

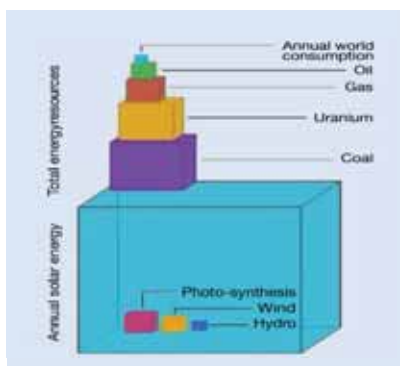
Achtergronden en mogelijkheden

LED-verwarming

De eisen en verwachtingen die de mens stelt aan zijn gebouwde omgeving zijn de afgelopen decennia gestegen. Zo stelt de mens steeds hogere eisen aan zijn thermische omstandigheden. Ook stelt hij steeds hogere eisen aan zijn gebouwen door zijn toenemende leefstijlflexibiliteit. Tenslotte wordt de problematiek rondom energie steeds groter. De aspecten thermisch comfort, leefstijlflexibiliteit en energieduurzaamheid moeten daarom de speerpunten vormen van een comfortstelsel dat bestendig is voor de toekomst. Elektriciteit speelt hierbij een sleutelrol, omdat elektriciteit in de toekomst de meest belangrijke energiedrager zal zijn.

*- door ir. E.A. Ansems**, ir. M.G.D.M. Cox*,
prof.ir. W. Zeiler* en prof.dr.ir. J.J.N. Lichtenberg**

Klimaatveranderingen en een ongelijke verdeling van fossiele brandstoffen vormen een serieuze bedreiging voor de hele aarde en mensheid. Duurzame ontwikkelingen met veel potentie zijn onder andere: Zonne-energie, biomassa, windenergie, waterkracht, golfenergie, getijdenenergie, de brandstofcel, geothermie en kernfusie. Duurzame energietechnologieën bieden een uitkomst voor deze problemen, deze technologieën kennen allemaal elektriciteit als eindproduct. Zonne-energie technologie wordt doorgaans gezien als de meest potentiële techniek voor de energievoorziening in de toekomst, het aanbod van zonne-energie is namelijk enorm, zie figuur 1.



Beschikbaarheid van energie in perspectief.

- FIGUUR 1 -

Elektriciteit speelt in de toekomst een sleutelrol vanwege een aantal voordelen t.o.v. andere wijzen van energietransport. Zo kan elektriciteit relatief gemakkelijk worden getransporteerd en gemakkelijk in andere vormen van energie worden omgezet, zonder afgifte van CO₂ ter plaatse van het afnamepunt.

Onze traditionele bouwwijze en daarmee onze wijze van ruimteverwarming is vanwege een aantal redenen aan het wijzigen als gevolg van onder andere:

- de hogere eisen die mensen stellen aan flexibiliteit, comfort en uitstraling van materialen en gebouwen;
- veranderende financiële structuren die een rol spelen bij het financieren van roerende en onroerende goederen;
- de hoge (ongebalanceerde) impact van de bouwindustrie op de samenleving voor energie en materiaalgebruik.

Veel van de factoren zijn onderling op de één of andere wijze gekoppeld aan andere factoren. Zo heeft flexibiliteit een relatie met bouwdelen en installatietechniek. Lichter bouwen heeft bijvoorbeeld bij een positief effect op de afvalstroom [3]. Lichter bouwen heeft echter ook een impact op het verwarmingssysteem, omdat lichtere gebouwen heel anders reageren op wisselen-



Ir. E.A. Ansems



Ir. M.G.D.M. Cox



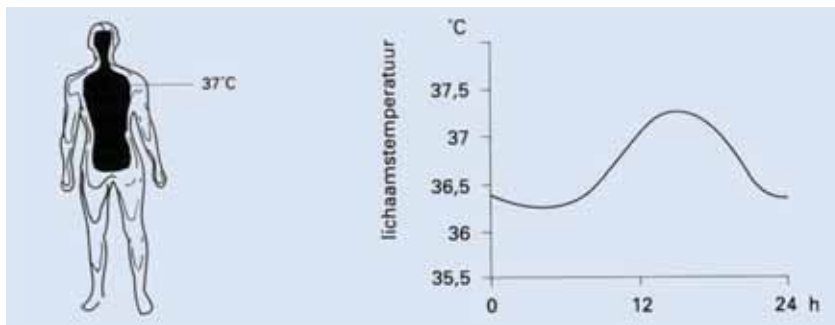
Prof.ir. W. Zeiler



Prof.dr.ir. J.J.N. Lichtenberg

* TU Eindhoven.

** Adviesbureau Nieman.



Temperatuur van de kern en de cyclus [4].

- FIGUUR 2 -

de binnen of buitencondities. Hierdoor zijn nieuwe verwarmingstechnieken, die voorheen niet geschikt of uitontwikkeld waren, nu mogelijk wel geschikt. Belangrijk hierbij is dat het thermisch comfort hierbij centraal staat. Om voorbereid te zijn op de 'all electric' toekomst is er een onderzoek verricht naar de toepassing van elektrische verwarming. Hierbij is de traditionele aanpak waarbij een verwarmingselement (lijn of vlakke bron) niet als uitgangspunt genomen, maar is vanuit de behoefte onderzocht aan welke eisen een dergelijk nieuw comfortstelsel moet voldoen.

THERMISCH COMFORT

Ten behoeve van een verwarmingsinstallatie voor een woning of bij de ontwikkeling van een product wordt in principe altijd een Programma van Eisen opgesteld. Het Programma van Eisen vormt de basis voor de uitwerking. Voor de ontwikkeling van een all electric verwarmingsinstallatie voor een woning zal ook een Programma

van Eisen worden opgesteld. Binnen dit onderzoek zijn de bevindingen uit het onderzoek vertaald naar ontwerp-eisen. Naast deze ontwerp-eisen zijn er algemene eisen en voorwaarden waaraan de verwarmingsinstallatie moet voldoen, net zoals iedere andere verwarmingsinstallatie.

De lichaamstemperatuur van een gezond mens bedraagt ongeveer 37 °C. Maar de temperatuur van de huid en de direct daaronder liggende weefsels is meestal lager. Onder omstandigheden die we als thermisch behaaglijk ervaren blijkt de temperatuur van de huid normaal gesproken ongeveer 33 °C à 34 °C te zijn en deze temperatuur kan nog, zonder gevaar voor de gezondheid, aanzienlijk lager zijn. Het is alleen belangrijk dat de temperatuur van de lichaamskern op een temperatuur van ca. 37 °C blijft. De temperatuur van de rest van het lichaam mag variëren (zie figuur 2).

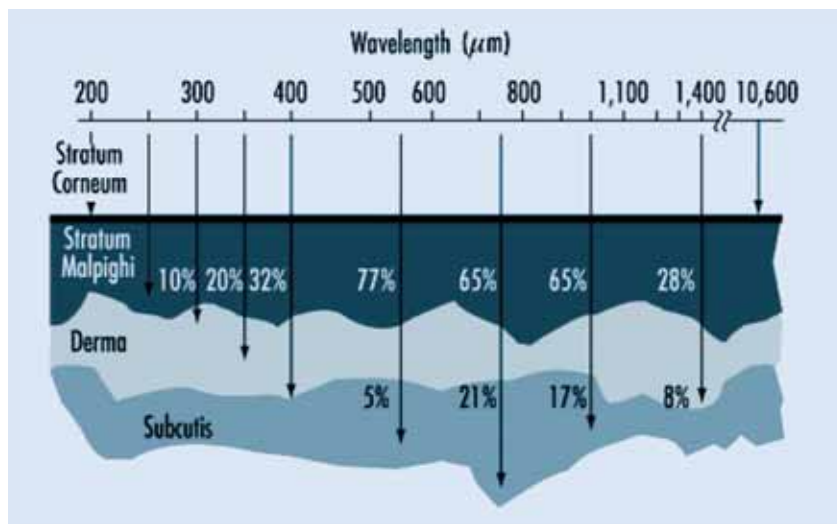
Metabolisme heet het proces waarin voedsel wordt omgezet in arbeid en

warmte. Als maat voor het metabolisme wordt de hoeveelheid energie die per tijdseenheid per m² huid vrijkomt gehanteerd. Het metabolisme wordt ook wel uitgedrukt in de eenheid 'met', 1 met staat voor 58 W/m². Deze waarde geldt voor een ontspannend zittende persoon. De grootte van het metabolisme is sterk afhankelijk van de mate waarin we ons lichamelijk inspinnen. Dat komt omdat bij het gebruik van spieren veel warmte vrijkomt.

Het reflectiespectrum van de huid van een mens heeft zeer veel overeenkomsten met de emissiespectrum van zonnewarmte. De huid reflecteert veel in het zichtbare deel en het kortgolfige infrarode gedeelte van het spectrum, waar de zonnestraling het grootste is. De huid absorbeert echter sterk in het ultraviolette en langgolfige infrarode gedeelte van het spectrum waar de zonnestraling gering is (zie figuur 3 en tabel 1).

Mensen zijn gewend om binnen relatief kleine temperatuurgrenzen te leven wat betreft comfort. Extremen zoals vriezen of tropische temperaturen leiden snel tot discomfort. Dit discomfort kan zowel op persoonsniveau als op deelniveau (ledematen, gezicht, etc.) worden ervaren. De parameters die hierbij een rol spelen [5] zijn o.a. de volgende:

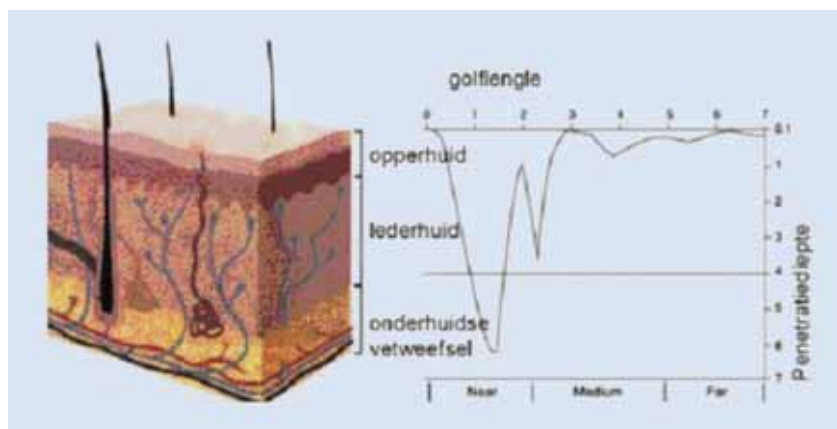
- luchttemperatuur;
- stralingstemperatuur;
- luchtsnelheid;
- luchtvochtigheid;
- activiteit;
- kleding.



Penetratie van straling in verschillende lagen van de huid in percentages [5].

- FIGUUR 3 -

Een deel van deze parameters zijn persoonsgebonden en een deel zijn omgevingsgebonden. Het welbehagen van een mens is onder andere door prof. Fanger en nadien door vele anderen onderzocht voor een grote groep mensen en daarbij bleek dat het welbehagen kon worden beschreven aan de hand van formules waarbij het comfort wordt uitgedrukt in PMV (predicted Mean Vote). Bij een PMV=0 hebben de meeste mensen binnen een groep een goed comfort. Uit diezelfde theorie volgt dat bij dit optimum nog steeds 10 % van de mensen ontevreden is als gevolg van persoonlijke voorkeur. Dit percentage is deels te verklaren door het verschil in beleving



Penetratiediepte bij verschillende golflengten [Bron: body heat sauna].

- FIGUUR 4 -

tussen individuen maar deels ook door het feit dat comfortbeleving door een mens op een lokaal niveau wordt ervaren. Koude voeten kunnen bv. de totale comfortbeleving van een individu in een verder behaaglijke omgeving sterk negatief beïnvloeden. Dit geeft aan dat een lokale naregeling van het binnenklimaat in een ruimte wenselijk, maar ook noodzakelijk is om een individu een goed comfort te kunnen bieden. M.a.w. een goed verwarmingssysteem kan tegemoetkomen aan de grote verschillen in comfortbeleving van gebruikers in gebouwen.

Wordt het verwarmingssysteem van de Nederlandse woning in het begin en midden van de vorige eeuw beschouwd, dan bestond die meestal uit 1 kachel (hout, kolen, olie en later gas) die centraal in de woning stond. Om enigszins een behaaglijk binnen-niveau te realiseren werd de kachel hoog opgestookt. De straling is dan al op meters afstand te voelen. Eén zijde van het lichaam die van de kachel afgekeerd was verloor dan warmte en de zijde van het lichaam naar de kachel toegekeerd nam warmte op.

Met het introduceren van de centrale verwarming, waarbij in elke ruimte een radiator kwam bleef deze asymmetrie bestaan (koude muren=lage stralingstemperatuur, hete radiatoren = hoge stralingstemperatuur en convectieve warmteafgifte). Met de introductie van LaagTemperatuurVerwarming (LTV) ontstond een nieuwe trend in verwarmingssystemen. Echter, bij toepassing van LTV wordt het warmteafgevend oppervlak een aantal keren vergroot waardoor het afgegeven vermogen gelijk blijft voor een bepaalde woning. Het gevolg hiervan is dat de oppervlaktetemperatuur van

LTV-systemen (bv. vloerverwarming 28 °C, LTV radiatoren 45 °C etc.) aanzienlijk lager ligt dan conventionele verwarmingssystemen (90-70 °C). Bij die laatste systemen is de straling al op afstand voelbaar vanwege het grote temperatuur verschil met de huid. Bij LTV systemen die een temperatuur aan het oppervlak hebben van ca. 28 °C is het verschil in temperatuur met de huid nagenoeg 0 en dat betekent dat je bij aanraken geen echte koude/warmte voelt. Er wordt ook nagenoeg geen stralingswarmte met de huid uitgewisseld. Echter, ten opzichte van de kamertemperatuur (meestal ca. 20 °C) is er een temperatuurverschil van ca. 8 °C waardoor er met de ruimte ca. 60-80 W/m² wordt uitgewisseld. Met andere woorden de ruimte wordt verwarmd zonder dat je het merkt. Voordeel voor de gebruiker is dat er geen of geringere stralingsasymmetrie optreedt. Bijkomende voordelen zijn dat er minder stratificatie optreedt in de luchttemperatuur en dat er minder luchtcirculatie en stofverplaatsing plaatsvindt in een ruimte.

Een goede straler van infrarood energie (een zwarte straler) moet een zeer goede absorptie hebben en een zeer lage reflectie. De huid heeft lage reflectiewaarden in het langgolvlige infraroodspectrum en lijkt goed aangepast aan de natuurlijke omgeving. De huid reflecteert zowel directe zonnewarmte en zendt intern opgewekte warmtestraling uit met de grootste mogelijke efficiency. Echter is het menselijk lichaam minder capabel om door de mens gemaakte verwarmingsbronnen te reflecteren zoals vuur.

De opperhuid absorbeert sterk fotochemische ultraviolet straling, wat verbranding van de huid tot gevolg kan hebben. Deze laag absorbeert ook sterk langgolvlige infraroodstraling. De donkere pigment korrels in de huid zijn klein (1.000 nm diameter) en beschermen niet alleen de lederhuid door absorptie van ultraviolet, maar ook door verspreiding van optische straling. Donker pigment verspreidt eerder de kortgolvlige infrarood straling dan dat deze wordt geabsorbeerd. Onder andere door genoemde redenen penetreert kortgolvlige infraroodstraling diep in de huid (zie figuur 4).

In de jaren 60 zijn er studies uitgevoerd waarbij er gepulste zichtbare en IR laserstraling op varkenshuid is getest. Deze studies wijzen uit dat het ontstaan van verwondingen afhankelijk is van de reflectie van de huid en de diepte van penetratie van de warmtestraling in de huid [6].

De reflectie van de huid speelt ook een rol in het vaststellen hoeveel straling effectief kan worden geabsorbeerd. De spectrale reflectie van de huid varieert met pigmentatie en is alleen significant in het visuele en kortgolvlige infrarood spectrum. De reflectie van de huid van golflengten minder dan 310 nm en boven 2.500 nm is slechts 5 % (zie figuur 3).

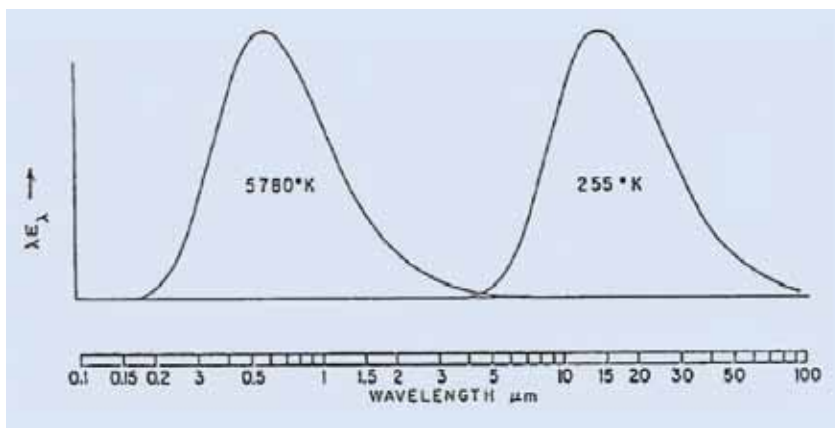
Kleine hoeveelheden straling die diep in het lichaam doordringen, kunnen gaan reageren met fotogevoelige cellen. Dit kan aanleiding geven tot belangrijke fysiologische reacties, zoals het biologische ritme en getijd ritmen. Kunstmatige constante aanstraling kan mogelijk het biologische ritme onderdrukken, wat resulteert in gezondheidsproblemen.

De mens in zijn natuurlijke omgeving is al blootgesteld aan significante straling buiten de deur. De zonnestraling op een heldere dag kan verschillen van 0,5 tot 1,1 kW/m² (50 tot 110 mW/cm²). Het menselijke lichaam is er op ontworpen om de directe zonnewarmte te reflecteren. De huid met zijn lage reflectie en hoge emissiviteit in het spectrum van langgolvlige infrarood, maakt het voor het lichaam mogelijk om zowel het uitstralen als sterk absorberen van infraroodstraling met een golflengte van 10 µm.

Type	Golflengten (nm)	Hoeveelheid (%)
UVB	295 – 315	0,1
UVA	315 – 400	4,9
Violet	380 – 436	
Blauw	436 – 495	
Groen	495 – 566	
Geel	566 – 589	
Oranje	589 – 627	
Rood	627 – 780	39
IR A	760 – 1.400	37
IR B	1.400 – 3.000	16
IR C	3.000 – 100.0000	3

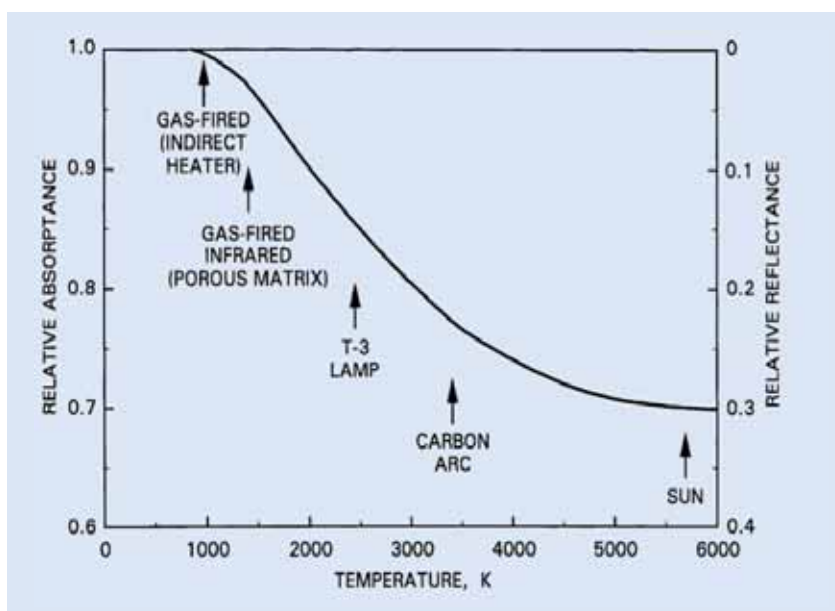
Zonnestraling in percentages.

- TABEL 1 -



De aarde ontvangt precies evenveel kortgolvlige straling als ze langgolvlige uitzendt. De intensiteit van de zon wordt echter bij een veel kortere golflengte maximaal dan de aardse straling [Bron: KNMI]

- FIGUUR 5 -

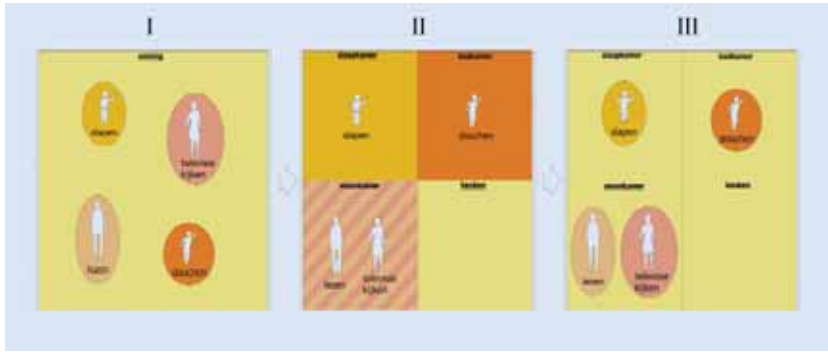


Absorptie en reflectie van huid en standaard kleding [7].

- FIGUUR 6 -

De golflengte λ_m waar de straling maximaal is, volgt uit de 'verschuivingswet van Wien': $\lambda_m = 2.897/T$ (μm) (T in graden Kelvin). De zon heeft aan het oppervlakte een temperatuur van ongeveer 6.000 K en de aarde van 280 K. Met behulp van de wet van Wien kan worden uitgerekend bij welke golflengten de aarde en de zon de maximale hoeveelheid straling uitzenden. De maximum golflengte van zonnestraling ligt in het kortgolvlige, zichtbare gebied $2.897/6.000 = 0,48 \mu\text{m}$. De maximale stralingsintensiteit die echter door de aarde wordt uitgezonden ligt in het langgolvlige, infrarode gebied, $2.897/280 = 10,3 \mu\text{m}$ (zie figuur 5).

Het menselijke lichaam kent complexe afweermechanismen om zichzelf te beschermen tegen schadelijke invloeden van uiteenlopende categorieën. Dit geldt ook voor de bescherming van zijn huid tegen gevaarlijk hoge warmte intensiteiten met golflengten in het zichtbare en kortgolvlige infrarode gebied. De menselijke huid beschermt zichzelf tegen deze warmtestraling van de zon door deze veelal te weerkaatsen en niet te absorberen. Daarentegen fungeert de huid bijna als zwarte straler op golflengten die op aarde heersen. De mens straalt zelf warmte uit met een golflengte van $2.897/310 = 9,3 \mu\text{m}$, bij deze golflengte ligt de emissie factor van de huid op 0,98 (ongeacht het type huid). Voor de verwarming van de mens in het kader van thermisch comfort moet dus worden gezocht naar een warmtebron die opereert met een golflengte van $9,3 \mu\text{m}$. Aangezien de mens over het algemeen zich in een situatie bevindt waarin hij kleding aanheeft moet er uiteraard ook worden gekeken naar de invloed van de stralingswarmte op de kleding. Uit figuur 6 blijkt dat kleding zich over het algemeen hetzelfde gedraagt als de menselijke huid. Bij een bron met een hoge temperatuur (zoals de zon) waarbij zich veel stralingswarmte bevindt in het kortgolvlige infrarood spectrum, wordt relatief veel stralingswarmte door kleding gereflecteerd en weinig geabsorbeerd. Naarmate de temperatuur van de bron afneemt en dus de golflengten van de uitgestraalde stralingswarmte zich meer in het verre infrarood spectrum bevinden neemt de reflectie van kleding af en absorbeert kleding relatief meer warmte.



Verschiede niveaus van thermisch comfort: I Thermisch comfort creëren per woning. II Thermisch creëren per vertrek. III Thermisch comfort creëren per individu.

- FIGUUR 7 -

HET VOORZIEN IN THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID IN EEN WONING

Een verwarmingsinstallatie heeft in principe maar één doel en dat is het voorzien van thermische behoefte in een woning aan de bewoners in de koude dagen van het jaar. Thermische behoefte is niet alleen afhankelijk van omgevingsgebonden factoren zoals luchttemperatuur, gemiddelde stralingstemperatuur, luchtsnelheid en relatieve vochtigheid, maar ook van persoonsgebonden factoren zoals metabolisme en vochtigheid. De insteek van het te ontwerpen verwarmingssysteem is om individuele thermische behaaglijkheid te creëren. Een van de speerpunten bij het ontwikkelen van de verwarmingsinstallatie is de gebruiker centraal te laten staan en niet de huidige stand van de techniek te gebruiken als uitgangspunt dat normaliter gebeurt. De centrale vraag is daarom ook: wat wil de gebruiker? De gebruiker wil niets anders dan zich prettig voelen op thermisch gebied, ongeacht de hoeveelheid kleren die hij aanheeft, de locatie binnen in het huis waar hij zich bevindt, de activiteit die hij aan het uitvoeren is en de hoeveelheid personen waarmee hij zich in de woning bevindt op dat moment. Daarnaast moet het 'ding' die dit thermisch comfort moet leveren geen overlast veroorzaken. Het mag onder andere niet te veel ruimte in beslag nemen, het mag niet in de weg staan, het mag geen lawaai maken, het moet op een eenvoudige wijze regelbaar zijn en het mag geen hoge gebruikerskosten met zich meebrengen. Met andere woorden mag het eigenlijk niet bestaan maar wordt er wel een maximaal resultaat verwacht in de vorm van thermisch comfort.

De stand van de techniek is in de afgelopen dertig jaar sterk verbeterd, dus is er ook veel meer mogelijk op het gebied van thermisch comfort. Een verwarmingsinstallatie moet er niet op ingesteld zijn om een woning of vertrek te klimatiseren maar moet een microklimaat scheppen rond één persoon, zie figuur 7.

Leefstijlflexibiliteit

Omdat elektriciteit een zeer efficiënte energiedrager is moet het mogelijk zijn om een zeer flexibel verwarmingsconcept te creëren. Flexibiliteit zal worden gewenst op woningniveau, dit wil zeggen dat zonder een grote inspanning de verwarmingsinstallatie kan worden aangepast in het geval dat een vertrek wordt uitgebreid of van functie verwisseld met een ander vertrek in de woning. Ook zal er flexibiliteit op vertrekniveau worden gewenst, dit wil zeggen dat zonder grote inspanning de verwarmingsinstallatie kan worden aangepast in het geval dat de indeling van een vertrek wijzigt. Om aan deze flexibiliteit te voldoen zal er moeten worden ingehaakt op het concept van scheiding tussen dragen in inbouw [11].

In de eerste instantie bleek uit onderzoek dat er een centrale- en decentrale verwarmingsinstallatie in een woning aanwezig moet zijn om aan de gevraagde flexibiliteit te voldoen. Deze conclusie wordt gedeeld door het onderzoek dat de TU/e en de KEMA reeds in 1989 hebben uitgevoerd [13]. Echter bleek na onderzoek dat de huidige woning zo goed geïsoleerd is, dat de binnentemperatuur niet lager zakt dan +/- 10 °C. De oorzaken hiervan is de interne warmtelast en invallende zonnewarmte. De conclusie die hieruit kan worden getrokken is dat de ener-

gievraag van een huidige woning dermate laag ligt dat de aanwezigheid van een centrale verwarming overbodig is. Op basis van dit onderzoek bleek dat net zoals bij verlichting een lokale bron de beste prestaties oplevert. Naast deze voorwaarden zijn verder kostprijs, maakbaarheid, regelbaarheid e.d. belangrijk ontwerpuitgangspunten

Gebaseerd op het gebruik van elektriciteit

Het te ontwerpen verwarmingssysteem moet zijn gebaseerd op het gebruik van elektriciteit. Elektriciteit is de energiedrager van de toekomst. Tevens kan er door middel van elektriciteit de gemiddelde stralingstemperatuur beter beheersbaar worden gemaakt. Hierdoor kan er onder andere beter op de thermische behoeften van de gebruikers worden ingesprongen en kan er energie worden bespaard door de verlaging van de binnenluchttemperatuur.

Het te ontwerpen verwarmingssysteem bestaat uit meerdere afgiftebronnen die op een bepaalde manier worden aangestuurd en de warmte afgeven aan een persoon. Deze aansturing en afgifte kunnen gebeuren op verschillende manieren zoals o.a. via puntbronnen, lijnbronnen, vlakbronnen, beweegbare bronnen, railsystemen, etc. Hiervoor zijn verschillende varianten opgezet binnen diverse categorieën en een selectie is daarvan beoordeeld met behulp van de Kesselring-methode [4].

VARIANTEN

Alvorens de verschillende verwarmingssystemen kunnen worden beoordeeld met de Kesselring-methode dienen de beoordelingscriteria te worden vastgesteld, voor zowel functie als realisatie. Het aspect functie speelt hierin op de comfort aspecten en het aspect realisatie speelt in op het onderdeel leefstijlflexibiliteit. De criteria zijn als volgt samengesteld:

FUNCTIE

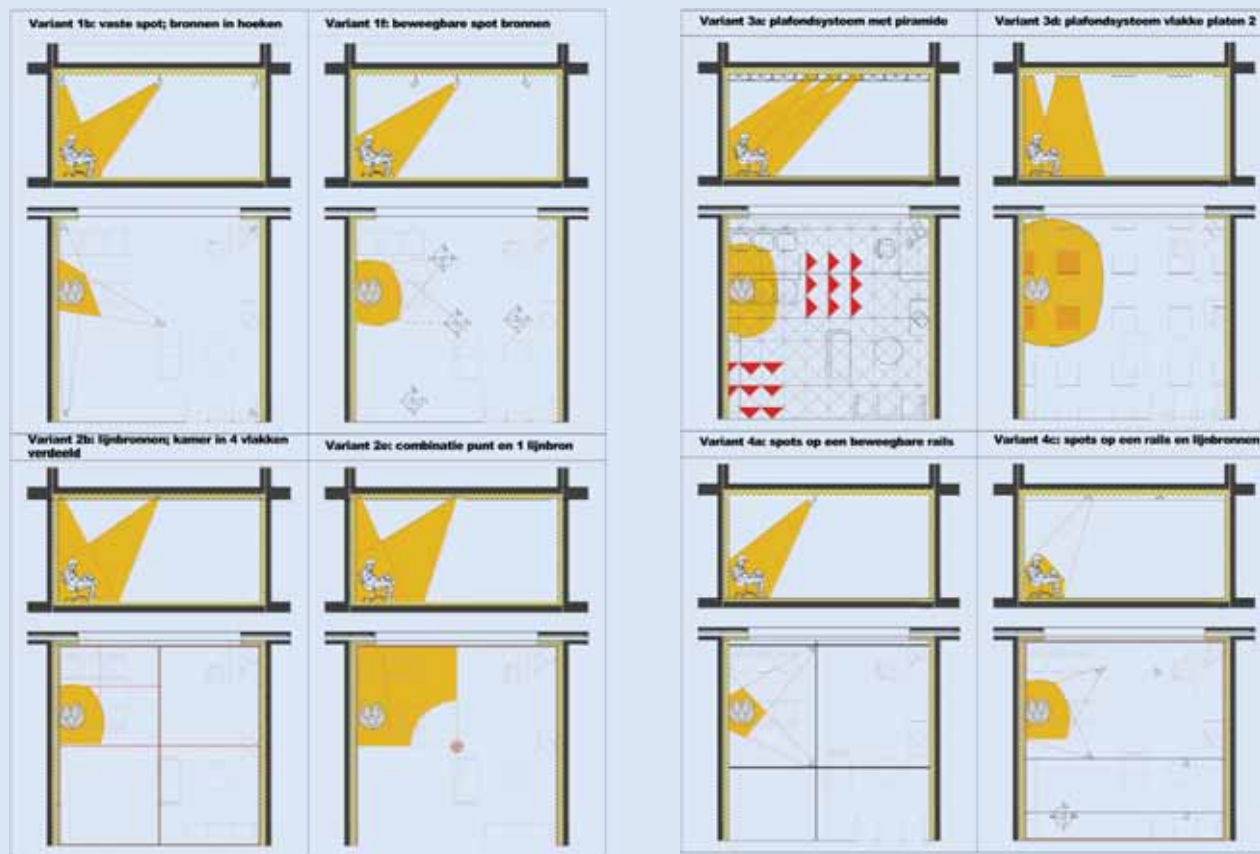
1) Horizontale stralingsasymmetrie

Bij de toepassing van infrarood verwarming is het van belang om een persoon gelijkzijdig aan te stralen om discomfort te voorkomen.

2) Verticale stralingsasymmetrie

Bij een 'warm hoofd' en 'koude voe-

SELECTIE VAN OPGEZETTE VARIANTEN



Variant 5b: vaste spots op rail systeem



Varianten verwarmingssystemen.

- FIGUUR 8 -

mingssysteem in staat om een microklimaat rondom één persoon te scheppen?

5) Regelbaarheid

De regelbaarheid gaat in op de mate waarmee het verwarmingssysteem instelbaar is. Kan bijvoorbeeld op iedere plek evenveel warmte worden afgegeven?

REALISATIE

6) Indelingsvrijheid

Van het verwarmingssysteem wordt verwacht dat deze flexibel kan inspelen op veranderingen op meubelindeling niveau, vertrek niveau en gebouwniveau

7) Integreerbaar met licht

Een meerwaarde treedt op als het verwarmingssysteem makkelijk te integreren zou zijn met een verlichtingssysteem

8) Onderhoudsvriendelijkheid

Een belangrijk aspect bij technische

installaties is de onderhoudsvriendelijkheid, vooral als er gevoelige beweegbare onderdelen inzitten.

9) Compactheid

Een compact verwarmingssysteem wordt niet alleen meer gewaardeerd omdat deze minder in het oog springt maar ook omdat het minder ruimte inneemt in de woning.

Beoordeling varianten

Zie tabel 2.

Resultaten en conclusie verwarmingssystemen

Uit het diagram (figuur 9) blijkt dat er uiteenlopende verschillen zijn tussen de scores van de varianten. Het merendeel van de varianten scoort voor realisatie tussen de 50 % en 70 % met twee uitschieters (5b en 3d) van 75 % en 81 %. Voor functie lopen de scores uiteen van 55 % t/m 85 %. De laagste score wordt behaald door variant 2 waarbij de kamer was opge-

ten' volgt zeer snel discomfort op. Van belang is het daarom dat de persoon niet loodrecht van boven wordt aangestraald maar zoveel mogelijk van de zijkant.

3) Esthetica

Over het algemeen wordt er van een verwarmingssysteem verlangd dat deze zoveel mogelijk onzichtbaar is en dus zeker niet prominent aanwezig is in een ruimte.

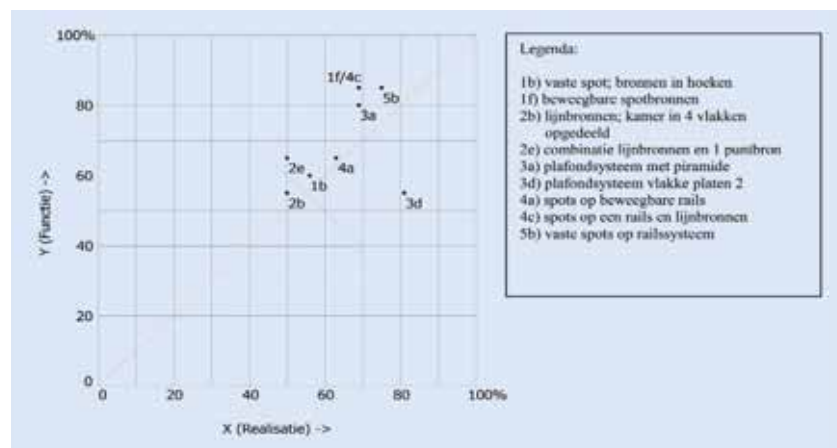
4) Individuele controle

Eén van de speerpunten van het ontwerp is individuele controle. Met andere woorden: is het verwar-

Beoordeling combinatievarianten		Varianten verwarmingssystemen									
		1b	1f	2b	2e	3a	3d	4a	4c	5b	
		Score	Score	Score	Score	Score	Score	Score	Score	Score	Score
Beoordelingscriteria											
Functie	1 Horizontale stralingssymmetrie	3	3	2	3	3	3	3	4	4	4
	2 Verticale stralingssymmetrie	3	4	2	2	4	1	2	4	4	4
	3 Esthetica	2	2	3	3	4	4	2	2	3	4
	4 Individuele controle	2	4	2	2	2	1	3	3	3	4
	5 Regelbaarheid	2	4	2	3	3	4	3	4	3	4
	Totaal (som Y)	12	17	11	13	16	11	13	17	17	20
Relatieve som Y	60 %	85 %	55 %	65 %	80 %	55 %	65 %	85 %	85 %	100 %	
Realisatie	6 Indelingsvrijheid	2	4	2	2	3	4	3	4	4	4
	7 Integreerbaar met licht	3	4	2	2	4	3	3	4	3	4
	8 Onderhoudsvriendelijkheid	2	1	2	2	2	3	2	1	2	4
	9 Compactheid	2	2	2	2	2	3	2	2	3	4
	Totaal (som Y)	9	11	8	8	11	13	10	11	12	16
	Relatieve som Y	56 %	69 %	50 %	50 %	69 %	81 %	63 %	69 %	75 %	100 %

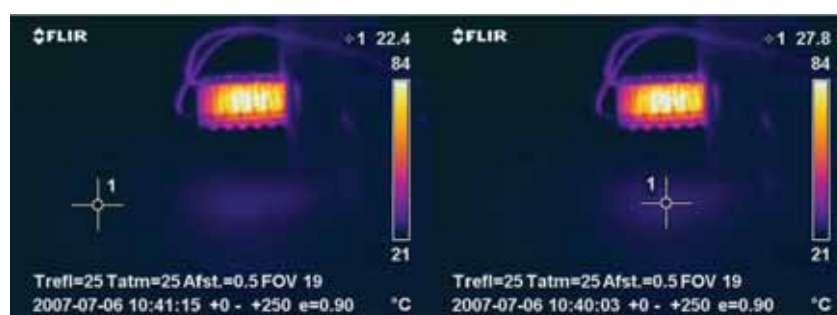
Beoordelingstabel varianten verwarmingssysteem.

- TABEL 2 -



Kesselring-diagram beoordeling varianten verwarmingssysteem.

- FIGUUR 9 -



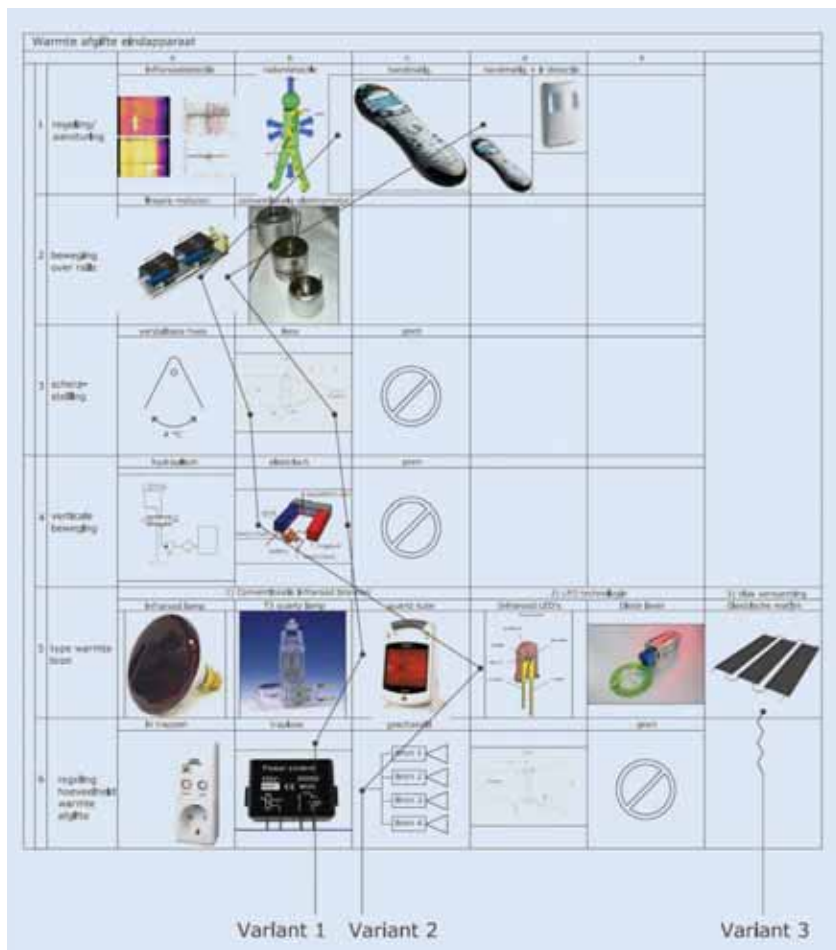
De foto's, die zijn gemaakt door een infraroodcamera, tonen een temperatuurverschil van ca 5,5 °C tussen een aangestraald en een niet aangestraald vlak [15].

- FIGUUR 10 -

deelt in vier delen door lijnbronnen. Op alle onderdelen scoorde deze variant matig. Variant 3d scoort het beste voor de realisatie met 81 %, echter scoort deze variant maar 55 % op het gebied van functie. Variant 5b scoort over het geheel het beste en scoort onder andere op het gebied van thermisch comfort zeer goed. Nader onderzoek was erop gericht om te kijken of de veronderstelde functionaliteit van 3d niet sterk valt te verbeteren indien wordt gedacht om LED-verlichting als bron voor de verwarming te gebruiken.

Uit aanvullend onderzoek blijkt LED-verwarming goede mogelijkheden te bieden als verwarmingssysteem voor de toekomst waarbij het systeem de voordelen van snelheid, regelbaarheid combineert met de vraag naar energiezuinige systemen, die inspelen op de toekomstige bouw trends. De grens tussen verlichting en verwarming zal waarschijnlijk dan ook steeds meer gaan vervagen.

Door gebruik te maken van alle bestaande inzichten en technieken zoals LED-verwarming die specifiek



Morfologisch schema van het eindapparaat.

- FIGUUR 11 -

Beoordeling combinatievarianten		Varianten eindapparaat				
		Factor	Variant 1	Variant 2	Variant 3	
		Score	Score	Score	Score	Score
Beoordelingscriteria						
Speerpunten	1 Energieverbruik	3	9	12	4	12
	2 Opwarmtijd	1	4	4	2	4
	3 Stralingsasymmetrie	1	3	3	3	4
	4 Individuele regelbaarheid	1	3	3	2	4
	5 Aanpasbaarheid	3	9	9	12	12
	Totaal (som Y)		28	31	23	36
	Relatieve som Y		78 %	86 %	64 %	100 %
Algemeen	6 Veiligheid	1	3	3	3	4
	7 Onderhoudsvriendelijkheid	1	1	3	4	4
	8 Compactheid	1	2	3	4	4
	Totaal (som Y)		6	9	15	12
	Relatieve som Y		50 %	75 %	92 %	100 %

Kesseling-tabel beoordeling varianten eindapparaat.

- TABEL 3 -

gebruik maakt van de nauwe spectrale banden, kan er worden ingespeeld op alle toekomstige eisen die aan een modern verwarmingssysteem worden gesteld.

In figuur 10 wordt door middel van een infraroodfoto en een meting de temperatuurverhoging inzichtelijk gemaakt van een vlak, als gevolg van aanstralen, door infrarood LED's met een openingshoek van 120 graden en 860 nm golflengte [12].

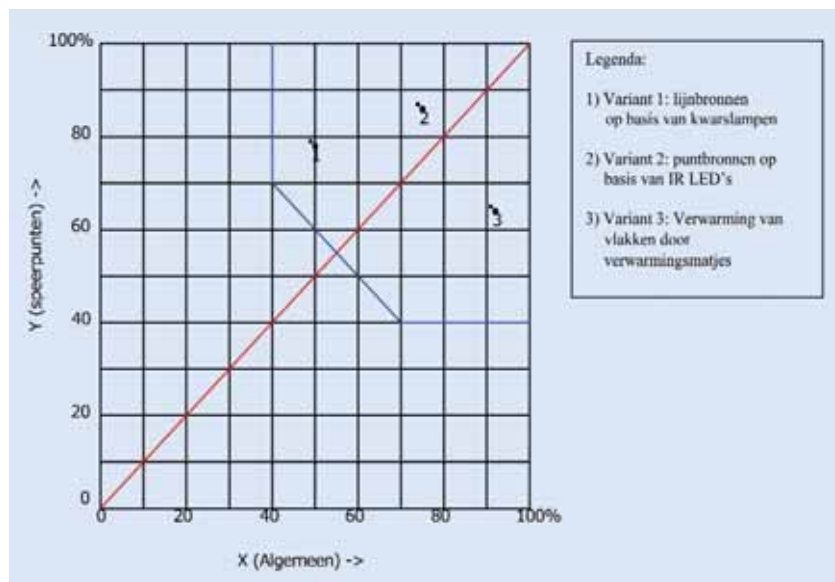
De metingen die zijn uitgevoerd ondersteunen de theoretische uitgangspunten en tonen tevens het technische potentieel van LED-verwarming aan.

Varianten verwarmingsapparaat

In figuur 11 zijn de verschillende onderdelen/functions van het eindapparaat uitgezet tegen verschillende oplossingsvarianten. Het type warmtebron speelt een belangrijke rol in het ontwerp. Er zijn talloze varianten mogelijk in het onderstaande schema, er is echter voor gekozen om één variant met een conventionele infraroodbron te kiezen en één variant met een warmtebron gebaseerd op de LED-technologie. Het doel hiervan is om inzicht te verschaffen tussen de verschillen in de 'oude' en 'nieuwe' techniek. Ook is de variant toegevoegd waarbij er vlakken worden verwarmd met elektrische verwarmingsmatjes. Hoewel deze variant niet voldoet aan al de eisen die worden gesteld in het Programma van Eisen en voor de toepassingen het ontwerp is het interessant om deze variant te vergelijken met de andere varianten om enkele fundamentele verschillen aan het licht te brengen door deze benchmarking.

VASTSTELLEN VAN DE VARIANTEN TYPE OPWEKKINGSBRON

Uit het morfologische overzicht van figuur 11 zijn drie varianten naar voren gekomen. Een belangrijk onderdeel bij het ontwerp van een verwarmingssysteem is de keuze van het type opwekkingsbron. Alle drie de varianten zijn gebaseerd op verschillende principes. Variant 1 is gebaseerd op een conventionele hoogtemperatuur infraroodbron, hierbij wordt er met behulp van een kwartslamp verwarmd.



Kesseling-diagram beoordeling varianten eindapparaat.

- FIGUUR 12 -

Variant 2 is gebaseerd op LED-technologie, waarbij de uitgestraalde elektromagnetische energie zich op een klein spectrum bevindt. Variant 3 is gebaseerd op het verwarmen van grote vlakken met een relatief lage temperatuur. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een systeem, waarbij door middel van een gecontroleerde afgifte van het vermogen de opwarmtijd kan worden verkort. Conventionele infraroodbronnen zoals de gloeilamp en de kwarslamp worden al enkele decennia ingezet als verwarmingsbron voor personen. De LED-technologie wordt gezien als een belangrijke technologie voor de toekomst voor verschillende toepassingsgebieden. De LED-technologie wordt echter nog nergens in verband gezien met de verwarming van personen en/of gebouwen. Het verwarmen van vlakken met behulp van elektriciteit is niet nieuw, de regelbaarheid hierbij vergroten door het aanpassen van het vermogen wel. Op basis van beoordelingscriteria is nagegaan per variant hoe deze zich manifesteert ten opzichte van een bepaald criteria en ten opzichte van de andere varianten. Op basis van deze gegevens zijn er per variant en per criteria, scores toegekend van 1 t/m 4. Hieruit zijn er per variant totaalscores ontstaan voor de aspecten speerpunten en algemeen, zie tabel 3. Deze scores zijn vervolgens uitgezet in een Kesseling-diagram (zie figuur 12).

Op basis van de beoordeling blijkt dat LED-verwarming een groot potentieel

heeft.

Een van de problemen waar men tegenaan loopt is dat de prestatie van traditionele verwarming wordt gedefinieerd door het begrip temperatuur en vermogen, waarbij de meeste objecten als een (semi) grijze straler worden beschouwd en de relatie tussen energie-uitwisseling (watt/m^2) en temperatuur redelijk eenduidig is. In parallel met verlichting waarin de lichthoeveelheid van een gloeilamp (semi-grijze straler) werd uitgedrukt in watt i.p.v. lumen, blijkt dat indien wordt afgestapt van de grijze straler, begrippen als temperatuur, watt of watt/m^2 hun functie verliezen.

CONCLUSIE EN VERDERE TOEKOMST

De parallellen met wand, plafond en vloerverwarming zijn hiermee meteen duidelijk. Zoals reeds eerder beschreven in dit artikel verschillen LED-verwarming en traditionele vlakverwarming fundamenteel van elkaar, zowel in functioneren als in gebruik. Dit hoeft echter geen belemmering te zijn, want uit studies blijkt dat er in de bouw een marktpotentieel aanwezig is voor LED-verwarming en dat de bouw weer een innovatie tegemoet kan zien. In het kader van het afstudeerwerk van ir. E. Ansems [15] zijn een aantal mogelijke toepassingen van LED-verwarming onderzocht door LED Heating. Dit is een spin-off bedrijf van de TU/e dat LED-verwarming voor ruimte en persoonsverwarming verder ontwikkelt. Het is een

mooi voorbeeld van de valorisatie van kennis van uit de universiteiten richting bedrijfsleven. 

REFERENTIES

1. Lichtenberg, J.J.N. (2002). *Ontwikkeling van Projectongebonden Bouwproducten*. Maastricht: Datawys Boekproducties, ISBN 90-9015599-6.
2. Lichtenberg, J.J.N. (7 mei 2004) *Slimbouwen: een herbezinning op bouwen, een strategie voor productontwikkeling*. Intreerede, TU/e.
3. Lichtenberg, J.J.N. (2005) *Slimbouwen*. Boxtel: Aeneas, ISBN 90-75365-74-8.
4. www.fuelthefuture.nl/Kees%20van%20der%20Klein%20%20fuelthefutureTUe240407.pdf.
5. Fanger, P.O. (1972) *Thermal comfort*. New York: McGraw-Hill, INC.
6. Aarts, M.P.J., Bakker, F.E., Schellen, H.L. e.a. (oktober 2004) *Dictaat: Bouwfysisch ontwerpen 1: fysica van de ruimte*, Technische Universiteit Eindhoven.
7. Bakker, F.E. (oktober 1998). *Dictaat: Bouwfysica – warmte*. Technische Universiteit Eindhoven.
8. International programme on chemical safety (1982). *Environmental health criteria 23: lasers and optical radiation*. Geneva, ISBN 92 4 154083 4.
9. Fellers, T.J., Davidson, M.W. *Laser safety*. National High Magnetic Field Laboratory, The Florida State University.
10. ASHRAE (2005). *2005 Ashrae handbook Fundamentals*.
11. Habraken, N.J. (1961). *De dragers en de mensen*. Stichting Architecten Research.
12. KEMA (4 april 2002). *Roadmap 2025: Technologie voor een duurzaam samenleving*.
13. Bakker, F.E. en andere (1989). *All electric wonen 2010*. TU/e en KEMA.
14. Siers, F.J (2004) *Methodisch ontwerpen*. Groningen: Wolthers-Noordhoff.
15. Ansems, E.A(2007), *Elektrische verwarming, Een comfortabele en duurzame oplossing voor de toekomst*, MSc-thesis TU/e, 9 augustus 2007.