systemen.

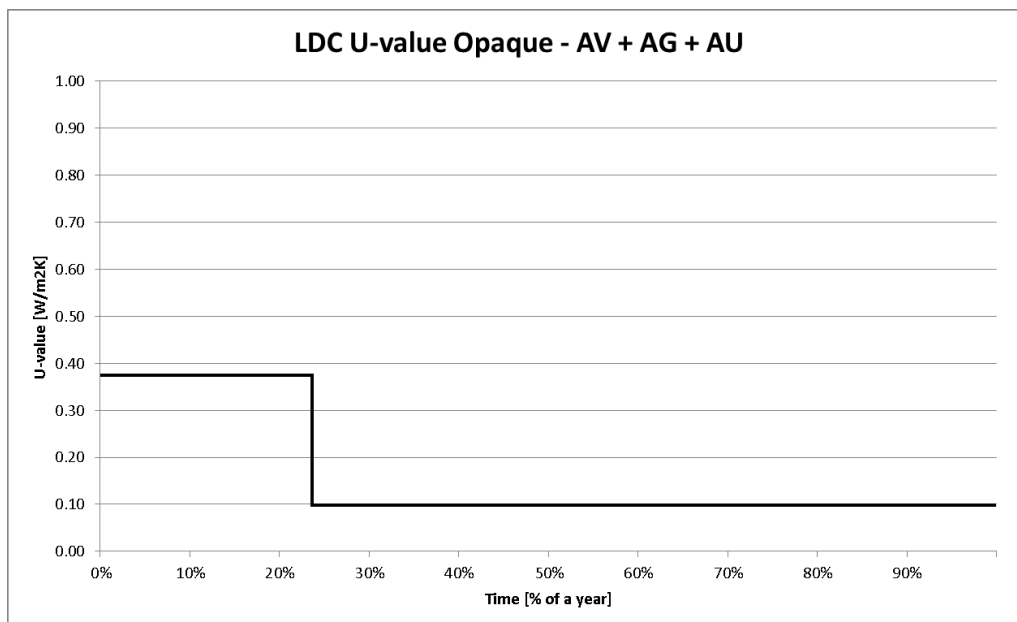
De volgende figuren (8-5 t/m 8-7) laten de instelcurves zien voor ventilatiehoeveelheid (AV), zonwering (AG) en U-waarde voor ondoorzichtige oppervlakken (AU). Getoond wordt het percentage (horizontale as) van het jaar waarin een instelling boven de waarde op de verticale as ligt. Deze grafieken gelden voor het gebruikersprofiel van het gezin met twee kleine kinderen in de woonkamer. In figuur 8-5 is te zien dat de benodigde ventilatie variabel is, maar meestal geminimaliseerd. Figuur 8-6 en 8-7 laten zien dat het voor de G-waarde en de U-waarde het beste is om een aan-uit of hoog-laag instelling te hebben.



Figuur 8-5: Instelcurve ventilatiedebiet voor bij aanwezigheid en temperatuur gestuurde ventilatie (AV) in de woonkamer van een familie met twee kleine kinderen.



Figuur 8-6: Instelcurve voor de G-waarde gestuurd door binnen temperatuur en zonnestraling (AG) in de woonkamer van een familie met twee kleine kinderen.



Figuur 8-7: Instelcurve voor de U waarde van ondoorzichtige oppervlakken gestuurd door binnen en buiten temperatuur (AU) in de woonkamer van een familie van een familie met twee kleine kinderen.

8.2.3 Conclusies 1^e orde model benadering

De resultaten laten zien dat de nieuw voorgestelde maatregelen allemaal significant helpen in het verminderen van de energievraag voor verwarming in de winter en het voorkomen van oververhitting in de zomer. Vooral het regelen van de ventilatie is erg effectief. Dit is ook een maatregel die relatief eenvoudig te realiseren is, door de instellingen van de ventilatoren en roosters.

Een belangrijke voorwaarde is daarnaast om de maatregelen ook automatisch te sturen tijdens afwezigheid van de bewoners. Conform de conclusies uit de vooronderzoeken van het project die zijn weergegeven in dit rapport, zijn er een aantal belangrijke randvoorwaarden voor de systemen om efficiënt te zijn. De oplossingen moeten robuust en weerbestendig zijn. Ook moet het mogelijk zijn voor de gebruiker om gemakkelijk de keuzes van het systeem te overrulen. De gebruiker moet geïnformeerd worden wanneer een instelling aangepast is, bij voorkeur door directe feedback (het zien van een raam wat geopend wordt of zonwering die neergelaten wordt) of via een display. Daarbij is het belangrijk om de gebruiker te voorzien van informatie over de redenen waarom een bepaalde instelling veranderd wordt.

Het onderzoek wordt verdiept met meer bezettingsscenario's en verschillende woningtypes. Vooral een variant met een eenkamerappartement is een interessant geval, omdat daar snel moet kunnen worden geschakeld tussen functies en dus comfortvraag. Het is interessant om te zien of er een balans gevonden kan worden in flexibiliteit, comfort en energiebesparing. Er is een optimalisatiestudie uitgevoerd om het effect van een variabele thermische massa effectief te onderzoeken. Verder kunnen sommige dagen of weken meer in detail beschouwd worden om de dynamiek van de maatregelen te kunnen zien. In het proefschrift van E.E. Alders [1] zullen aanbevelingen voor ontwikkelaars gedaan worden om bestaande oplossingen te verbeteren en nieuwe producten voor de bouwmarkt te ontwikkelen, om te voorzien in een meer flexibel en beter comfort tegen lagere energiekosten.

8.3 Analyse energievraag met geavanceerde dynamische simulaties

8.3.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt aan de hand van geavanceerde dynamische simulaties nagegaan of het toepassen van een snel vraaggestuurd (adaptief) verwarmingssysteem tot een lager energieverbruik zal leiden dan een conventioneel verwarmingssysteem [1]. Het vraaggestuurde verwarmingssysteem zoals beschouwd in het onderzoek levert warmte wanneer en waar nodig is, gebaseerd op een aanwezigheidspatroon van bewoners, dat varieert in tijd en ruimte.

Voor de bepaling van de energievraag voor ruimteverwarming worden verschillende variabelen die relevant zijn gevarieerd: aanwezigheid van bewoners, fysische eigenschappen van de woning, eigenschappen van systemen.

De vraagsturing vindt plaats op basis van aanwezigheid van bewoners in een bepaald vertrek, gedurende een bepaalde periode. Deze aanwezigheid van bewoners is gesimuleerd op basis van tijdbestedingonderzoek data van het Sociaal Cultureel Planbureau. Ook is op basis van dit tijdbestedingonderzoek een Markov-Chain model voor de aanwezigheid van bewoners opgesteld om de aanwezigheid van bewoners stochastisch te simuleren.

Er worden woningen beschouwd met een hoge thermische isolatie (nieuwbouw) en woningen met een lagere thermische isolatie (renovatie). Verder zijn verschillende verwarmingssystemen gemodelleerd; luchtverwarming, wandverwarming, en vloerverwarming. Naast een basisventilatie systeem wordt ook een vraaggestuurd ventilatiesysteem beschouwd.

Het gelijktijdig variëren van alle factoren die de energievraag voor ruimteverwarming bepalen zou resulteren in een zeer groot aantal simulatievarianten. Hierom is gekozen om een selectie van varianten te simuleren

Aan de energie aanbodzijde is onderzocht in hoeverre een duurzame energiebron een bijdrage kan leveren aan de ruimteverwarming. We beschouwen in het onderzoek zonne-energie door toepassing van een zonnecollector en boiler. Tevens is gekeken in welke mate de inzetbaarheid van zonne-energie beïnvloed wordt door het toepassen van vraaggestuurde ruimteverwarming.

Als conventioneel verwarmingssysteem is een vloerverwarmingssysteem genomen. Dit systeem functioneert bij relatief lage watertemperaturen; hierdoor kan waarschijnlijk een relatief groot aandeel in de warmtebehoefte geleverd worden door een zonneboiler. Een nadeel van dit systeem is dat het traag reageert op de behoefte van bewoners. Als snel vraaggestuurd verwarmingssysteem beschouwen we een luchtverwarmingssysteem en een wandverwarmingssysteem. Zo'n systeem reageert snel op de behoefte van bewoners en de totale warmtebehoefte zal waarschijnlijk lager zijn dan bij een conventionele verwarmingssysteem. Een nadeel van een snel vraaggestuurd verwarmingssysteem is echter dat hogere piekvermogens benodigd zijn. Het systeem functioneert dan bijvoorbeeld bij relatief hoge watertemperaturen; hierdoor is het aandeel in de warmtebehoefte dat door een zonnecollector geleverd kan worden waarschijnlijk kleiner dan het geval is voor het vloerverwarmingssysteem.

Verder is het ook van belang te onderzoeken of het toepassen van het vraaggestuurde verwarmingssysteem ook resulteert in een duurzamer energieverbruik voor ruimteverwarming. Hiertoe is onderzocht in welke mate een zonnecollector een bijdrage kan leveren aan de ruimteverwarming van een duurzame woning en hoe (de ruimteverwarming van) deze woning het best ontworpen zou kunnen worden.

De totale jaarlijkse warmtebehoefte benodigd bij de verschillende systemen, alsmede het aandeel hierin dat geleverd kan worden door een duurzame energiebron (zonne-energie) zijn belangrijke eigenschappen om te bepalen hoe een toekomstige duurzame woning het best ontworpen zou kunnen worden.

De thermische modellen voor de woningen met bijbehorende klimaatinstallaties zijn numeriek doorgerekend met het softwarepakket TRNSYS [54]. Stochastische simulatie van de aanwezigheid van bewoners zijn geprogrammeerd in en uitgevoerd met behulp van GNU Octave [21].

8.3.2 Beschrijving van de woning

8.3.2.1 Kenmerken van de woning

De kenmerken van de referentiewoning voor 2015 worden in dit hoofdstuk besproken. Dit onderzoek is gedaan met behulp van een SenterNovem referentie woning (eengezinswoning). De woning bevat een woonkamer met open keuken, hal, toilet op de begane grond; drie slaapkamers, overloop en badkamer op de eerste verdieping en een zolderverdieping. De achterzijde (woonkamerzijde) van de woning is gericht naar het zuiden. Beschouwd wordt een versie van de woning waarin de zolderverdieping onverwarmd is en waarin geen zolderraam aanwezig is. Daarnaast beschouwen we een versie van de woning waarin de zolderverdieping idealiter verwarmd is op 18 graden (de rest van de woning 20 graden), tevens is in deze woning een zolderraam aanwezig.

8.3.2.2 Ventilatie, spuien

De referentiewoning is uitgerust met een natuurlijke toevoer en mechanisch afvoer ventilatiesysteem. Ook wordt voor verschillende berekeningen een CO₂-gestuurd ventilatiesysteem beschouwd. Tevens wordt ook spui ventilatie in rekening gebracht, afhankelijk van de binnentemperatuur in het specifieke vertrek en de buitentemperatuur.

8.3.2.3 Isolatie

Voor woningen na 2015 beschouwen we een referentiewoning die goed geïsoleerd is; het glas van de ramen heeft een U-waarde van 0.7 W/m²/K, terwijl de ZTA-waarde 0.5 is. Voor de buitengevel wordt een warmteweerstand van ongeveer 5 m²K/W gehanteerd.

Voor renovatie beschouwen we een woning met een lagere isolatie. In dit geval is de warmteweerstand van de gevel ongeveer 2.5 m²K/W en is HR⁺⁺ glas toegepast met een U-waarde van 1.2 W/m²/K.

8.3.2.4 Interne warmtelast

De interne warmtelast wordt bepaald door de warmteafgifte van aanwezige personen enerzijds en de warmteafgifte van elektrische apparaten anderzijds.

Op basis van data omtrent de aanwezigheid van bewoners wordt de warmteafgifte gegenereerd door het menselijk metabolisme berekend. Voor een bewoning van vier bewoners, zoals in het TNO rapport "Herziening NEN5128 Formules voor berekening warmteverlies door ventilatie en infiltratie", [29], komt dit neer op ongeveer 2200 kWh op jaarbasis, 40% hiervan is latente warmte (de potentiële condensatie van de uitgestoten waterdamp).

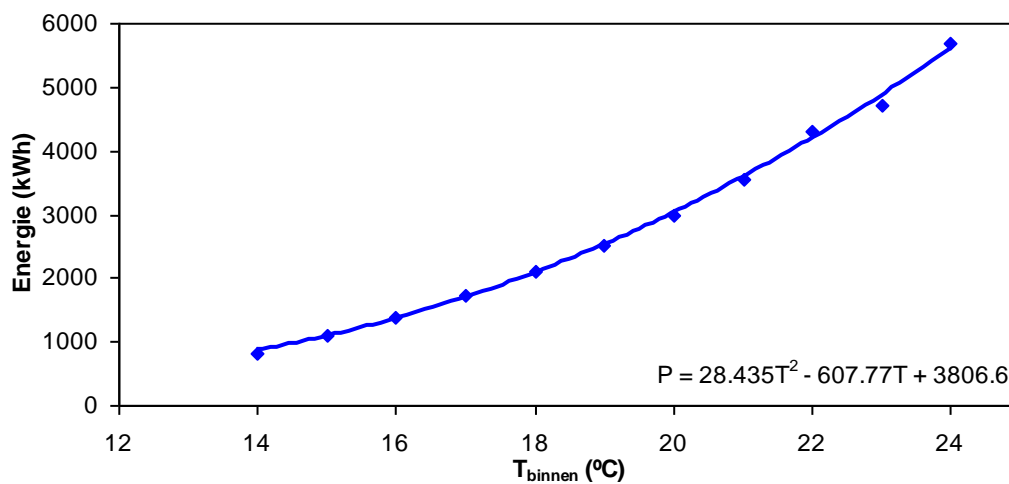
De totale warmteafgifte door elektrische apparaten is gebaseerd op ref. [42]. In dit rapport wordt uitgegaan van een jaarlijkse warmteafgifte van 3660 kWh. Hier wordt er echter vanuit gegaan dat na 2015 de warmteafgifte van verlichting, was/vaatwasser en stand-by functies gehalveerd is. In dat geval is de jaarlijkse warmteafgifte ongeveer 2900kWh.

8.3.2.5 Meteorologie

De gebruikte meteorologische condities zijn gebaseerd op NEN5060:2008

8.3.3 Energiebehoefte voor ruimteverwarming

De energiebehoefte voor ruimteverwarming is onderzocht als functie van de gewenste binnentemperatuur. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 8-8



Figuur 8-8: De benodigde stookenergie (kWh) als functie van de gewenste binnentemperatuur (°C).

Uit Figuur 8-8 blijkt dat de relatie tussen de benodigde verwarmingsenergie en de binnentemperatuur niet lineair is, wat wel het geval zou zijn als men simpelweg koude buitenlucht opwarmt tot de gewenste temperatuur (bijv. $T_{\text{binnen}} = 20$ of 21 t.o.v. $T_{\text{buiten}} = 6$, $\rightarrow (21-6)/(20-6) = 1.07$).

Dit wordt o.a. veroorzaakt door het feit dat de interne warmtelast, die een aanzienlijke bijdrage levert aan de hoeveelheid warmte in een goed geïsoleerde woning, niet gerelateerd is aan de buitentemperatuur. Tevens zijn er andere processen die niet-lineair in de temperatuur zijn, bijvoorbeeld de warmteafstraling van de gevel en het dak.

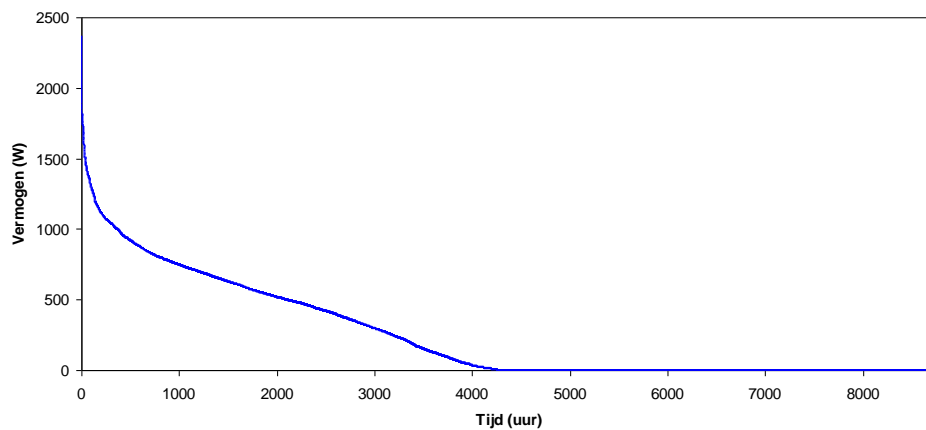
Uit berekeningen blijkt dat de gemiddelde temperatuur in de (goed geïsoleerde) woning gedurende het stookseizoen ongeveer 15 °C is indien de woning niet wordt verwarmd. Deze relatief hoge temperatuur geeft een verklaring voor de sterke procentuele toename van de warmtevraag bij een setpointtoename van 1 °C. In het onderzoek hebben we een setpoint temperatuur van 20 °C toegepast.

8.3.3.1 Ideale verwarming

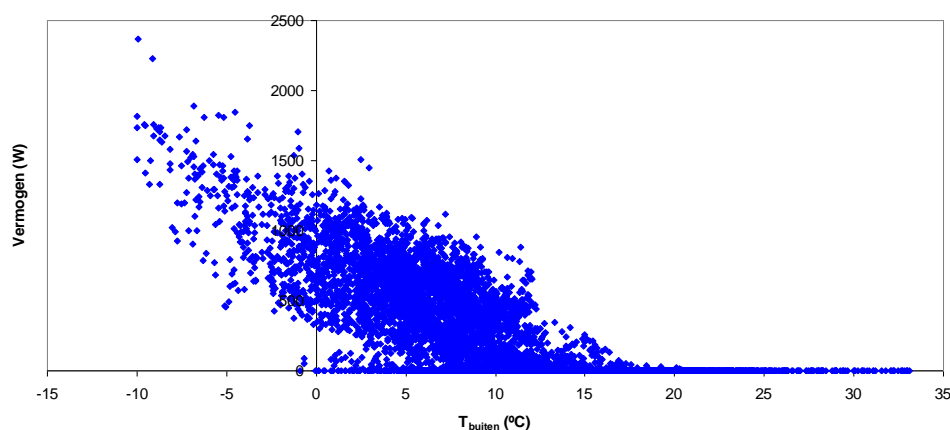
In eerste instantie zijn modelberekeningen uitgevoerd een voor de woning met een ideale verwarming. Op basis van deze berekeningen wordt een belastingduurkromme in beeld gebracht en tevens wordt de stooklijn (energiebehoefte als functie van de buitentemperatuur) bepaald.

(Later worden modelberekeningen uitgevoerd voor een woning met een vloerverwarmingssysteem; in deze berekeningen is geen thermostaat aanwezig, maar de temperatuur van het water dat in het vloerverwarmingssysteem stroomt heeft door de tijd heen een zodanige temperatuur dat de belastingduurkromme en stooklijn, zoals bepaald in het geval van ideale verwarming, zo goed mogelijk gereproduceerd worden.)

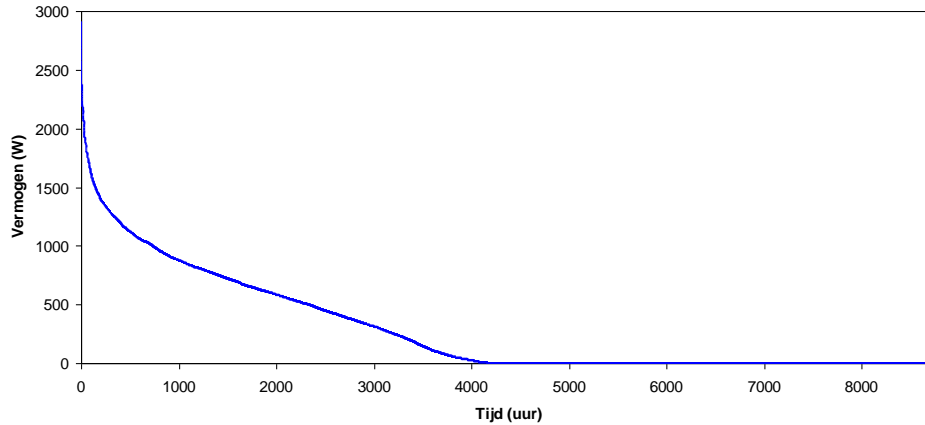
In onderstaande figuren worden de resultaten voor de belastingduurkromme en de stooklijn in geval van ideale verwarming getoond. Figuur 8-9 en Figuur 8-10 zijn gebaseerd op berekeningen voor de woning zonder zolderverwarming; Figuur 8-11 en Figuur 8-12 zijn gebaseerd op berekeningen voor de woning met zolderverwarming. De totaal benodigde stookenergie in geval van ideale verwarming bedraagt op jaar basis 2189kWh en 2534kWh voor de woning zonder zolderverwarming respectievelijk de woning met zolderverwarming.



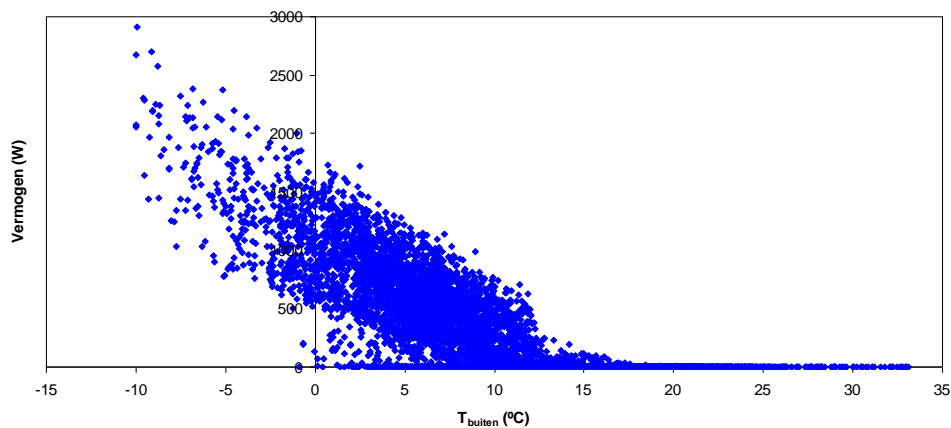
Figuur 8-9: Belastingduurkromme: Stookvermogen (W) als functie van de tijd (uur) voor de referentiewoning, in geval van ideale verwarming.



Figuur 8-10: Stooklijn: Stookvermogen (W) als functie van de buiten temperatuur (°C) voor de referentiewoning, in geval van ideale verwarming.



Figuur 8-11: Belastingduurkromme: Stookvermogen (W) als functie van de tijd (uur) voor de referentiewoning met zolderverwarming, in geval van ideale verwarming.



Figuur 8-12: Stooklijn: Stookvermogen (W) als functie van de buiten temperatuur (°C)) voor de referentiewoning met zolderverwarming, in geval van ideale verwarming.

8.3.3.2 Vloerverwarmingssysteem

Een voordeel van een lage-temperatuur vloerverwarmingssysteem, dat de woning continu verwarmt, is dat de water temperaturen relatief laag zijn (lager dan 30 graden); hierdoor kan waarschijnlijk een relatief groot aandeel van de warmtebehoefte geleverd worden door een zonnecollector. Een nadeel van het systeem is dat het traag reageert.

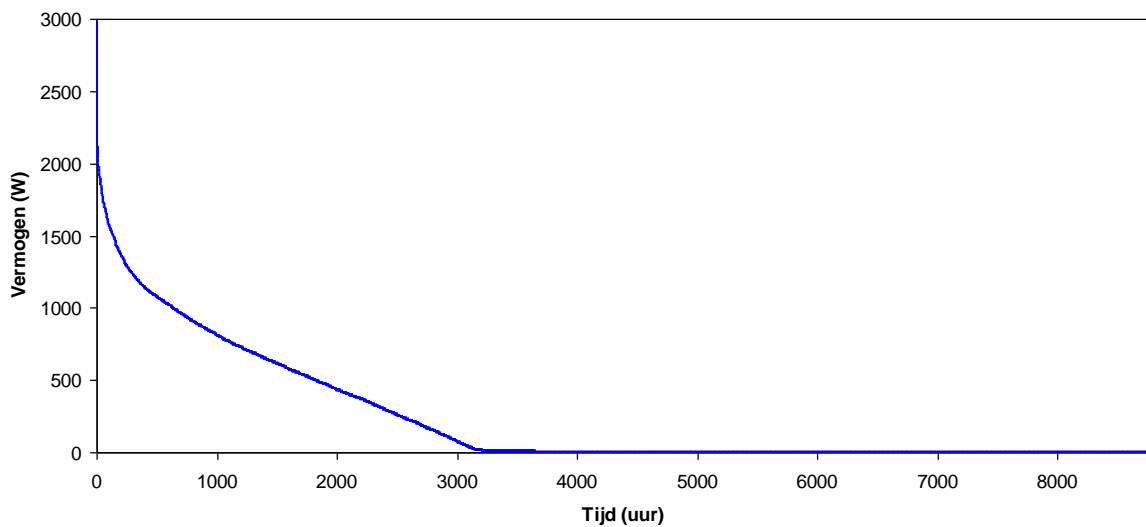
De vloeren van de begane grond en de eerste verdieping worden verwarmd in de woning zonder zolderverwarming. De afstand tussen de buizen van het vloerverwarmingssysteem is 25 cm op de begane grond en 15 cm op de eerste verdieping. In de woning met zolderverwarming worden de vloeren van alle drie woonlagen verwarmd. In dit geval bedraagt de afstand tussen de buizen voor alle woonlagen 20 cm.

Beschouwd wordt een vloerverwarmingssysteem dat niet met een thermostaat geregeld wordt, in plaats hiervan wordt de temperatuur van het ingaande water geregeld als een lineaire functie van de buitentemperatuur, $T_{\text{water}} = 24.36 - 0.364 \cdot T_{\text{buiten}}$, met als minimum de temperatuur van het uitgaande water. (Bijvoorbeeld bij een buitentemperatuur van -10 graden wordt het water opgewarmd tot 30 graden). Uit de berekeningen blijkt dat zonder thermostaat de binnentemperatuur gedurende het jaar behoorlijk stabiel blijft. Een beperkt deel van de tijd, gedurende de zomer, is de binnentemperatuur hoger dan 24 °C. In de woning is de minimum temperatuur van de eerste verdieping ongeveer 18 °C. De temperatuur op de begane grond (keuken en woonkamer) is minimaal 20 °C.

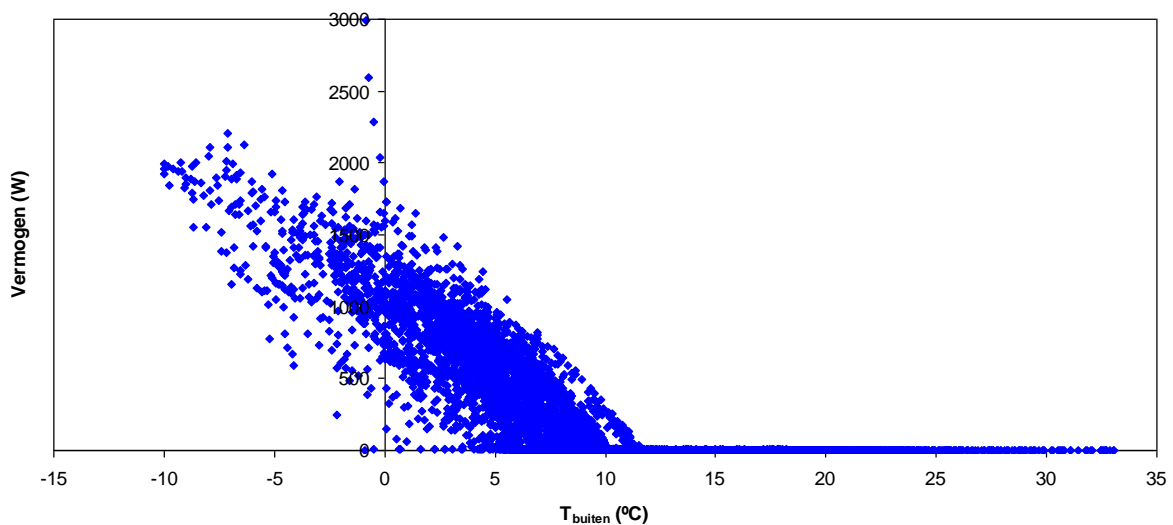
Met bovengenoemde eigenschappen van het vloerverwarmingssysteem wordt de stooklijn van een ideale verwarming benaderd. De belastingduurkromme en de stooklijn in geval van het vloerverwarmingssysteem zijn weergegeven in Figuur 8-13 en Figuur 8-14 voor de woning zonder zolderverwarming en in Figuur 8-15 en Figuur 8-16 voor de woning met zolder verwarming.

De totaal benodigde stookenergie bedraagt op jaar basis 2047 kWh en 3301 kWh voor de woning zonder zolderverwarming en de woning met zolderverwarming respectievelijk.

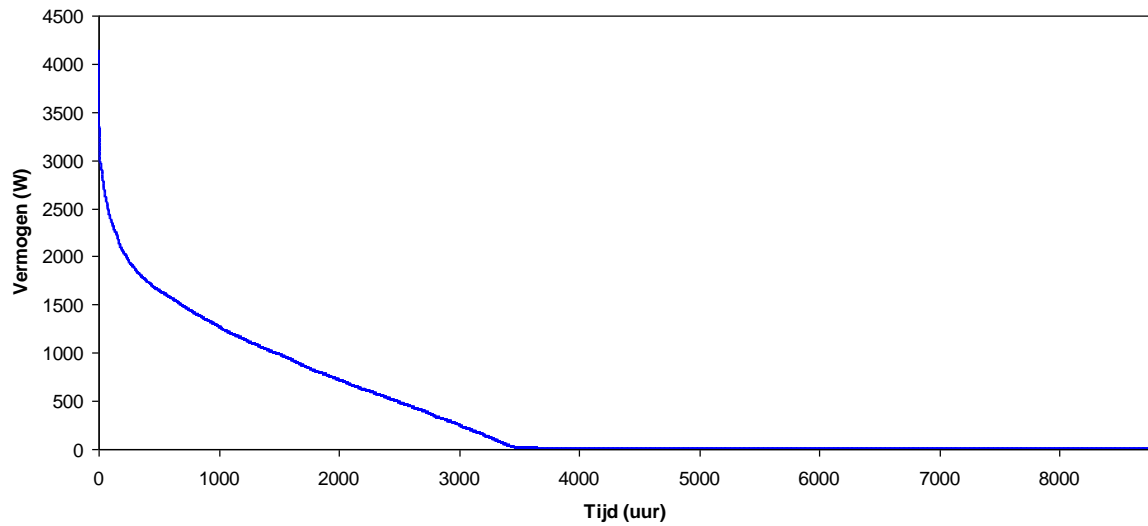
Een scatterplot van de temperatuur in de woonkamer en een slaapkamer is ter illustratie weergegeven in Figuur 8-17 en Figuur 8-18. Zonder thermostaat blijft de binnentemperatuur gedurende het jaar behoorlijk stabiel. Een beperkt deel van de tijd, gedurende de zomer, is de binnentemperatuur hoger dan 24 graden In de woning zonder zolderverwarming ligt de minimum temperatuur van de eerste verdieping op ongeveer 18 graden. In de woning met zolderverwarming gaat dit omhoog naar ongeveer 20 graden en ligt de minimum temperatuur van de zolderverdieping op 18 graden. In alle gevallen is de minimum temperatuur in de woonkamer 20 graden.



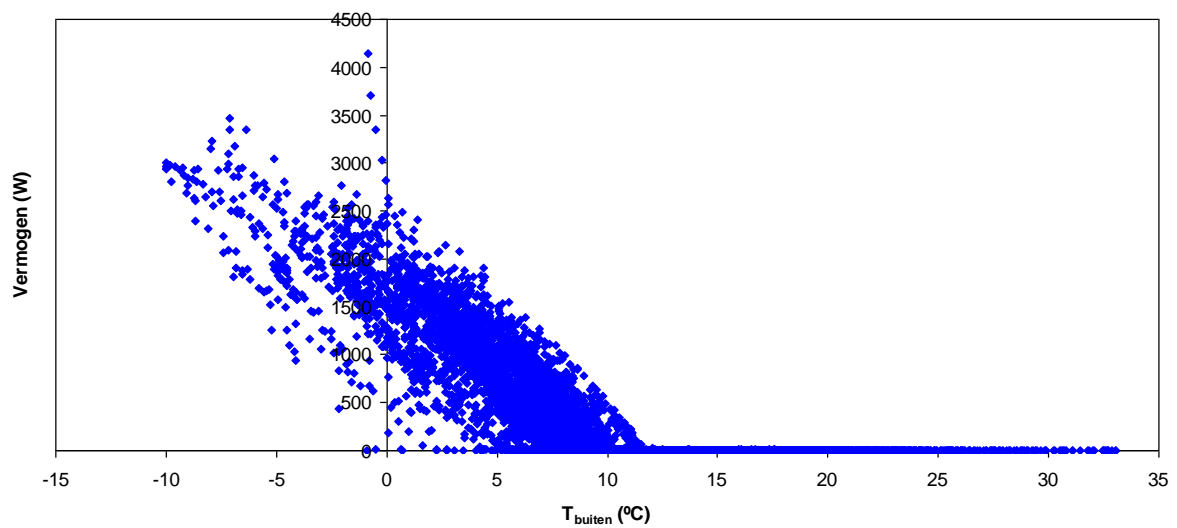
Figuur 8-13: Belastingduurkromme: Stookvermogen (W) als functie van de tijd (uur) voor de referentiewoning, in geval van vloerverwarming.



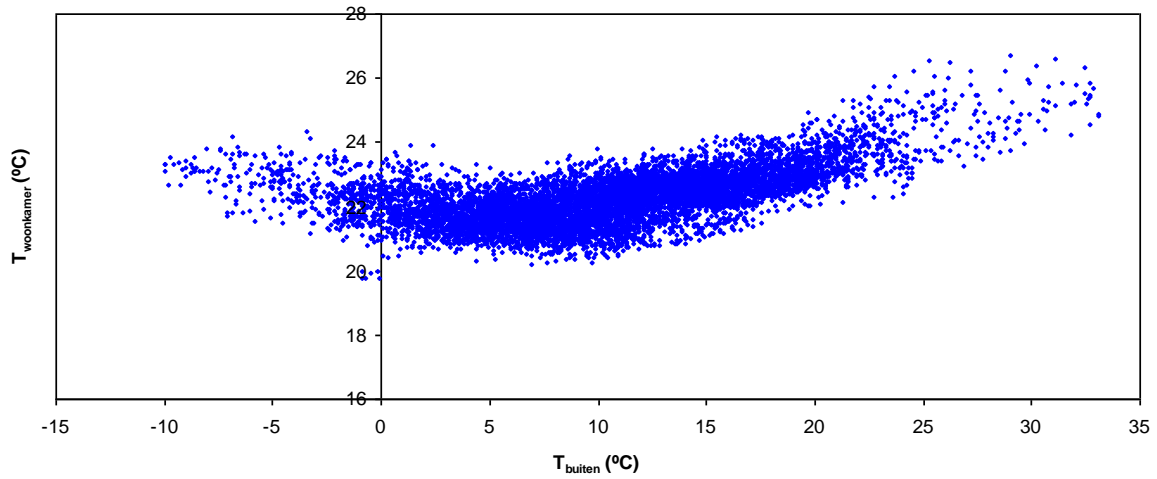
Figuur 8-14: Stooklijn: Stookvermogen (W) als functie van de buiten temperatuur (°C)) voor de referentiewoning, in geval van vloerverwarming.



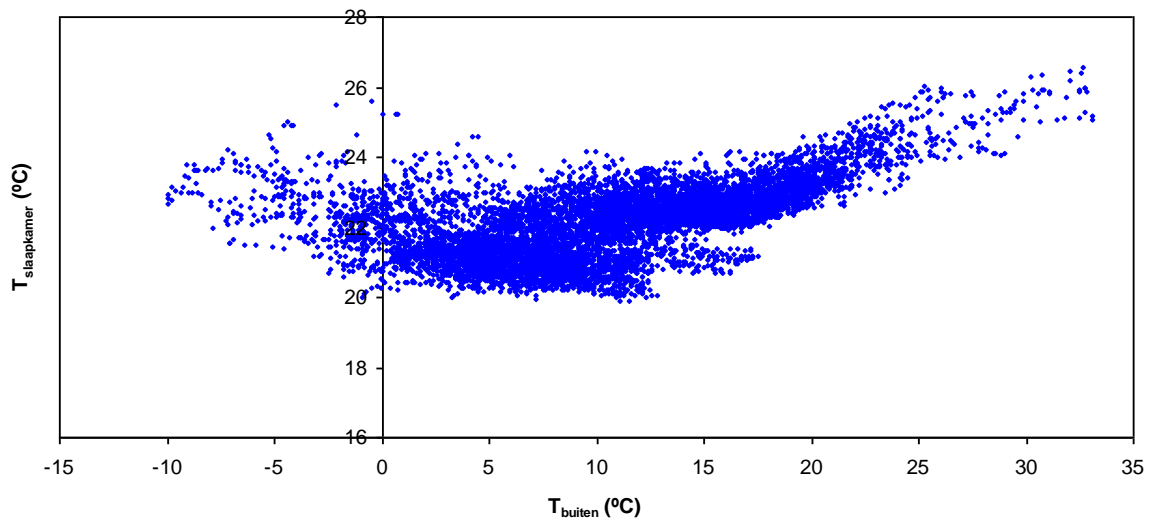
Figuur 8-15: Belastingduurkromme: Stookvermogen (W) als functie van de tijd (uur) voor de referentiewoning met zolderverwarming, in geval van vloerverwarming.



Figuur 8-16: Stooklijn: Stookvermogen (W) als functie van de buiten temperatuur (°C) voor de referentiewoning met zolderverwarming, in geval van vloerverwarming.



Figuur 8-17: Woonkamertemperatuur (°C) als functie van de buiten temperatuur (°C) in geval van vloerverwarming.



Figuur 8-18: Slaapkamertemperatuur (°C) als functie van de buiten temperatuur (°C) in geval van vloerverwarming.

8.3.3.3 Vraaggestuurd verwarmingssysteem: luchtverwarming

Beschouwd wordt een vraaggestuurd luchtverwarmingssysteem dat warme lucht de vertrekken inblaast indien personen in het vertrek aanwezig zijn en de temperatuur lager is dan de set point temperatuur.

Een voordeel van dit systeem is dat het snel reageert en dat de totale warmtebehoefte lager zal zijn dan wanneer de woning continu verwarmd wordt, zoals bij het vloerverwarmingssysteem. Een nadeel van dit systeem is dat er hogere piekvermogens geleverd moeten worden en dat daardoor de water temperaturen relatief hoog zijn. Hierdoor kan, vergeleken met een lage-temperatuur verwarmingssysteem (bijv. vloerverwarming), waarschijnlijk een kleiner aandeel van de warmtebehoefte geleverd worden door een zonnecollector.

In elk vertrek is een thermostaat aanwezig die de temperatuur regelt op 20 °C (met een “dode band” van 1 °C) indien een bewoner aanwezig is in het vertrek. Een warmtewisselaar wordt gebruikt om energie uit warm water over te dragen aan lucht. De verwarmde lucht wordt de vertrekken ingeblazen met een viervoudige ventilatie. De ingeblazen lucht circuleert door de woning.

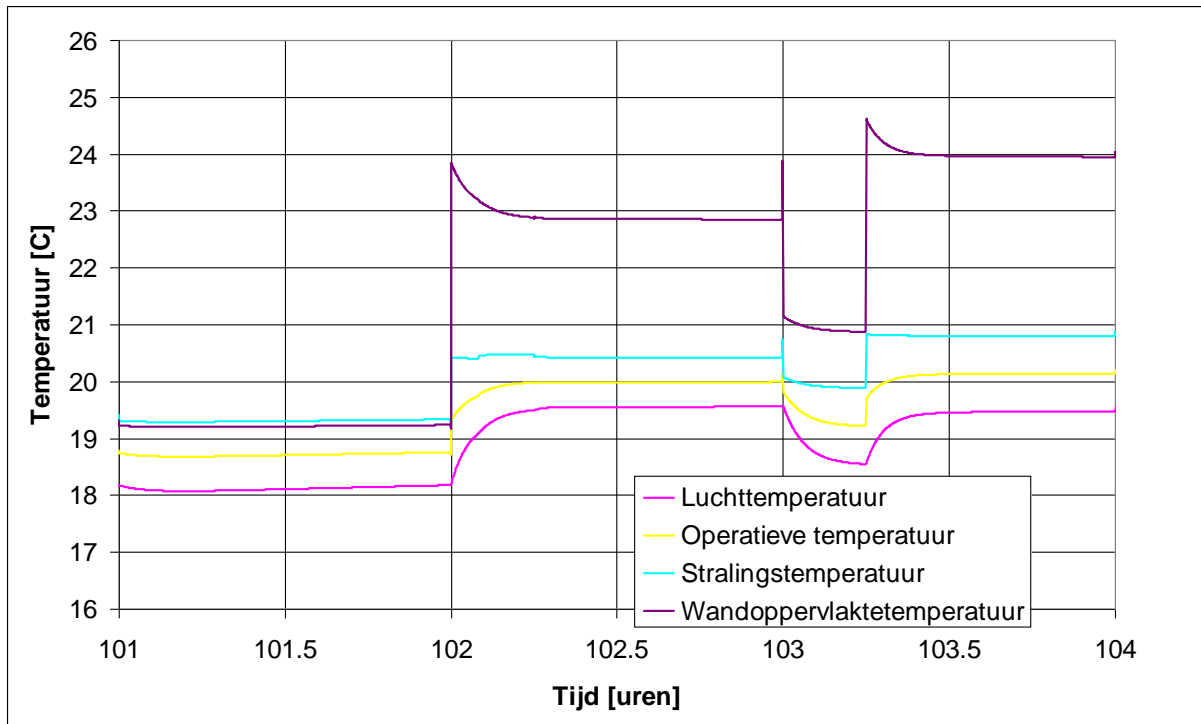
De temperatuur van het ingaande warme water kan, zoals bij het vloerverwarmingssysteem, geregeld worden als een lineaire functie van de buitentemperatuur. Voor het luchtverwarmingssysteem wordt aangehouden $T_{\text{water}} = 43.2 - 0.682 \cdot T_{\text{buiten}}$, waarbij als minimum de temperatuur van het uitgaande water wordt gehanteerd. Bij deze functie heeft het luchtverwarmingssysteem voldoende vermogen om op de koudste dag van het jaar (en ook de rest van het jaar) aan de warmtevraag te voldoen. De temperatuur van het ingaande warme water kan echter ook constant gehouden worden gedurende het jaar. In het model volstaat een watertemperatuur van 50 °C om de gevraagde piekvermogens te kunnen leveren. Omdat het luchtverwarmingssysteem snel reageert en schakelt maakt het voor het totale energieverbruik niet veel uit of de temperatuur van het ingaande water varieert met de buitentemperatuur of constant wordt gehouden. Het is echter wel relevant voor het aandeel in de totale energieverbruik dat door een zonneboiler geleverd kan worden. In het geval van de variabele watertemperatuur kan een groter aandeel door de zonneboiler geleverd worden dan in het geval van de constante watertemperatuur. De reden hiervoor is dat in geval van de variabele watertemperatuur de temperatuur meestal lager is dan 50 °C.

In het model kan het luchtverwarmingssysteem binnen een tijdsbestek van vijf minuten een ruimte verwarmen. Om dit goed te kunnen modelleren moet de gebruikte tijdstap in het model aanzienlijk kleiner zijn dan dit tijdsbestek. Bij een simulatie tijdstap van één minuut wordt een voldoende convergentie van de resultaten bereikt, dit gaat echter wel ten koste van de snelheid waarmee het model op jaarbasis doorgerekend kan worden.

8.3.3.4 Vraaggestuurd verwarmingssysteem: wandverwarming

Vraaggestuurde verwarming kan ook gerealiseerd worden middels een wandverwarmingssysteem. In het model wordt een proportionele regeling gehanteerd. Het afgegeven vermogen van de wandverwarming in een specifiek vertrek is dan evenredig met het verschil tussen de set point en daadwerkelijk operationele temperatuur, in geval bewoners aanwezig zijn.

Figuur 8-19 illustreert de werking van het wandverwarmingssysteem.



Figuur 8-19: Wandverwarming, verwarming op basis van aanwezigheid.

8.3.4 Energievraag

In deze sectie wordt de energievraag voor ruimteverwarming besproken. Variabelen die in belangrijke mate het energieverbruik voor ruimteverwarming bepalen worden hierbij gevarieerd

Aanwezigheid bewoners

De aanwezigheid van bewoners speelt een belangrijke rol in de energie benodigd voor ruimteverwarming. In de simulaties worden vetrekken in de woning alleen verwarmd indien er bewoners aanwezig zijn. Tevens wordt de interne warmtelast, door de warmteafgifte van aanwezige personen enerzijds en de warmteafgifte van elektrische apparaten anderzijds in de simulaties meegenomen, zie ook hoofdstuk 8.3.2.

Eigenschappen woning

Woningen na 2015 beschouwen we als goed geïsoleerd; het glas van de ramen heeft een U-waarde van $0.7 \text{ W/m}^2/\text{K}$, terwijl de ZTA-waarde 0.5 is. Voor de buitengevel wordt een warmteweerstand van ongeveer $5 \text{ m}^2\text{K/W}$ gehanteerd.

Voor renovatie van bestaande woningen beschouwen we woningen met een lagere isolatie. In dit geval is de warmteweerstand van de gevel ongeveer $2.5 \text{ m}^2\text{K/W}$ en is HR⁺⁺ glas toegepast met een U-waarde van $1.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

De in de simulaties gebruikte meteorologische condities (zoals buitentemperatuur) zijn gebaseerd op NEN5060:2008.

Eigenschappen systeem

Verskillende verwarmingssystemen zijn gemodelleerd: vloerverwarming, luchtverwarming, ruimteverwarming, zie ook hoofdstuk 8.3.2. Naast een basisventilatie, waarbij de ventilatie hoeveelheden zijn gebaseerd op [21], is in enkele varianten ook gekeken naar het effect van vraaggestuurde ventilatie CO₂-sturing.

8.3.5 Aanwezigheid bewoners

Voor de simulatie van aanwezigheid van bewoners is gebruikt gemaakt van tijdsbestedingsdata van het “Sociaal Cultureel Planbureau” [48]. In de berekeningen gebruiken we drie soorten bewoning:

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

Hierbij dient aangemerkt te worden dat de respondenten in het tijdsbestedingsonderzoek aangeven uit hoeveel personen hun huishouden bestaat en wat hun positie in dit huishouden is; bijvoorbeeld: hoofdkostwinnaar, nevenkostwinnaar of kind. Per huishouden is de tijdsbesteding enquête door één bewoner ingevuld. Hierdoor zullen correlaties tussen aanwezigheid van bewoners in één huishouden dus niet uit deze data afgeleid kunnen worden en in de simulaties in rekening gebracht worden.

Veelal worden aanwezigheidsprofielen in een thermisch gebouwmodel op een deterministische wijze in rekening gebracht. In dat geval wordt gedurende iedere dag of week in het hele jaar eenzelfde aanwezigheidsschema gehanteerd in de berekeningen.

Echter, in werkelijkheid zal er variatie optreden in de aanwezigheid van bewoners. In tegenstelling tot de conventionele wijze van aanwezigheidsmodellering (deterministische profielen) is onderzocht of variatie in aanwezigheid van bewoners op een willekeurige (stochastische wijze) gesimuleerd kan worden.

In aansluiting op ontwikkelingen in de recente literatuur is daarvoor een Markov-Chain Monte Carlo (MCMC) model opgesteld voor de simulatie van aanwezigheid van bewoners. Met een MCMC model kan de aanwezigheid van bewoners gedurende de tijd stochastisch gegenereerd worden. De aanwezigheid van bewoners wordt dan bepaald op basis van waarschijnlijkheden die gebaseerd zijn op de tijdsbestedingsdata. Soortgelijke methoden om de aanwezigheid van bewoners en het daaraan gerelateerde energieverbruik op een stochastische wijze te simuleren worden ook in de literatuur toegepast, zie hiervoor bijvoorbeeld [40], [46] en [57].

Het ontwikkelde MCMC model voor aanwezigheid, gebaseerd op Nederlandse tijdsbestedingsdata, wordt in meer detail beschreven in bijlage 2.

In de volgende paragrafen worden de resultaten voor het jaarlijkse energieverbruik voor ruimteverwarming, en de spreiding hierin ten gevolge van een spreiding in de aanwezigheid van bewoners, besproken. Hierbij worden goedgeïsoleerde nieuwbouw woningen en minder goed geïsoleerde bestaande bouw beschouwd. Als verwarmingssystemen die snel en vraaggestuurd warmte kunnen leveren, daar waar nodig is en wanneer nodig is, beschouwen we luchtverwarming en wandverwarming

8.3.6 Woningen vanaf 2015

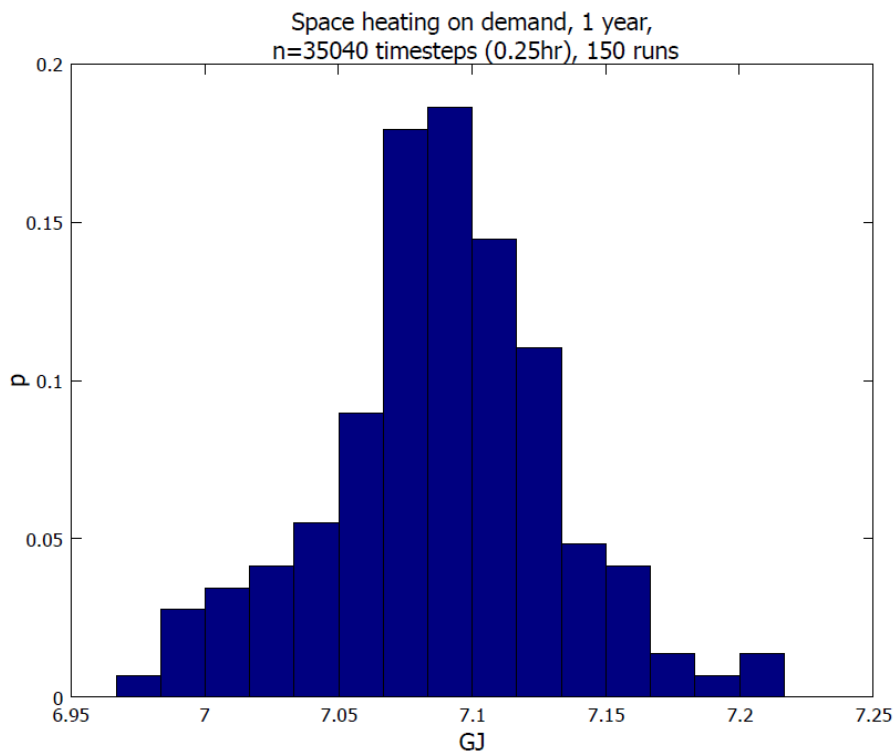
Voor woningen na 2015 beschouwen we een referentiewoning die goed geïsoleerd is; het glas van de ramen heeft een U-waarde van $0.7 \text{ W/m}^2/\text{K}$, terwijl de ZTA-waarde 0.5 is. Voor de buitengevel wordt een warmteweerstand van ongeveer $5 \text{ m}^2\text{K/W}$ gehanteerd.

8.3.6.1 Resultaten luchtverwarming

Voor het luchtverwarmingsmodel zijn drie typen huishouden beschouwd:

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

De verschillende varianten die berekend zijn middels de Markov-Chain Monte Carlo methode (zie bijlage 2) worden weergegeven in Figuur 8-20, Figuur 8-21 en Tabel 8-1.



Figuur 8-20: Histogram van energieverbruik in geval van 2 werkenden gesimuleerd middels Markov-Chain Monte Carlo methode. Aanwezigheid is voor alle weken in het jaar stochastisch gegenereerd.

Woning	ventilatie	afgiftesysteem	Gebruik	energie 1 jaar (GJ)	Opmerking
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	Werkenden	7.00 – 7.22	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	Ouderen	7.68 – 7.81	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	4 personen	9.14 – 9.21	vraaggestuurd verwarmen

Tabel 8-1: Aanwezigheid is voor alle weken in het jaar stochastisch gesimuleerd, middels Markov-Chain Monte Carlo methode.

Uit de stochastische berekening blijkt dat het energieverbruik op jaarbasis voor twee werkenden het laagst is en voor het vier persoon huishouden het grootst, het energieverbruik van twee ouderen ligt daartussen.

De spreiding in energieverbruik, die uit de Markov-Chain Monte Carlo berekening volgt, voor de drie typen huishouden is opvallend klein: 0.8% voor vier personen, 1.7% voor twee ouderen en 3.1% voor twee werkenden.

Vermoedelijk is dit inherent aan de methode. Extreme waarden (veel aanwezigheid of veel afwezigheid) hebben een lage waarschijnlijkheid om met de Markov-Chain Monte Carlo methode gegenereerd te worden.

Daarvoor zijn ook berekeningen uitgevoerd op basis van een Markov-Chain Monte Carlo methode waarin de aanwezigheid voor één week stochastisch gegenereerd wordt en waarbij deze week vervolgens voor het hele jaar gebruikt wordt. In dat geval zal de gevonden spreiding in de warmtevraag groter worden. De gevonden resultaten worden weergegeven in Figuur 8-21 t/m 8-24. De spreiding in energieverbruik, die uit deze Markov-Chain Monte Carlo berekening volgt, is 13.8% voor een huishouden bestaande uit twee werkenden.

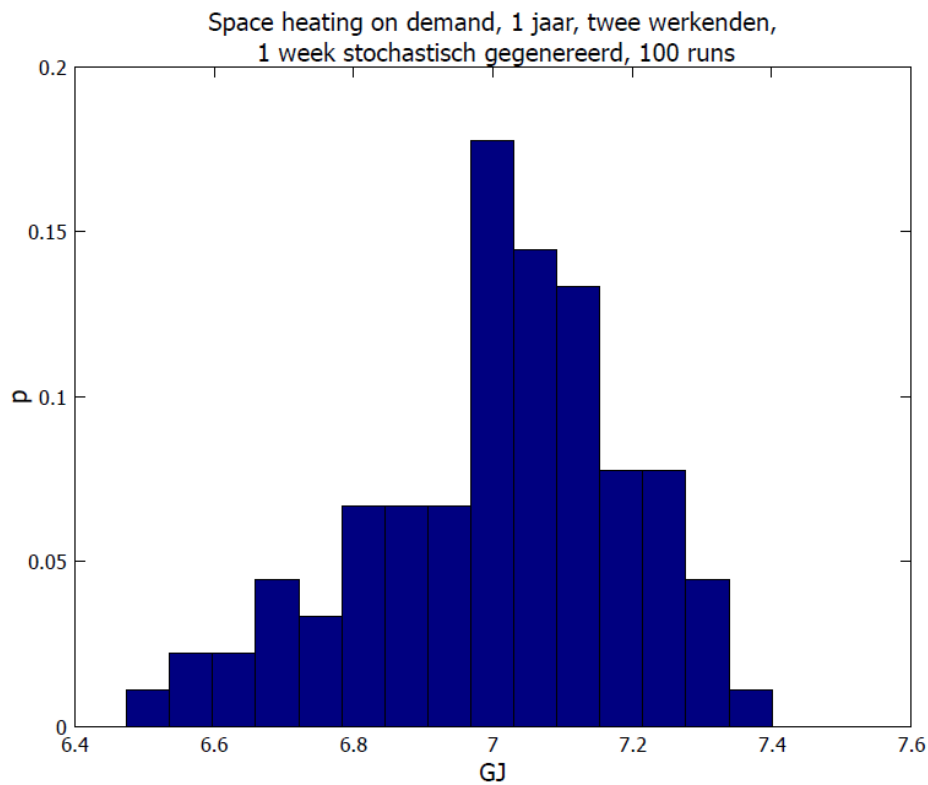
De variatie in energieverbruik is met deze methode inderdaad groter dan de variatie die gevonden wordt op basis van de Markov-Chain Monte Carlo methode.

De Markov-Chain Monte Carlo methode, zoals die ook in de literatuur wordt toegepast voor de stochastische simulatie van aanwezigheid en energieverbruik (Refs. [40], [46] en [57]) blijkt niet geschikt te zijn om een realistische spreiding te vinden in het jaarlijkse energieverbruik voor, op aanwezigheid gebaseerde vraaggestuurde, ruimteverwarming.

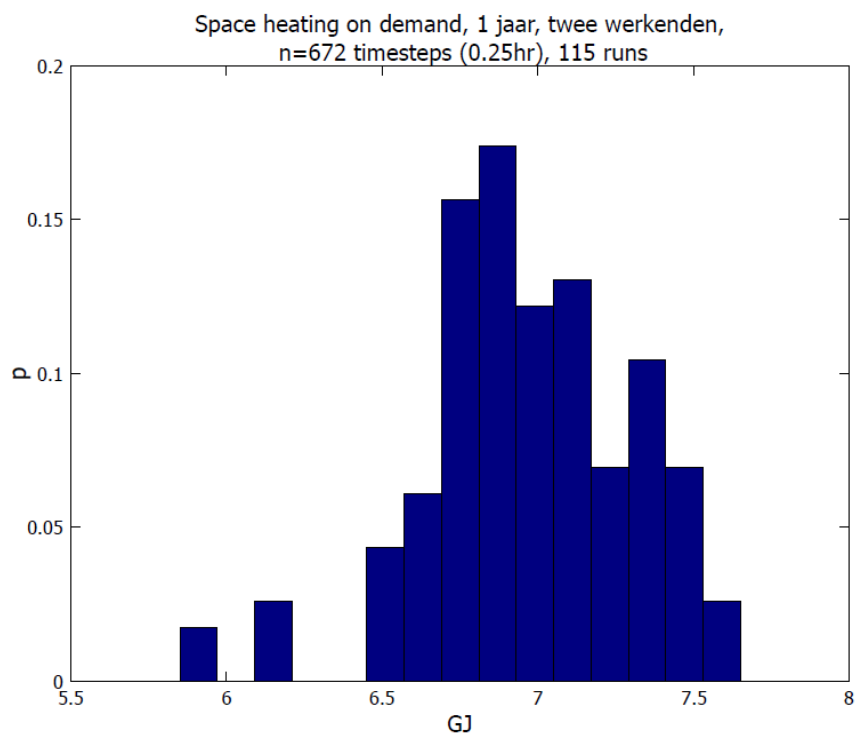
Dit komt enerzijds, omdat er bij toepassing van deze methode maar een zeer kleine kans is om de extreme aanwezigheidspatronen (heel veel aanwezig of heel weinig aanwezig in een heel jaar) te genereren.

Anderzijds worden de overgangswaarschijnlijkheden van verplaatsing van het ene vertrek naar het andere vertrek (of afwezigheid) in deze methode berekend op basis van tijdbestedingdata van veel verschillende personen. Deze overgangswaarschijnlijkheden worden dan vervolgens gebruikt om de aanwezigheid van een bewoner in een individuele woning stochastisch te genereren. Hierdoor zal de stochastisch gegenereerde aanwezigheid een weergave geven van de gemiddelde aanwezigheid zoals die uit de tijdbesteding data volgt; en zal de stochastisch gegenereerde aanwezigheid niet leiden tot een realistische spreiding in aanwezigheid van afzonderlijke bewoners (welke wel afgeleid kan worden uit de tijdbestedingsdata).

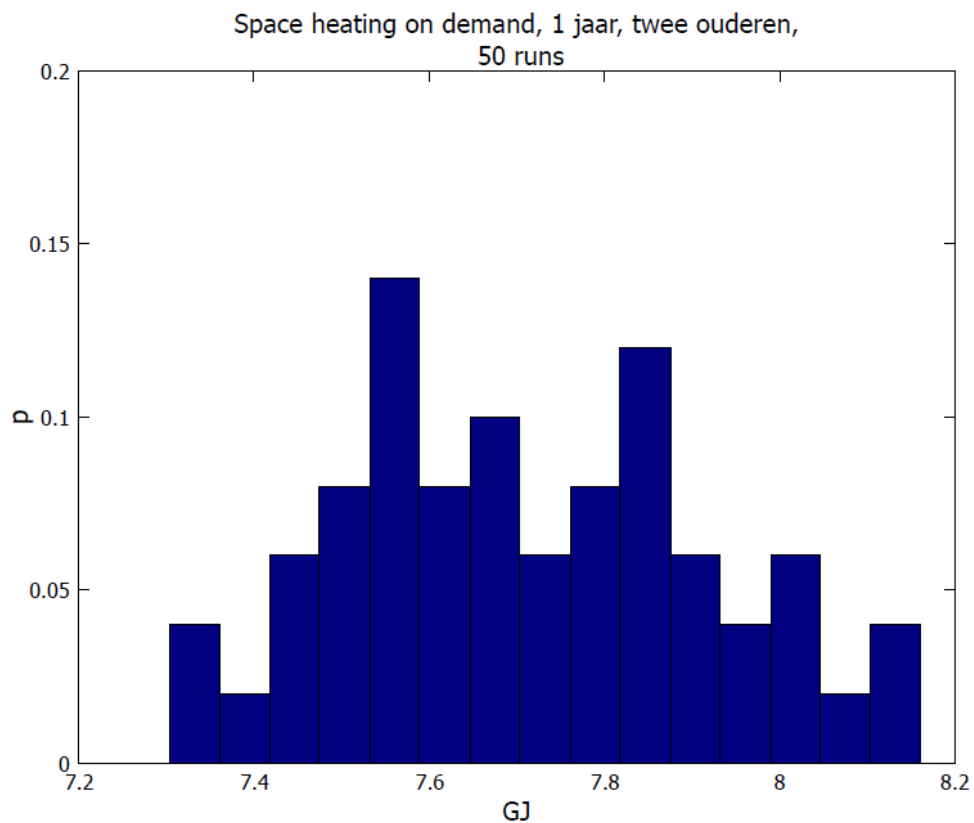
Daarom is er voor gekozen de resterende berekeningen uit te voeren op basis van een Monte Carlo simulatie met deterministische aanwezigheidsprofielen zoals die uit de tijdbestedingdata afgeleid kunnen worden (zie bijlage 2). Met deze methode wordt de variatie in de aanwezigheid van individuele bewoners zoals uit de tijdbestedingdata volgt, beter behouden.



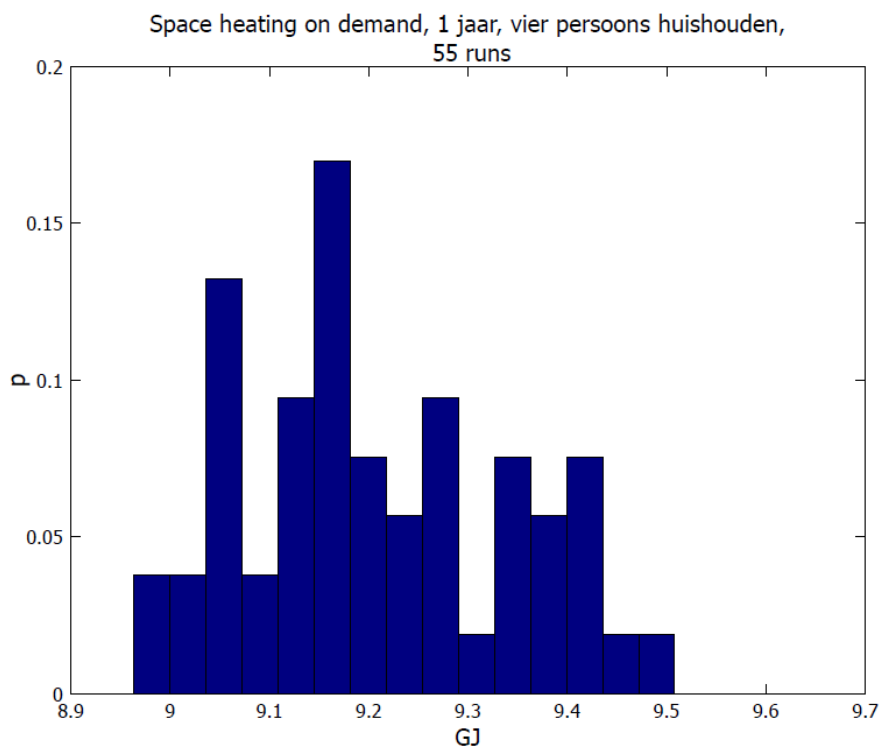
Figuur 8-21: Histogram van energieverbruik in geval van 2 werkenden gesimuleerd middels Markov-Chain Monte Carlo aanpak. Eén week is stochastisch gegenereerd en deze wordt vervolgens 52 keer gekopieerd voor het hele jaar.



Figuur 8-22: Histogram van energieverbruik in geval van 2 werkenden gebaseerd op Monte Carlo simulatie van deterministische aanwezigheidspatronen



Figuur 8-13: Histogram van energieverbruik in geval van 2 ouderen gebaseerd op Monte Carlo simulatie van deterministische aanwezigheidspatronen.



Figuur 8-24: Histogram van energieverbruik in geval van een vier persoon huishouden gebaseerd op Monte Carlo simulatie van deterministische aanwezigheidspatronen

woning	ventilatie	afgiftesysteem	gebruik	energie 1 jaar (GJ)	opmerking
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2 werkenden	5.84 – 7.65	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2 ouderen	7.36 – 8.16	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	4 personen	8.96 – 9.51	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2/4 personen	13.1	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2/4 personen	12.0	nachtverlaging
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2/4 personen	11.2	klokthermostaat
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2 ouderen	8.16 → 7.18	vraaggestuurd verwarmen luiken dicht

Tabel 8-2: Aanwezigheid is stochastisch gesimuleerd, middels Monte Carlo simulatie met deterministische aanwezigheidsprofielen

De spreiding in energieverbruik, die uit de Monte Carlo simulatie van de aanwezigheidspatronen volgt, voor de verschillende typen huishouden is nu 6.1% voor vier personen, 10.9% voor twee ouderen en 31.0% voor twee werkenden.

In de bovenstaande tabel is tevens het effect op het energieverbruik door het toepassen van thermisch isolerende luiken weergegeven. In de berekening wordt een eenvoudige regeling gebruikt. De luiken zijn gesloten tussen 23.00 uur 's avonds en 7.00 uur 's ochtends. De berekening is uitgevoerd voor twee ouderen die het meest aanwezig zijn in de woning. Een besparing op het energieverbruik van 12.0% blijkt uit de berekeningen

Ook wordt het energieverbruik weergegeven in het geval dat de vertrekken in de woning voortdurend verwarmd worden. De reductie in energieverbruik door toepassing van vraaggestuurde verwarming is 27.4% - 31.6% een vier persoon huishouden, 37.7% - 43.8% voor twee ouderen, en 41.6% - 55.4% voor twee werkenden.

8.3.6.2 Resultaten wandverwarming

Voor het luchtverwarmingsmodel zijn ook de volgende drie typen huishoud beschouwd:

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

De verschillende varianten die berekend zijn, staan in onderstaande tabel 8-3.

De spreiding in energieverbruik, voor de verschillende huishoud typen is nu 8.65% voor vier personen, 11.7% voor twee ouderen en 26.6% voor twee werkenden.

In bovenstaande tabel is tevens het energieverbruik weergegeven indien de vertrekken in de woning voortdurend verwarmd worden. De reductie in energieverbruik door toepassing van vraaggestuurde verwarming is 12.9% - 19.8% een vier persoon huishouden, 46.1% - 51.7% voor twee ouderen, en 51.5% - 61.7% voor twee werkenden.

woning	ventilatie	afgiftesysteem	gebruik	energie 1 jaar (GJ)	opmerking
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	2 werkenden	4.97 – 6.29	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	2 ouderen	6.26 – 6.99	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	4 personen	10.4 – 11.3	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	2/4 personen	13.0	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	Basis + wtw ($\eta=0.8$)	wandverwarming	4 personen	4.10	voortdurend verwarmen

Tabel 8-3: Aanwezigheid is gebaseerd op “minimum” en “maximum” profielen, die uit de Monte Carlo simulatie volgden

Om het effect van ventilatie op de warmtebehoefte inzichtelijk te maken zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd voor het vier persoonshuishouden. Hierbij zijn in de simulaties de aanwezigheidspatronen uit [21] gebruikt voor de vier personen. Tevens is ook onderzocht in hoeverre een lichte woning een andere warmtebehoefte heeft dan een zware woning. De verschillende varianten die berekend zijn staan in onderstaande tabel.

Woning	ventilatie	afgiftesysteem	gebruik/bezetting	energie 1 jaar (GJ)	opmerking
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	4 personen	11.2	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins licht	basis	wandverwarming	4 personen	10.6	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	CO ₂ -gestuurd	wandverwarming	4 personen	6.32	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	CO ₂ -gestuurd	wandverwarming	4 personen	5.37	vraaggestuurd verwarmen

Tabel 8-4: Aanwezigheid is gebaseerd op “minimum” en “maximum” profielen, die uit de Monte Carlo simulatie volgden

Besparing door vraaggestuurd te verwarmen is 14.0% in geval van basis ventilatie en 15.0% in geval van CO₂-gestuurde ventilatie. Besparing door een lichte i.p.v. een zware woning te beschouwen is 5.1%. Besparing door CO₂-gestuurd te ventileren in plaats van een basis ventilatie te beschouwen is 51.9%.

8.3.7 Renovatie van bestaande woningen

Voor de berekeningen aan bestaande woningen wordt uitgegaan van een gemiddelde isolatie van de niet-transparante delen van $R_c=2.5 \text{ m}^2\text{K/W}$ en voor de transparante delen gaan we uit van HR⁺⁺ glas en hanteren we $U=1.2 \text{ W/m}^2\text{/K}$.

8.3.7.1 Resultaten luchtverwarming

woning	ventilatie	afgiftesysteem	gebruik	energie 1 jaar (GJ)	opmerking
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2 werkenden	10.1 – 13.7	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2 ouderen	13.5 – 14.7	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	4 personen	16.3 – 17.5	vraaggestuurd verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2 ouderen	14.7 → 13.1	vraaggestuurd verwarmen luiken dicht
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2/4 personen	24.6	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2/4 personen	22.5	nachtverlaging
Eengezins zwaar	basis	luchtverwarming	2/4 personen	21.0	klokthermostaat

Tabel 8-5: Aanwezigheid is gebaseerd op "minimum" en "maximum" profielen, die uit de Monte Carlo simulatie volgden

De spreiding in energieverbruik, die uit de Monte Carlo simulatie van de aanwezigheidspatronen volgt, voor de verschillende huishoud typen is nu 7.3% voor vier personen, 9.3% voor twee ouderen en 35.8% voor twee werkenden.

In bovenstaande tabel is tevens het effect op het energieverbruik door het toepassen van thermisch isolerende luiken weergegeven. In de berekening wordt een eenvoudige regeling gebruikt. De luiken zijn gesloten tussen 23.00 uur 's avonds en 7.00 uur 's ochtends. De berekening is uitgevoerd voor twee ouderen die het meest aanwezig zijn. Een besparing op het energieverbruik van 11.3% blijkt uit de berekeningen

In bovenstaande tabel is tevens het energieverbruik weergegeven indien de vertrekken in de woning voortdurend verwarmd worden. De reductie in energieverbruik door toepassing van vraaggestuurde verwarming is 28.7% - 33.6% een vier persoon huishouden, 40.1% - 45.2% voor twee ouderen, en 44.2% - 58.9% voor twee werkenden.

8.3.7.2 Resultaten wandverwarming

Voor het wandverwarmingsmodel zijn vier persoon huishoudens beschouwd, de verschillende varianten die berekend zijn staan in

woning	ventilatie	afgiftesysteem	gebruik/bezetting	energie 1 jaar (GJ)	opmerking
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	4 personen	24.4	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	Basis + wtw ($\eta=0.8$)	wandverwarming	4 personen	12.8	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	CO2-gestuurd	wandverwarming	4 personen	15.5	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	CO2-gestuurd	wandverwarming	4 personen	13.1	vraaggestuurd verwarmen

Tabel 8-6.

woning	ventilatie	afgiftesysteem	gebruik/bezetting	energie 1 jaar (GJ)	opmerking
Eengezins zwaar	basis	wandverwarming	4 personen	24.4	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	Basis + wtw ($\eta=0.8$)	wandverwarming	4 personen	12.8	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	CO2-gestuurd	wandverwarming	4 personen	15.5	voortdurend verwarmen
Eengezins zwaar	CO2-gestuurd	wandverwarming	4 personen	13.1	vraaggestuurd verwarmen

Tabel 8-6: Aanwezigheid is gebaseerd op "minimum" en "maximum" profielen, die uit de Monte Carlo simulatie volgden

Besparing door vraaggestuurd verwarmen is 15.5% in geval van CO₂-gestuurde ventilatie.

8.4 Energieaanbod

Het is van belang of het toepassen van het vraaggestuurde verwarming ook resulteert in een duurzamer energieverbruik voor ruimteverwarming. Voor het aanbod van duurzame energie wordt in dit onderzoek gekeken naar zonne-energie. Er is onderzocht in welke mate een zonnecollector/zonneboiler een bijdrage kan leveren aan de ruimteverwarming van een duurzame woning gedurende het jaar.

Het onderzoek dat in deze paragraaf beschreven wordt is gepubliceerd in [43] en tevens gepresenteerd bij een symposium, zie Ref. [44].

8.4.1 Kenmerken van zonnecollector

In het model zijn twee typen zonnecollectoren beschouwd. Een vlakke plaatcollector en een vacuümbuiscollector. Het rendement (η) van deze collectoren is bepaald en wordt gegeven door de volgende uitdrukkingen:

$$\eta_{\text{plaat}} = 0.733 - 3.606T^* - 0.012T^{*2} \text{ en } \eta_{\text{buis}} = 0.642 - 0.885T^* - 0.001T^{*2} .$$

Waarbij $T^* = (T_{\text{gem}} - T_{\text{buiten}})/G$, T_{gem} is de gemiddelde collector vloeistof temperatuur ($^{\circ}\text{C}$), T_{buiten} is de buitentemperatuur ($^{\circ}\text{C}$), en G is de instraling op de apertuur oppervlakte van de collector (W/m^2). Dit rendement is bepaald bij loodrechte inval van de zonnestraling. De correctiefactor waarmee het rendement vermenigvuldigd moet worden, als de zonnestraling niet loodrecht invalt, is de "incidence angle modifier - IAM". Voor de gebruikte vlakke plaatcollector zijn de waarden voor de IAM gegeven in tabel 8-7.

Tabel 8-7: IAM waarden voor de vlakke plaatcollector als functie van de hoek tussen de invallende straling en de normaal op het collectoroppervlak.

θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
IAM	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.88	0.75	0.50	0.00

Hierbij is θ de hoek tussen de gezichtslijn met de zon en de normaal op het collectoroppervlak. Het rendement neemt af naarmate de hoek θ groter wordt. Voor de vacuümbuiscollector is het rendement afhankelijk van twee hoeken: een transversale en een longitudinale hoek. Alleen bij een hoek van 50° zijn de IAM waarden gegeven voor de gebruikte vacuümbuiscollector, deze zijn 1 voor een transversale hoek en 0.9 voor een longitudinale hoek.

Afhankelijk van de gewenste binnentemperatuur, buitentemperatuur en de temperatuur van het water in de zonneboiler, stroomt het verwarmingswater deels door de zonneboiler, fractie f_z , en deels door een bypass, fractie f_b . Hierbij geldt voor de fracties: $f_z + f_b = 1$ en $0 \leq f_b \leq 1$.

Vervolgens worden de twee stromen weer samengevoegd en indien nodig verder opgewarmd door een HR-ketel.

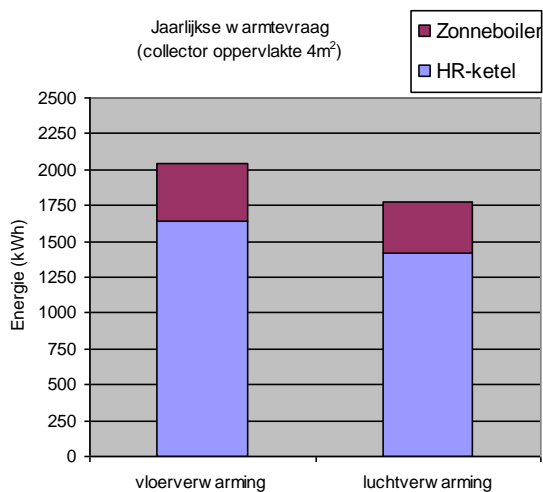
8.4.2 Aandeel in ruimteverwarming geleverd door de zonnecollector

Uit de berekeningen is gebleken dat de energieopbrengst van de twee beschouwde zonnecollectoren nagenoeg hetzelfde is. De resultaten in deze sectie zijn berekend met de vlakke plaat collector. Het aandeel van de zonneboiler in de totale energie voor ruimteverwarming, gebaseerd op een collector georiënteerd op het zuiden met een oppervlakte van 4 m², een tankinhoud van 240 l. en een hellingshoek van 45°, is weergegeven in Figuur 8-25. Uit deze figuur blijkt dat de bijdrage van de zonneboiler in het geval van vloerverwarming groter is dan voor luchtverwarming, 409 en 354 kWh respectievelijk op jaarbasis. Dit komt door de lagere water aanvoertemperatuur van het vloerverwarmingssysteem. Het niet-duurzame aandeel in de totale energie is echter ook hoger voor het vloerverwarmingssysteem.

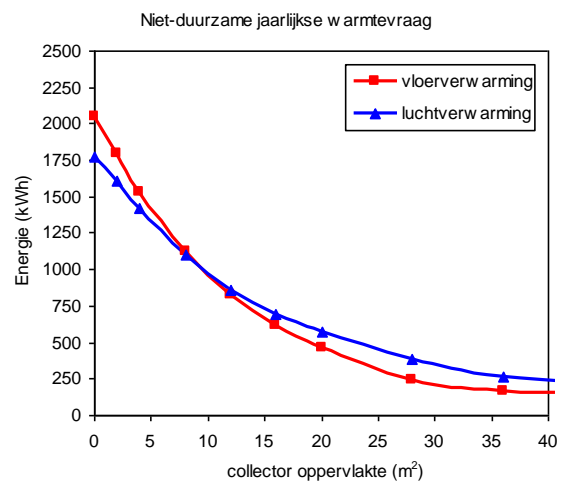
8.4.3 Afhankelijkheid van collectoroppervlak

In Figuur 8-26 wordt het niet-duurzame aandeel in de totale energie voor ruimteverwarming weergegeven als functie van de collectoroppervlakte. Een oppervlakte van 40 m² zou bereikt worden indien het dak aan een zijde van de referentiewoning geheel bedekt zou zijn met collectoren. Gehanteerd wordt een constante verhouding tussen de tankinhoud en de collector oppervlakte van 60 liter per m². Uit Figuur 8-26 blijkt dat bij een collector oppervlakte tot 8 m² het vloerverwarmingssysteem meer niet-duurzame energie verbruikt dan het luchtverwarmingssysteem. Bij grotere oppervlaktes zal het vloerverwarmingssysteem echter minder niet-duurzame energie verbruiken.

De totale energie voor ruimteverwarming bedraagt 2047 kWh voor de woning met vloerverwarming en 1774 kWh voor de woning met luchtverwarming, zoals volgt uit Figuur 8-15. Het percentage hiervan dat door de zonnecollector geleverd kan worden is weergegeven in Figuur 8-27 als functie van de collectoroppervlakte. Deze figuur laat zien dat een substantieel deel van de benodigde energie voor ruimteverwarming geleverd kan worden door een zonnecollector. Bij een typische collectoroppervlakte van 2 m² wordt een aandeel van 12,6% en 9,4% behaald voor de woning met vloerverwarming en luchtverwarming. Bij een verdubbeling van deze oppervlakte zijn de percentages 25,8% en 20,0%. Figuur 8-27 laat ter vergelijking ook het aandeel van zonne-energie in de verwarming van tapwater zien. Dit percentage is hoger dan voor ruimteverwarming, omdat tapwater ook verwarmd wordt gedurende de zomer, waarin relatief veel zonne-energie beschikbaar is.



Figuur 8-25: Het aandeel duurzame en niet-duurzame energie voor ruimteverwarming, voor vloerverwarming en luchtverwarming.

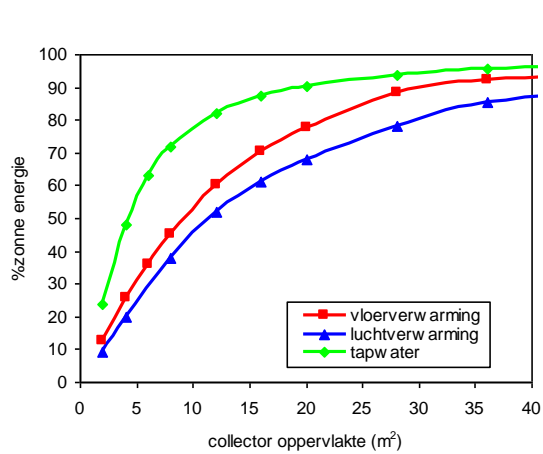


Figuur 8-26: Het aandeel niet-duurzame energie voor ruimteverwarming, als functie van de collector-oppervlakte.

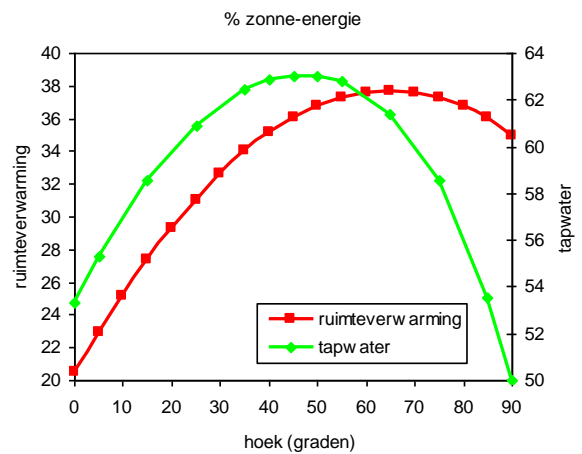
8.4.4 Afhankelijkheid van de hellingshoek

Het aandeel van de zonneboiler in de totale energie voor ruimteverwarming is ook onderzocht als functie van de hellingshoek: de hoek tussen het collectoroppervlak en het horizontale vlak. Hierbij hebben we een collectoroppervlakte van 6 m² en een tankinhoud van 360 l. gebruikt. Het resultaat van de berekeningen is weergegeven in Figuur 8-. Een hellingshoek van 0° correspondeert met een horizontaal liggende collector, en een hellingshoek van 90° met een verticaal staande collector. Uit Figuur 8- blijkt dat de hellingshoek van 45°, die we tot nu toe gebruikt hebben, niet de meest optimale is voor een maximale bijdrage aan de ruimteverwarming van de woning. Voor een woning in Nederland is het optimum een hellingshoek van 65°. De reden hiervoor is dat de meeste energie voor de ruimteverwarming in de winter nodig is gecombineerd met het feit dat de stand van de zon in de winter relatief laag is (een grotere hellingshoek is dan dus nodig voor een loodrechte inval).

In Figuur 8- is ook het relatieve aandeel van de zonneboiler in de totale energie voor warm tapwater weergegeven als functie van de hellingshoek. Hieruit is af te lezen dat voor warm tapwater de optimale hellingshoek in Nederland ongeveer 45° is. Indien een zonneboiler gebruikt zal worden voor zowel tapwaterverwarming als ruimteverwarming zal rekening gehouden moeten worden met deze verschillende optima.



Figuur 8-27: Het relatieve aandeel van zonne-energie voor ruimteverwarming en tapwater, als functie van de collectoroppervlakte.



Figuur 8-28: Het relatieve aandeel van zonne-energie voor ruimteverwarming en tapwater, als functie van de hellingshoek.

8.5 Exergetische analyse

8.5.1 Achtergrond en uitgangspunten

In paragraaf 5.7 is het principe van exergieanalyse toegelicht.

De vraag is nu of het mogelijk om een exergetisch optimaal profiel voor de warmtevraag te bepalen ; dit is dus een vraagprofiel waarmee theoretisch met de minste arbeid aan de vraag kan worden voldaan.

En leidt dit profiel tot een ander inzicht dan met energie kan worden verkregen?

Achterliggend gegeven:

Exergievraagbesparing kan behaald worden door de energie te vragen op het moment dat de exergiefactor laag is, dus als de buitentemperatuur hoog is.

De simulatie is gedaan voor de senternovem referentie tussenwoning (Senternovem 2006) met bouwfysische eigenschappen op het niveau van EPC 0,8.



Figuur 8-29

8.5.2 Wat is de exergie van de vraag?

De exergie van de vraag is de minimale hoeveelheid arbeid die nodig is om de gewenste energie te leveren.

Deze kan als volgt worden berekend (vereenvoudigde manier):

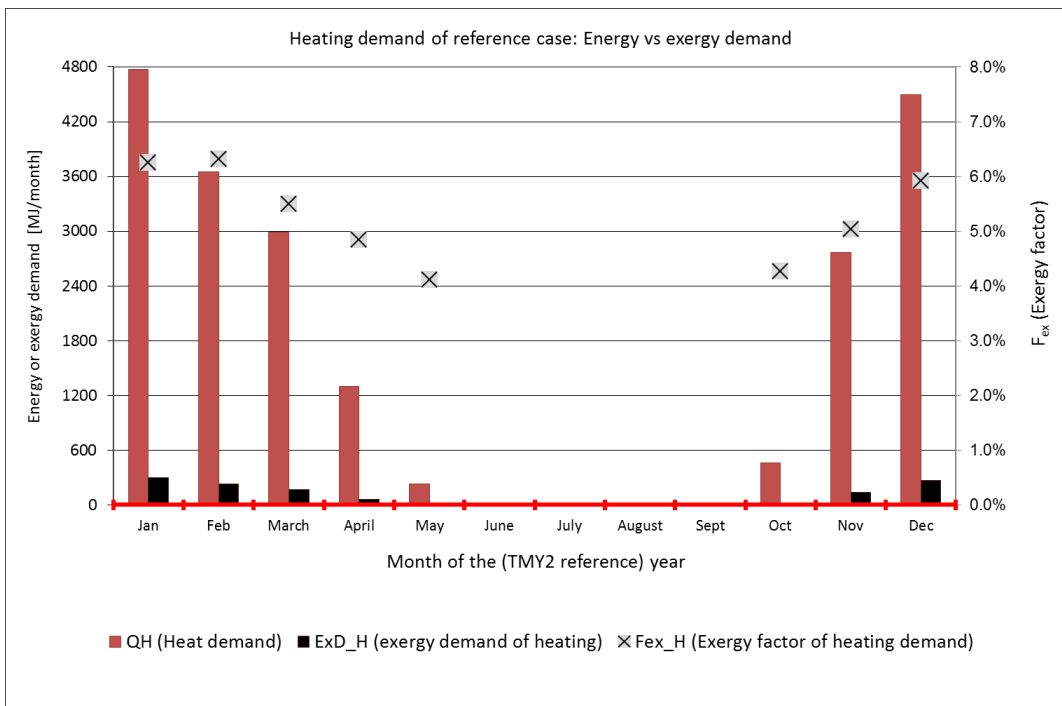
$$Ex_{h,simple} = Q_h \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right) \quad (\text{verwarmen})$$

$$Ex_{c,simple} = Q_c \left(1 - \frac{T_0}{T_r} \right) \quad (\text{koelen})$$

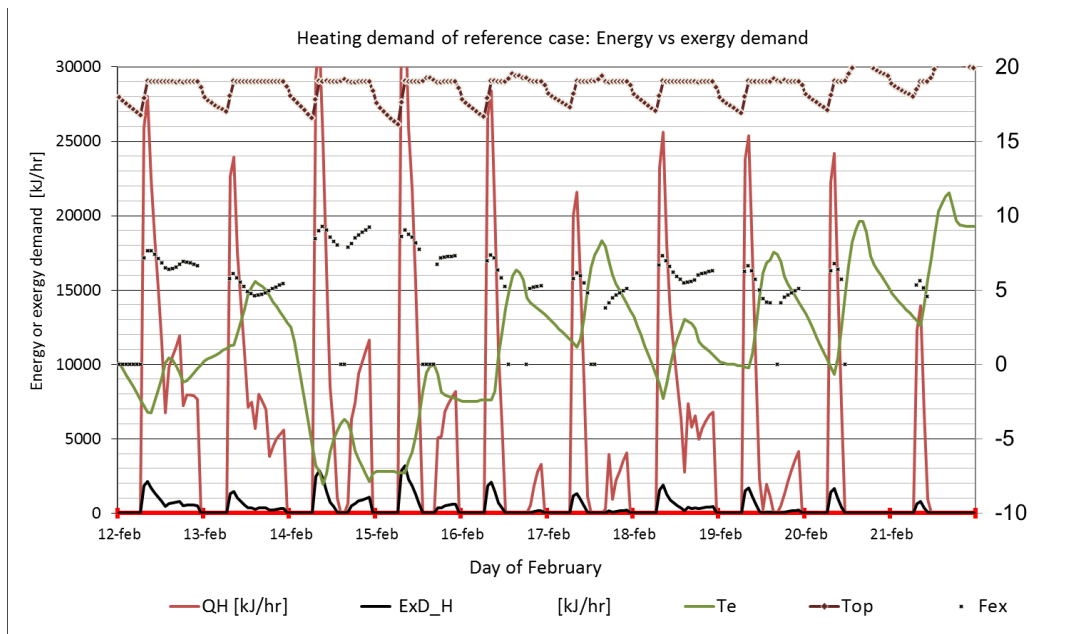
Waarbij T_0 = omgevingstemperatuur

T_r = kamertemperatuur

In figuur 8-30 en 8-31 zijn de resultaten van de exergetische simulatieberekeningen weergegeven.



Figuur 8-30: energie versus exergiebehoefte voor verwarming, per maand



Figuur 8.31: Uurlijkse energie versus exergiebehoefte voor een winterperiode (10 dagen)

QH = warmtebehoefte

ExD_H = Exergie van de warmtebehoefte

F_{ex} = exergie/energie

8.5.3 Exergetisch geoptimaliseerd vraagprofiel over de dag

Als eerste wordt onderzocht wat het exergetisch voordeel is als de warmtevraag optimaal over de dag wordt verdeeld. Zoals te zien is in figuur 8-30 is de exergiefactor (F_{ex}) het *hoogst* bij de *laagste* buitentemperatuur.

Een hogere exergiefactor betekent dat meer arbeid nodig is om de gewenste energie te leveren (De ideale COP is $1/\text{exergiefactor}$)

Als je dus energie levert bij een *lagere* exergiefactor, kan dat theoretisch met minder input van arbeid (ofwel: hoogwaardige energie / electriciteit).

De vraag is nu: wat kan een warmtevraag profiel dat meer rekening houdt met de lage exergiefactoren, voor energievraagbesparing opleveren?

Deze vraag kan niet zonder verdere uitgangspunten beantwoord worden. In principe is het namelijk zo, dat de minimaal benodigde arbeid wordt verkregen als ALLE energie wordt geleverd op de hoogste T_0 (dus laagste F_{ex}).

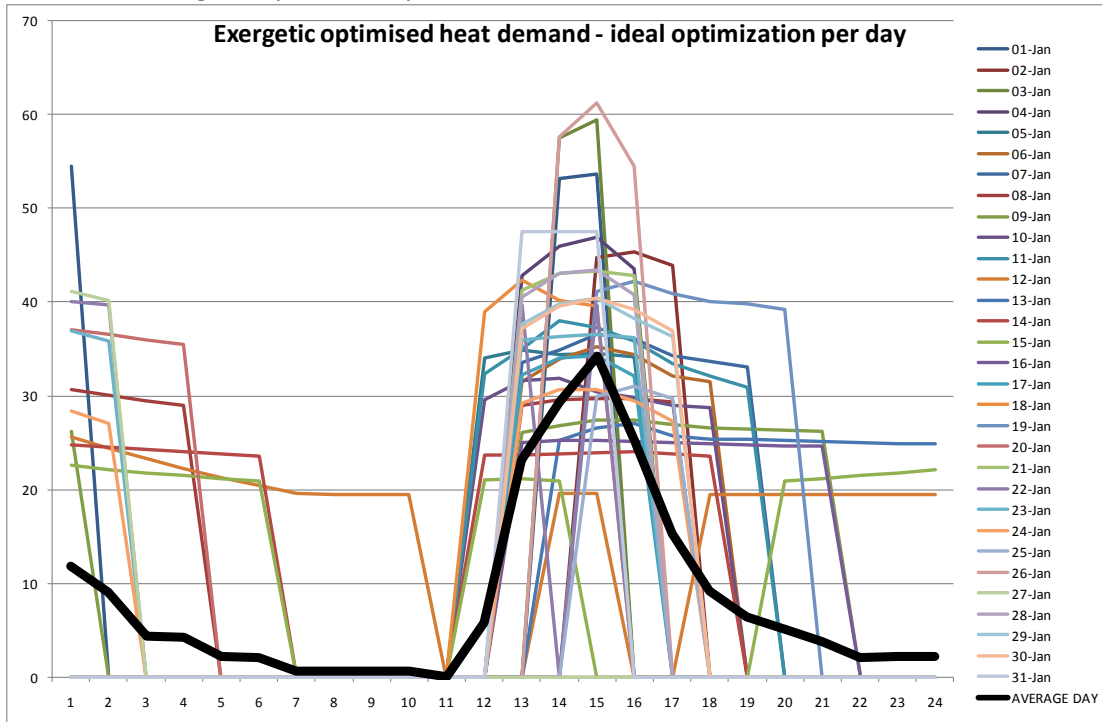
Daarom is een aantal uitgangspunten gehanteerd om te komen tot een ideaal vraagprofiel :

- Vermogen Carnot warmtepomp = 1 kWe
(de maximale warmtevraag levering hangt dus af van de buitentemperatuur volgens de formule $QH = 1 \text{ [kWe]} \times T_r / (T_r - T_0)$)

(Bij bijvoorbeeld $T_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (278 K) en T is $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 K) geldt dat $QH = 1 \times (293 / (293 - 278)) = 19,5 \text{ kW}_{th}$)

- Warmtevraag per dag: Per dag wordt met de fictieve ideale Carnot wp een hoeveelheid warmte 'geproduceerd' die de volgende dag nodig is. Dit is natuurlijk alleen bekend bij een simulatie die al gedaan is en op basis van een bepaalde *gebruiker&gebouw* variant; Er wordt hiermee impliciet eigenlijk uitgegaan van ideale opslag.

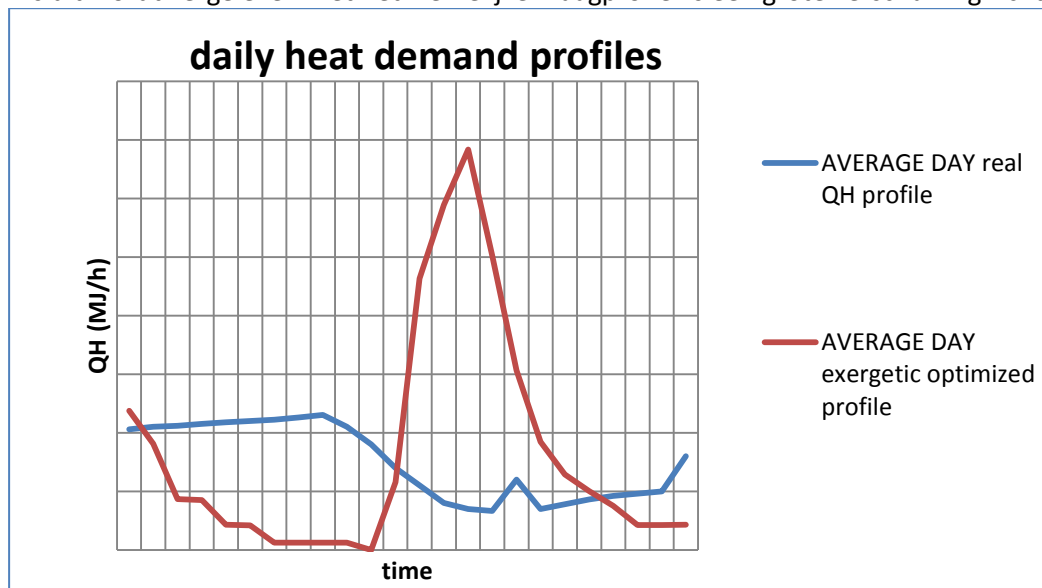
Dit levert de volgende profielen op:



Figuur 8-32 Exergetisch optimaal vraagprofiel per dag in de maand januari

Bij het geoptimaliseerde vraagprofiel treedt de piek in de vraag op gedurende de middag.

Als dit wordt vergeleken met het werkelijke vraagprofiel is een grote verschuiving zichtbaar:



Figuur 8-33 Werkelijk vraagprofiel vergeleken met exergetisch optimaal vraagprofiel gedurende een dag

Wat levert het op?

De (maand)gemiddelde exergiefactor van de vraag (blauwe lijn) is : 6.5 %

De (maand)gemiddelde exergiefactor van de exergetisch optimale vraag (rode lijn) is: 5.6 %

Reductie exergiebehoefte (=minimale arbeid voor dezelfde hoeveelheid energie): 13.0 %

Dit betekent dus dat in theorie de exergiebehoefte 13% verminderd kan worden door het energievraag optimaal over de dag te verdelen.

Maar deze reductie is wel gebaseerd op zeer ideale omstandigheden: ideale opslag (geen verliezen), ideale kennis van de te verwachten buitentemperaturen en warmtevraag, ideale carnot warmtepomp.

Het valt dus te verwachten dat een berekening op basis van realistische aannames weinig tot geen besparing oplevert, hoogstens in de orde van een paar procent, en dan nog alleen bij toepassing van uitgebreide opslagtechnieken en geavanceerde regelingen.

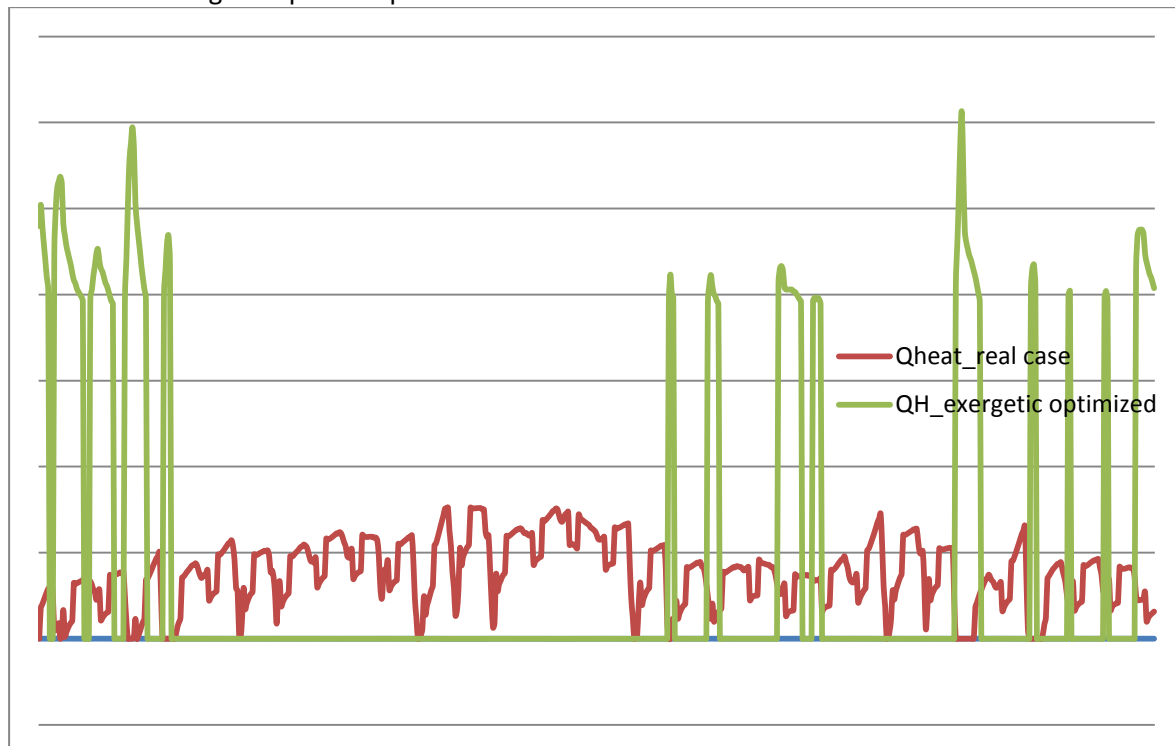
Als op passieve wijze de warmtevraag zodanig kan worden verschoven dat deze meer op het optimale profiel lijkt, kan dat dus een geringe besparing opleveren (mits gebruik wordt gemaakt van een goede warmtepomp).

Let wel: het gaat om het minimaliseren van de exergievraag (bij gelijkblijvende energievraag). Dit levert dus alleen wat op als in de rest van de keten de exergieverliezen (lees: o.a. temperatuurverschillen) eveneens geminimaliseerd worden.

8.5.4 Exergetisch geoptimaliseerde warmteopslagstrategie – maandopslag

De tweede ideale oplossing is per maand de exergievraag ideaal te spreiden.

Dit levert het volgende profiel op voor een hele maand:



Figuur 8-34 Exergetisch optimale energievraag vergeleken met de werkelijke warmtevraag

Dit levert een theoretische exergie vraagbesparing van 31 %, maar hiervoor moet er moet wel veel opgeslagen worden. Bij gebruik van zonnecollectoren is de mogelijke besparing op de exergievraag bij een ideaal maandelijks vraagprofiel nog groter.

Geavanceerde opslagtechnieken die het mogelijk maken de warmtevraag over een periode van meerdere weken gecontroleerd te doseren hebben dus een grote besparingspotentie uit het oogpunt van exergie. Dit valt verder buiten de scope van dit EOS-onderzoek.

8.6 Samenvatting resultaten simulatieberekeningen

In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van het onderzoek dat is uitgevoerd om inzicht te krijgen in hoeverre vraaggestuurde (adaptieve) ruimteverwarming van woningen kan leiden tot een lager energieverbruik in vergelijking met conventionele verwarming en in hoeverre een duurzame energiebron (zonne-energie) een bijdrage kan leveren aan de ruimteverwarming. Ook is gekeken in welke mate de inzetbaarheid van zonne-energie beïnvloed wordt door het toepassen van vraaggestuurde ruimteverwarming. Voor dit onderzoek zijn vele simulatiemodellen opgesteld en doorgerekend.

Voor de bepaling van de energievraag voor ruimteverwarming worden verschillende variabelen die relevant zijn gevarieerd: aanwezigheid van bewoners, fysische eigenschappen van de woning, eigenschappen van systemen. De vraagsturing vindt plaats op basis van aanwezigheid van bewoners in een bepaald vertrek, gedurende een bepaalde periode. Deze aanwezigheid van bewoners is gesimuleerd op basis van tijdbestedingonderzoek data van het Sociaal Cultureel Planbureau. Er worden woningen beschouwd met een hoge thermische isolatie (nieuwbouw) en woningen met een lagere thermische isolatie (renovatie). Verder zijn verschillende verwarmingssystemen gemodelleerd; luchtverwarming, wandverwarming, en vloerverwarming. Naast een basisventilatie systeem wordt ook een vraaggestuurd ventilatiesysteem beschouwd.

Het gelijktijdig variëren van alle factoren die de energievraag voor ruimteverwarming bepalen zou resulteren in een zeer groot aantal simulatievarianten. Hierom is gekozen om een selectie van varianten te simuleren. De varianten die zijn gesimuleerd om de energievraag en het effect van vraagsturing te bepalen zijn ter vergelijking in een overzichtstabel samengevat, zie hiervoor tabel 8-8.

In tabel 8-8 worden varianten voor drie verschillende gezinssamenstellingen gegeven, voor een vier persoon huishouden, een huishouden bestaande uit twee werkenden, en een huishouden bestaande uit twee werkenden. Simulatievarianten voor thermisch goed geïsoleerde woningen worden gegeven in de kolommen waar “Nieuwbouw” boven staat, varianten voor minder goed geïsoleerde woningen worden gegeven in kolommen waar “Renovatie” boven staat. Simulatievarianten gebaseerd op een wandverwarmingssysteem worden gegeven in de kolommen waar “WV” boven staat en varianten gebaseerd op een luchtverwarmingssysteem worden gegeven in de kolommen waar “LV” boven staat. In tabel 8-8 wordt bij de variant 0 (continue verwarmen en ventileren) drie verschillende subvarianten onderscheiden:

(a) Setpoint is 20 graden gedurende de hele dag

(b) Nachtverlaging: Setpoint is 20 graden, behalve tussen 23.00 - 6.00 dan is setpoint 18 graden

(c) Klokthermostaat: Setpoint is 20 graden, behalve tussen 23.00 – 6.00 en 8.00 – 17.00 dan is het setpoint 18 graden gedurende werkdagen, voor weekdagen is tussen 23.00 – 8.00 en 14.00 – 17.00 het setpoint gelijk aan 18 graden.

In tabel 8-8 wordt bij de variant 1 (vraaggestuurd verwarmen, continue ventileren) een spreiding in energieverbruik gegeven, omdat voor deze varianten de aanwezigheid van bewoners willekeurig

gevarieerd wordt. Voor de andere varianten wordt met een gegeven vast aanwezigheidspatroon gerekend. De Markov-Chain Monte Carlo methode bleek niet geschikt om een realistische spreiding in het jaarlijkse energieverbruik voor vraaggestuurde ruimteverwarming van huishoudens te vinden. Hierom hebben we er voor gekozen de berekeningen uit te voeren op basis van een Monte Carlo simulatie met deterministische aanwezigheidsprofielen zoals die uit tijdbestedingdata afgeleid kunnen worden.

Eengezinswoning zwaar 4 personen						
Variant	Nieuwbouw		Renovatie			
	WV	LV	WV	LV		
0.a	Continu verwarmen en ventileren		13.0	13.1	24.4	24.6
0.b	Continu verwarmen en ventileren; nachtverlaging			12.0		22.5
0.c	Continu verwarmen en ventileren; klokthermostaat			11.2		21.0
1.	Vraaggestuurd verwarmen, continu vent.		10.4-11.3	8.96-9.51		16.3-17.5
2.	Vraaggestuurd ventileren, continue verw.		6.32		15.5	
3.	Vraaggestuurd verwarmen en ventileren		5.37		13.1	
	Besparing variant 1: lichte woning		11.2→10.6			
	Besparing variant 2: continu verwarmen en ventileren+wtw ($\eta=0.8$)		4.1		12.8	

Eengezinswoning zwaar 2 ouderen						
Variant	Nieuwbouw		Renovatie			
	WV	LV	WV	LV		
0.a	Continu verwarmen en ventileren		13.0	13.1	24.4	24.6
0.b	Continu verwarmen en ventileren; nachtverlaging			12.0		22.5
0.c	Continu verwarmen en ventileren; klokthermostaat			11.2		21.0
1.	Vraaggestuurd verwarmen, continu vent.		6.26-6.99	7.36-8.16		13.5-14.7
2.	Vraaggestuurd ventileren, continue verw.					
3.	Vraaggestuurd verwarmen en ventileren					
	Besparing variant 1: thermische luiken			8.16→7.18		14.7→13.1

Eengezinswoning zwaar 2 werkenden						
Variant	Nieuwbouw		Renovatie			
	WV	LV	WV	LV		
0.a	Continu verwarmen en ventileren		13.0	13.1	24.4	24.6
0.b	Continu verwarmen en ventileren; nachtverlaging			12.0		22.5
0.c	Continu verwarmen en ventileren; klokthermostaat			11.2		21.0
1.	Vraaggestuurd verwarmen, continu vent.		4.97 – 6.29	5.84-7.65		10.1-13.7
2.	Vraaggestuurd ventileren, continue verw.					
3.	Vraaggestuurd verwarmen en ventileren					

Tabel 8-8: Overzicht van simulatievarianten voor de bepaling van de energievraag voor ruimteverwarming en het effect van vraagsturing.

De berekeningen voor het luchtverwarmingssysteem en het wandverwarmingssysteem zijn gebaseerd op verschillende regelingen. De energieverbruiken van luchtverwarming en wandverwarming die in deze tabel staan, kunnen daarom niet exact met elkaar vergeleken worden, omdat het comfortniveau dat bij beide systemen bereikt wordt, kan verschillen. Het "fine tunen" van

beide regelingen om een precies hetzelfde comfort te bereiken is een studie op zich en is niet het doel geweest van dit onderzoek. In het onderzoek ligt de focus op het effect van vraagsturing (en een aantal andere besparingsmaatregelen) op de energievraag voor ruimteverwarming.

Voor luchtverwarming in nieuwbouwwoningen blijkt de reductie in energieverbruik door toepassing van vraaggestuurde verwarming ten opzichte van de situatie waarin de woning voortdurend verwarmd wordt, gelijk te zijn aan 27.4% - 31.6% voor een vier persoon huishouden, 37.7% - 43.8% voor twee ouderen, en 41.6% - 55.4% voor twee werkenden. Tevens blijkt dat de spreiding in energieverbruik, gebaseerd op een Monte Carlo simulatie van de aanwezigheidspatronen, 6.1% is voor vier personen, 10.9% is voor twee ouderen en 31.0% is voor twee werkenden. Een besparing op het energieverbruik van 12.0% is mogelijk door het toepassen van thermisch isolerende luiken in deze nieuwbouwwoning.

Voor wandverwarming in nieuwbouwwoningen blijkt de reductie in energieverbruik door toepassing van vraaggestuurde verwarming ten opzichte van de situatie waarin de woning voortdurend verwarmd wordt, gelijk te zijn aan 12.9% - 19.8% voor een vier persoon huishouden, 46.1% - 51.7% voor twee ouderen, en 51.5% - 61.7% voor twee werkenden. Tevens blijkt dat de spreiding in energieverbruik, gebaseerd op een Monte Carlo simulatie van de aanwezigheidspatronen, 8.7% is voor vier personen, 11.7% is voor twee ouderen en 26.6% is voor twee werkenden. Een besparing van 52.0% is mogelijk door CO₂-gestuurde ventilatie te beschouwen in plaats van basisventilatie. Toepassing van een balansventilatie met warmteterugwinning kan leiden tot een besparing van 63%.

Uit tabel 8-8 blijkt ook dat toepassing van vraaggestuurde ventilatie (CO₂-sturing) of ventilatie met warmteterugwinning kan leiden tot aanzienlijke besparingen op het energieverbruik voor ruimteverwarming. In deze tabel is ook het energieverbruik weergegeven indien thermische luiken worden toegepast voor de ramen in de woning indien het donker is of indien er niemand aanwezig is in het vertrek.

Voor thermisch minder goed geïsoleerde woningen worden andere besparingspotentiëlen gevonden. Voor thermisch minder goed geïsoleerde woningen blijkt voor luchtverwarming de reductie in energieverbruik door toepassing van vraaggestuurde verwarming gelijk te zijn aan 28.7% - 33.6% voor een vier persoon huishouden, 40.1% - 45.2% voor twee ouderen, en 44.2% - 58.9% voor twee werkenden. Tevens blijkt dat de spreiding in energieverbruik, gebaseerd op een Monte Carlo simulatie van de aanwezigheidspatronen, 7.3% is voor vier personen, 9.3% is voor twee ouderen en 35.8% is voor twee werkenden. Een besparing op het energieverbruik van 11.3% is mogelijk door het toepassen van thermisch isolerende luiken. De absolute besparingen in energieverbruik zijn in dit geval aanzienlijk hoger dan voor thermisch goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen.

Voor het bepalen van de mate waarin duurzame energie, zonne-energie, aangewend kan worden voor ruimteverwarming van woningen zijn uitgebreide simulaties uitgevoerd voor een woning met een (langzaam) vloerverwarmingssysteem en voor een woning met een (snel) luchtverwarmingssysteem. De zonnecollector en boiler zijn hierbij in detail gesimuleerd voor. In de simulaties is uitgegaan van een vast aanwezigheidspatroon voor een vierpersoon huishouden.

Één van de bevindingen van het onderzoek met betrekking tot de inzetbaarheid van duurzame energie is dat een aanzienlijk deel van het energieverbruik voor ruimteverwarming van een duurzame woning geleverd kan worden door een duurzame energiebron zoals zonne-energie. De

grootte van dit aandeel is sterk afhankelijk van het toegepaste verwarmingssysteem en van de eigenschappen van de zonnecollector/boiler zoals de collectoroppervlakte.

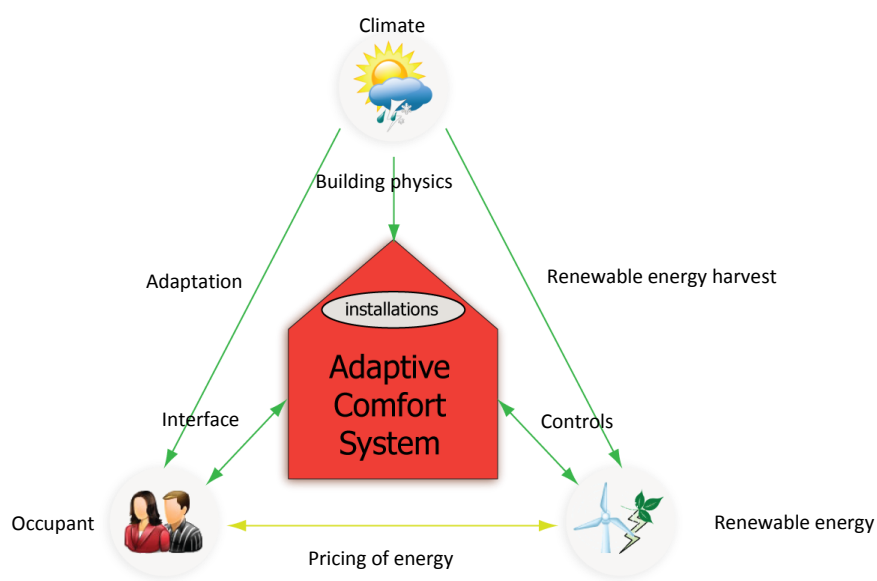
Bij een collector oppervlakte van 2m^2 wordt een duurzaam aandeel in de ruimteverwarming behaald van 12.6% en 9.4% voor een woning met respectievelijk een vloerverwarmingssysteem en een luchtverwarmingssysteem. Het luchtverwarmingssysteem heeft een lagere inzetbaarheid van duurzame energie, omdat het een snel systeem is welke functioneert bij hogere water aanvoertemperaturen. Het trage vloerverwarmingssysteem functioneert bij lagere water aanvoertemperaturen. Bij een verdubbeling van het collector oppervlakte worden deze percentages 25.8% en 20.0%.

Hoe de klimaatinstallatie het meest duurzaam gemaakt kan worden is niet eenvoudig te zeggen. Uit het onderzoek blijkt dat in het geval van een vloerverwarmingssysteem en luchtverwarmingssysteem afhankelijk te zijn van de eigenschappen van de zonnecollector, zoals blijkt uit figuur 8.28. Tevens zal het afhankelijk kunnen zijn van het type woning en het aanwezigheidspatroon voor de bewoners. Om de invloed van het type woning of van de aanwezigheid van bewoners op de inzetbaarheid van duurzame energie te bepalen, zouden aanvullende simulaties nodig zijn.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Richtlijnen voor duurzame comfortinstallaties na 2015

Om te komen tot duurzame comfortinstallaties moet naast de integratie van de installaties in het gebouw ook de invloed van gebruiker, klimaat en beschikbare duurzame energiebronnen in beschouwing worden genomen. Daarbij zijn ook de onderlinge verbanden tussen de invloedsfactoren van belang zoals aangegeven in figuur 9.1.



Figuur 9.1 Invloedsfactoren voor duurzame comfortinstallaties

Het onderzoek naar duurzame comfortinstallaties is er op gericht om deze verbanden in kaart te brengen, met de nadruk op adaptief comfort (hoofdstuk 4), de bouwfysische interactie tussen gebouw en klimaat (hoofdstuk 6) en de gebruikersinteractie en regelsystemen (hoofdstuk 6.7).

Samenvattend kunnen uit het onderzoek dat in dit werkpakket is uitgevoerd de volgende richtlijnen voor duurzame comfortinstallaties van toekomstige woningen worden afgeleid.

9.1.1 Richtlijnen uit oogpunt van thermisch comfort

Mede op basis van de nieuwste inzichten in thermisch comfort als beschreven in hoofdstuk 4 kunnen de volgende uitgangspunten worden gehanteerd om enerzijds te kunnen voorzien in de comfortvraag en anderzijds om energiebesparing te realiseren:

1. In een grote bandbreedte is voor de comfortbeleving en tevredenheid van de bewoners de regelbaarheid binnen de grenswaarden van het comfortgebied op zich ten minste net zo belangrijk als de specifieke temperatuur.

2. In woningen zijn de adaptieve mogelijkheden groter dan in kantoren door het aanpassen van kleding, activiteit, locatie en het openen van ramen en deuren. Hierdoor is de acceptatie van het binnenklimaat zowel wat betreft temperatuurniveau als de bandbreedte van geaccepteerde temperaturen groter.
3. In een huis heeft het activiteitsniveau een grotere bandbreedte dan in een kantoor en varieert meer in een korte tijd. Er zijn profielen opgesteld die per 15 minuten aangeven wat de activiteit is van elk van de leden van een huishouden en waar deze zich in de woning bevindt.
4. De adaptieve comfortmodellen richten zich meer op een steady state situatie, met één comforttemperatuur per dag. Echter, de activiteiten veranderen over de dag en ook de beoordeling van het comfort. Dit komt onder andere door de verwachting dat de temperatuur over de dag varieert door het natuurlijke verloop van de buitentemperatuur en de reactie daarop van de woning. De volgende randvoorwaarden dienen in acht genomen te worden:
5. Personen kunnen verschillen in thermische gevoeligheid. Dat wil zeggen dat per individu de thermische sensatie en de comfortbeleving kan verschillen, ook bij gelijke thermische omgevingsfactoren. Dit kan zowel fysiologische oorzaken hebben (lichaamsgewicht, vaso-motie) als psychologische (verwachting, gewenning). Er is dus geen temperatuur waarbij iedereen zich prettig voelt. De gerealiseerde temperatuur zal per huishouden c.q. kantoorvertrek verschillen, aangezien iedereen naar eigen voorkeur de thermostaat kan bedienen. In woningen zal deze spreiding groter zijn, aangezien de bevolkingsgroep groter en diverser is dan op kantoren het geval is. Statistisch zullen de meest voorkomende temperaturen echter in de bandbreedte vallen aangegeven verderop in dit document.
6. Ouderen zijn gevoeliger voor discomfort en onderkoeling of oververhitting als gevolg van de verminderde thermische perceptie door verminderde fysiologische adaptatie [26] [28] [55]. Aangenomen wordt dat hierdoor voor ouderen de bandbreedte aan beide kanten 1K smaller wordt (veiligheidsmarge).
7. Voor kinderen wordt het binnenklimaat door de ouders geregeld. Aangenomen wordt dat over het algemeen zij grotere fysiologische adaptatie hebben, maar omdat zij minder gedragsmatige adaptieve mogelijkheden hebben zal het comfortgebied toch binnen dezelfde grenzen vallen.
8. De adaptieve comfortmodellen kunnen niet direct worden vertaald naar gebruik voor actief gekoelde woningen. In dit project wordt getracht het comfort te verzorgen zonder actieve koeling (het aanwenden van energie voor het opwekken van koude). In het geval actieve koeling niet vermeden kan worden, zal dit worden geleverd door het koelen van de constructie (vlakkoeling) en zal eenzelfde strategie worden gehandhaafd als voor verwarming, met de grenzen behorende bij de adaptieve comfortmodellen.
9. Uit oogpunt van het waarborgen van een goede luchtkwaliteit dient te allen tijde luchtkoeling en luchtverwarming te worden voorkomen.

9.1.2 Vraagsturing ventilatie en verwarming

Zoals uit de simulatieberekeningen in hoofdstuk 8 blijkt kan de grootste reductie van de warmtevraag (circa 50%) bereikt worden met *vraaggestuurde (CO₂-gestuurde) ventilatie*. In combinatie met warmteterugwinning is een reductie van de warmtevraag van meer dan 60% mogelijk.

Met *vraaggestuurde verwarming* kan de warmtevraag afhankelijk van het gebruikspatroon 25 tot 50% gereduceerd worden.

Met beide vormen van vraagsturing samen komt de doelstelling van 75% CO₂ reductie al direct binnen bereik.

9.1.3 Responsive Building –elements

In de dissertatie van Looman [12] zullen de Responsive Building Elements uitgebreid beschreven worden. De daarvoor verrichte studie maakt onderdeel uit van WP2.

Voor woningen zijn de belangrijkste systemen die direct toepasbaar zijn :

- Regelbare buitenzonwering
- Thermisch isolerende luiken (besparing circa 10% op warmtevraag)
- Nachtventilatievoorzieningen

Systemen met potentie op langere termijn zijn onder andere:

- Geavanceerde geïntegreerde gevelsystemen
- Warmteopslag in Phase Change Materials (PCM)

9.1.4 Intelligente en gebruikersvriendelijke regelsystemen

Voor een duurzame comfortinstallatie is een intelligent en gebruikersvriendelijk regelsysteem van essentieel belang. De functionele eisen die gesteld worden aan dergelijke systemen zijn beschreven in paragraaf 7.2.

Er is een aantal belangrijke eerste vereisten voor de systemen om efficiënt te zijn. De oplossingen moeten krachtig, robuust en weerbestendig zijn. Ook moet het mogelijk zijn voor de gebruiker om gemakkelijk de keuzes van het systeem te overrulen. De gebruiker moet geïnformeerd worden wanneer een instelling aangepast is, bij voorkeur door directe feedback (het zien van een raam dat geopend wordt of zonwering die neergelaten wordt) of via een display. Daarmee zou het de voorkeur hebben om de gebruiker te voorzien van informatie over de redenen waarom een bepaalde instelling veranderd moet worden. Een belangrijke voorwaarde is verder om de maatregelen van kracht te laten blijven en automatisch te besturen tijdens afwezigheid van de bewoners.

9.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Ideale snelreagerende verwarmingsystemen

Zoals aangeduid in hoofdstuk 8 is het ideale verwarmingsstelsel snel reagerend, zodat het op ieder moment direct warmte kan leveren als de gebruiker daar om vraagt.

Van de thans beschikbare systemen is een luchtverwarmingssysteem het snelst reagerend, maar voor duurzame installatieconcepten heeft lage temperatuur verwarming de voorkeur. Het veelgebruikte vloerverwarmingssysteem heeft als nadeel dat het verre van snel reagerend is.

Er zijn al productontwikkelingen gaande op het gebied van snelreagerende stralingsverwarming en convectoren, maar verder onderzoek op dit gebied is gewenst.

Exergetische optimalisatie door geavanceerde opslagtechnieken

Zoals aangeduid in paragraaf 8.6.4 hebben geavanceerde opslagtechnieken die het mogelijk maken de warmtevraag over een periode van meerdere weken gecontroleerd te doseren een grote besparingspotentie uit het oogpunt van exergie.

Onderzoek en productontwikkeling op het gebied van opslagtechnieken en bijbehorende regelsystemen is gewenst.

Duurzame comfortinstallaties voor ouderen

Ouderen vormen een steeds belangrijkere doelgroep, ook wanneer het gaat om het ontwikkelen van duurzame comfortinstallaties. Zoals aangeduid in hoofdstuk 4 gelden kunnen voor ouderen specifieke eisen worden gesteld:

- Ouderen ervaren de thermische omgeving anders dan jongeren als gevolg van fysiologische, gedragsmatige en psychologische verschillen.
- Eenduidige eisen voor temperaturen voor ouderen zijn moeilijk te geven. Hierdoor is regelbaarheid van temperaturen voor ouderen van extra groot belang.
- Voor toekomstige woningen voor ouderen worden passieve, architectonische oplossingen voorgesteld voor het beheersen van het binnenklimaat, aangevuld met technische systemen in de vorm van automatisch sluiten van ramen, individuele temperatuurprofielen per kamer en airconditioning voor extreme weersomstandigheden.

Nader onderzoek op dit gebied is gewenst.

Referenties

De referenties bij hoofdstuk 4 zijn opgenomen in 4.6.

1. Alders, N., Kurvers, S., Cauberg, H. (2009). "Comfort Delivery on Demand: an Adaptive Approach to Comfort Systems in Dwellings, Proceedings of the "26th Conference on Passive and Low Energy Architecture", Quebec, Canada.
2. American Society of Heating, R. a. A.-C. E., Inc. (ASHRAE) (2004). "Thermal environmental conditions for human occupancy." 55. ASHRAE, ASHRAE.
3. Baker, N. and Standeven, M. (1996) Thermal comfort for free-running buildings in *Energy and Buildings*, vol. 23, issue 3, pp. 175-182.
4. Bordass, B. and A. Leaman (2007). *Controls For End Users*, BCIA.
5. BouwhulpGroep (2007). "Duurzaam Bouwen, Werken en Wonen Na 2015 - WP 0. Duurzaam Bouwen, Werken en Wonen Na 2015." Eindhoven, Bouwhulp Groep: p. 52.
6. Butcher, K. (2000) *Building Control Systems*. CIBSE, Butterworth Heinemann, DETR.
7. Brager, G.S., G. Paliaga, and R. de Dear, (2004). *Operable Windows, Personal Control and Occupant Comfort*, eScholarship Repository.
8. Cen (2007). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
9. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), gegevens 2009.
10. Chappells, H. and E. Shove, (2003). *The environment and the home*. Draft paper for the Environment and Human Behaviour Seminar.
11. Chappells, H. and E. Shove, (2005). Debating the future of comfort: environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment. *Building Research & Information*, 33(1): p. 32 - 40.
12. 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.
13. Cole, R. J., J. Robinson, et al. (2008). "Re-contextualizing the notion of comfort." *Building Research & Information* 36(4): 323 - 336.
14. Crowley, J. E. (2001). *The Invention of Comfort: Sensibilities and Design in Early Modern Britain and Early America*.
15. 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.
16. 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.
17. De Dear, R. J., G. Brager, et al. (1997). *Developing an adaptive model of the thermal comfort and preference*. Final Report ASHRAE RP-884.
18. DEPW (2006). *Modelprojectplan EOS; Duurzame Projectontwikkeling Gebaseerd op Duurzaam Bouwen, Renoveren en Wonen na 2015*.
19. EN 15251; SCATS database, zie oa: <http://www.buildup.eu/publications/8301>
20. Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort; analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen, Danish Technical Press.

21. GNU Octave, <http://www.gnu.org/software/octave/>
22. Haldi, F. and D. Robinson "On the unification of thermal perception and adaptive actions." Building and Environment.
23. Healy, S. (2008). "Air-conditioning and the "homogenization" of people and built environments." Building Research & Information 36(4): 312 - 322.
24. Heschong, L. (1979). Thermal Delight in Architecture.
25. Hitchings, R. (2009). "Studying thermal comfort in context." Building Research & Information 37(1): 89 - 94.
26. Hoof, J. v. and J. L. M. Hensen, "Thermal Comfort and Older Adults." Gerontech, 4.
27. ISSO, Publicatie 74: "Thermische behaaglijkheid - eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen." ISBN: 978-90-5044-109-4, 2004
28. Kingma, B., A. Frijns, et al. (In preparation). "Thermoregulation during mild temperature changes: The effect of age."
29. Kornaat, W en Gids, W.F. de. (1998). "Herziening NEN 5128, Formules voor berekening warmteverlies door ventilatie en infiltratie, 98-BBI-R0386", TNO-Bouw, Delft.
30. Kurvers, S. R., A. C. v. d. Linden, et al. (2007). "Literatuurstudie thermisch comfort." EOS-project Duurzame projectontwikkeling (EOS-LT), TU Delft. Werkpakket 1: vraagsturing en binnenmilieu.
31. Linden, A.C. van der, et al., Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands: A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. Energy and Buildings, 2006. 38(1): p. 8-17.
32. Looman, R.H.J., Van den Dobbelsteen, A.A.J.F. and Cauberg, J.J.M. (2009) "Climate-responsive design - matching supply of renewable energy sources and energy demand patterns in dwellings for improved comfort", in proceedings of SASBE2009 conference, Delft.
33. Looman, R.H.J. (2012). Climate-responsive building elements. The development of a design strategy for the implementation of climate-responsive building elements into dwellings. Dissertation in preparation.
34. Lysen, E. H. (1996). The Trias Energica; Solar Energy Strategies for Developing Countries. Eurosun Conference. Freiburg, Germany.
35. Mayens, J. and A. Janssens, "Thermisch zomercomfort in natuurlijk geventileerde woningen." Bouwfysica, 15.
36. McCartney, K. J. and J. Fergus Nicol (2002). "Developing an adaptive control algorithm for Europe." Energy and Buildings 34(6): 623-635.
37. Mendell, M. J. and A. G. Mirer, "Indoor thermal factors and symptoms in office workers: findings from the us epa base study." Indoor Air, 19.
38. 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.
39. Moderate thermal environments-determination of PMV & PPD indices as specifications of the conditions for thermal comfort, International Standard ISO 7730,
40. Page, J., Robinson, D., Morel, N., Scartezzini, J.-L. (2008). "A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence," Energy and Buildings 40, 83-98.
41. 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.

42. PeGO (2009). Energietransitie-plan PEGO Werkgroep Innovatie: Een innovatieplan energie-efficiency nieuwbouw en renovatie.
43. Polinder, H., (2010). "In welke mate kan zonne-energie bijdragen aan de ruimteverwarming van een duurzame woning?," gepresenteerd bij "IBPSA-NVL 2010 Event", Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Nederland.
44. Polinder, H., Kalkman, A., Aa, A. van der. (2011). "Ruimteverwarming van woningen: In welke mate kan zonne-energie bijdragen?," TVVL Magazine februari 2011.
45. 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.
46. Richardson, I., Thomson, M., Infield, D. (2008). "A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations," *Energy and Buildings* 40, 1560-1566.
47. 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.
48. SCP Tijdbestedingsonderzoek,
http://www.scp.nl/Onderzoek/Bronnen/Beknopte_onderzoeksbeschrijvingen/Tijdsbesteding_sonderzoek_TBO
49. Shove, E., (2004). Social, architectural and environmental convergence. *Environmental Diversity in Architecture*, 2004: p. 19-30.
50. Steemers, K. and M. A. Steane (2004). *Environmental Diversity in Architecture*.
51. Stoops, J. L. (2004). "A possible connection between thermal comfort and health." Lawrence Berkeley National Laboratory.
52. Szokolay, S.V. (2008) *Introduction to Architectural Science - the basis for sustainable design* [second edition], Architectural Press, Oxford
53. Tracy, C.R. and K.A. Christian, (1986). Ecological relations among space, time and thermal niche axes. *Ecology*, 67(3): p. 609-615.
54. TRNSYS, <http://www.trnsys.com>.
55. Tsuzuki, K. and T. Oghfuku, "Thermal sensation and thermoregulation in elderly compared to young people in Japanese winter season." *Indoor Air*, Monterey, California, USA.
56. Ubbelohde, M. S., G. M. Loisos, et al. (2003). *Comfort Reports*, California Energy Commission.
57. Widen, J., Nilsson, A.M., Wäckelgård, E. (2009). "A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand," *Energy and Buildings* 41, 1001-1012.