

EXERGIE-ANALYSE TOEGEPAST OP EEN WARMTEPOMPSYSTEEM

DYNAMISCHE SIMULATIE VAN EEN WARMTEPOMPSYSTEEM VOOR WONINGVERWARMING

In de gebouwde omgeving wordt veel hoogwaardige (fossiele) energie gebruikt voor verwarming. In het kader van een duurzame energievoorziening moet onder andere aandacht besteed worden aan efficiëntere energie-omzettingen, bijvoorbeeld gebaseerd op een warmtepomp. Alleen energie-analyse geeft geen volledig inzicht in de prestatie van een warmtepompsysteem. Exergie-analyse geeft de werkelijke verliezen, namelijk aan kwaliteit van energie. Exergie-analyse wordt in de gebouwde omgeving echter niet algemeen toegepast.

In dit afstudeeronderzoek is met behulp van een computermodel een warmtepompsysteem beschouwd. Het systeem bestaat uit een warmtepomp in combinatie met laagtemperatuurvloerverwarming in een gemiddelde Nederlandse tussenwoning (Agentschap NL referentietussenwoning). Met behulp van het programma TRNSYS is van dit systeem een dynamische simulatie van een geheel jaar gemaakt, waarbij is uitgegaan van het Nederlandse klimaat. In dit onderzoek zijn de exergieverliezen in kaart gebracht met het oog op mogelijke verbeteringen. De resultaten zijn gepresenteerd en geanalyseerd met behulp van een binnen dit afstudeeronderzoek ontwikkeld grafisch gereedschap in Excel: Graphical User Interface (GUI).



ir. A. (Arnaud) Blom,
adviesbureau Nieman,
Rijswijk

WAT IS EXERGIE?

Exergie is gedefinieerd als de theoretisch maximale hoeveelheid arbeid die uit een hoeveelheid energie verkregen kan worden wanneer deze energie in evenwicht wordt gebracht met de omgeving. De maximale hoeveelheid arbeid wordt verkregen met een omkeerbaar proces.

Het begrip exergie is gebaseerd op de eerste en tweede hoofdwet van de thermodynamica. De eerste hoofdwet, de wet van behoud van energie, en de energie-analyse gaan slechts over hoeveelheden energie. Alle vormen van energie worden hierbij als gelijkwaardig beschouwd, bij omzettingen gaat geen energie verloren. De praktijk leert echter dat niet elke energievorm voor 100% in elke andere vorm kan worden omgezet: dit is de essentie van de tweede hoofdwet.

Volgens de tweede hoofdwet kan de waarde of kwaliteit van energie in een omzetting theoretisch slechts gelijk blijven of afnemen. In de praktijk kan deze alleen afnemen, er bestaat hierdoor geen omzetting die omkeerbaar is. De uitdaging is om processen te ontwikkelen waarbij zo min mogelijk waarde verloren gaat. Deze waarde van energie wordt uitgedrukt in de grootte exergie.

De berekening van de exergie van warmte is gebaseerd op de Carnot-cyclus. Dit is een thermodynamisch kringproces dat de theoretisch maximale omzetting van warmte in arbeid beschrijft. De omgekeerde Carnot-cyclus is de theoretisch meest efficiënte warmtepomp. In een Carnot-

warmtepomp wordt de maximale hoeveelheid warmte uit arbeid gehaald. In de gebouwde omgeving is de exergie van warmte te definiëren volgens vergelijking 1 [6]. Hierin wordt de exergie berekend op basis van de warmtestroom (Q) en de temperatuur (T) daarvan en de referentietemperatuur (T_0). De referentietemperatuur wordt gelijk gesteld aan de temperatuur van de omgeving.

$$Ex_Q = Q \times \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (1)$$

Hierin is:

Ex_Q = exergie van de warmte in J/s

$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ = exegiefactor

T = temperatuur van de warmte in K

T_0 = referentietemperatuur (temperatuur omgeving) in K

Q = warmtestroom in J/s

De warmtepomp

Een warmtepomp is een warmteopwekker die onbruikbare laagwaardige omgevingswarmte verplaatst naar een bruikbaar hoger temperatuurniveau onder toevoer van (elektrische) energie (zie figuur 1). Het rendement van de warmtepomp wordt uitgedrukt in de Coefficient Of Performance (COP). Deze geeft de verhouding weer tussen de hoeveelheid afgegeven warmte en de hoeveelheid toegevoerde elektrische energie. Deze COP is, afhankelijk van het systeem, doorgaans groter dan 100%.

Exergie-analyse geeft echter een completer beeld van de prestatie van de warmtepomp. Er wordt hoogwaardige elektrische energie omgezet in warmte-energie van een lagere kwaliteit. Hoewel er bij dit proces een grotere hoeveelheid omgevingswarmte wordt verplaatst, gaat er in de praktijk altijd kwaliteit verloren. Er is namelijk geen proces mogelijk dat uit de verkregen hoeveelheid warmte weer de toegevoerde hoeveelheid elektriciteit kan maken. Het is niet meer mogelijk de energie voor ieder doel te gebruiken. De exergie-efficiëntie is dus altijd kleiner dan 100%.

Exergie-analyse geeft, in tegenstelling tot energie-analyse, inzicht in het kwaliteitsverlies van de energie en daarmee de ruimte voor verbetering. Er wordt gestreefd naar een zo klein mogelijk exergieverlies. De laag-exergetische benadering streeft naar een vermindering van de inzet van hoogwaardige (fossiele) brandstoffen door een betere thermodynamische afstemming tussen vraag en aanbod, bijvoorbeeld door lagetemperatuurverwarming of het gebruik van restwarmte. Op deze wijze wordt het aanbod van exergie zoveel mogelijk geminimaliseerd op basis van de vraag naar exergie.

MODEL VAN HET GEANALYSEERDE WARMTEPOMPSYSTEEM

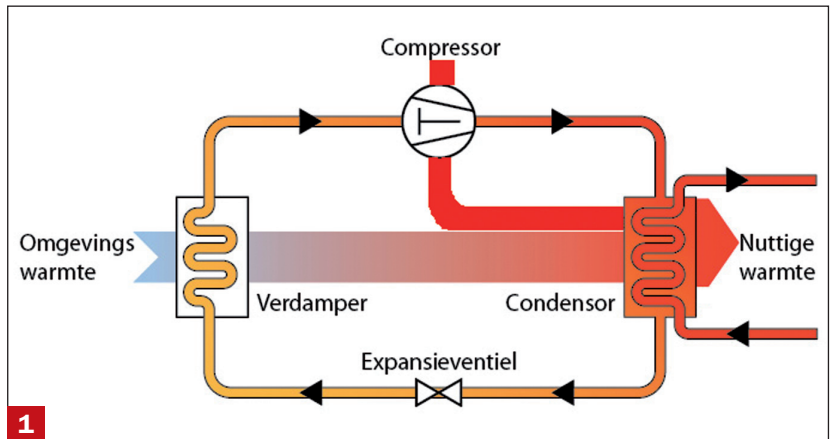
Het beschouwde warmtepompsysteem is weergegeven in figuur 2. Het betreft een vereenvoudigd systeem dat bestaat uit opwekking door middel van een warmtepomp en emissie via vloerverwarming aan binnenlucht.

De uitgangspunten voor het basismodel en de simulatie zijn de volgende:

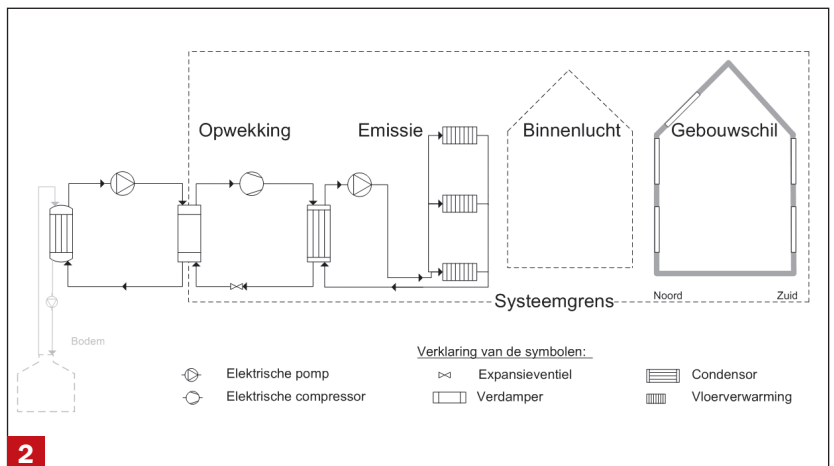
- De instelling voor de gewenste temperatuur van de binnenlucht bedraagt 20°C, de marge waarbinnen deze mag variëren is ± 1°C.
- De temperatuur van het vloeroppervlak mag maximaal 28°C worden.
- Er wordt gebruik gemaakt van een theoretische Carnot-warmtepomp op basis van 40% van het Carnot-COP. Dit wil zeggen dat 40% van het maximaal mogelijke rendement wordt gehaald. In tabel 1 zijn de prestatiegegevens van deze warmtepomp weergegeven, de warmtepomp is gedimensioneerd op een warmtevraag van 7,2 kW. TRNSYS simuleert het gedrag van de warmtepomp op basis van de temperaturen.
- De temperatuur van de bron is constant 12°C.

Tabel 1: Eigenschappen van de warmtepomp op basis van 40% Carnot-COP

ingang temperatuur aan zijde bron [°C]	uitgang temperatuur aan zijde bron [°C]	ingang temperatuur aan zijde afgifte [°C]	uitgang temperatuur aan zijde afgifte [°C]	COP [-]
12	1,30	18	26,69	7,52
12	1,49	20	28,69	6,75
12	1,67	22	30,69	6,13
12	1,85	24	32,69	5,62
12	2,03	26	34,69	5,20
12	2,21	28	36,69	4,84
12	2,38	30	38,69	4,53



Schematische weergave van de warmtepomp



Schematische weergave van het warmtepompsysteem

Er wordt gebruik gemaakt van een referentietussenwoning van Agentschap NL [3]. Deze voldoet aan de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) eis van 2006 (0,8). De woning heeft drie bouwlagen en een zadeldak en is als volgt gemodelleerd:

- gebruiksoppervlak $A_g = 133,6 \text{ m}^2$
- noord-zuid oriëntatie
- warmteweerstand van de gevels en de vloer bedraagt $R_c = 3,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- warmteweerstand van het dak bedraagt $R_c = 4,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- de warmtedoorgangscoefficiënt van de ramen (inclusief kozijn) bedraagt $U = 1,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- gebruiksoppervlak is gelijk aan oppervlak vloerverwarming

Opwekking	Emissie	Binnenlucht	Gebouwschil
Warmtepomp	Vloerverwarming		Totaal verlies woning inclusief ventilatie

3

De beschouwde componenten van het warmtepompsysteem

- ventilatievoud (inclusief infiltratie) bedraagt $n = 1,4 \text{ h}^{-1}$
- geen interne warmteproductie (door personen, verlichting en apparatuur)

METHODE

Voor de modellering en simulatie van het warmtepompsysteem is gebruik gemaakt van het programma TRNSYS (TRAnsient SYstem Simulation program) [5]. Met dit programma is van het systeem een dynamische simulatie van 8760 uren (een heel kalenderjaar) gemaakt. Er wordt gerekend met uurlijks fluctuerende waarden voor onder andere de temperatuur van de buitenlucht en de zonnestraling van een gemiddeld meteorologisch jaar in De Bilt (Meteonorm TMY2).

De componenten opwekking, emissie, binnenlucht en gebouwschil (zie figuur 3) zijn zo gedefinieerd dat er *tussen de componenten* geen energie noch exergie het systeem verlaat. Dit is alleen mogelijk *binnen de componenten*. Om deze reden is de component binnenlucht toegevoegd, want hoewel er geen energie het systeem verlaat vanaf de vloerverwarming tot de gebouwschil, zijn er wel exergieverliezen vanwege het temperatuurverschil tussen de vloerverwarming en de binnenlucht. De aangehouden volgorde van componenten is ontleend aan het statisch rekengereedschap voor exergie-analyse dat in het kader van IEA annex 37 is ontwikkeld [4].

Hierna worden de berekeningen van energie en exergie uit het TRNSYS-model toegelicht.

BEREKENING ENERGIESTROMEN

Warmtevraag

De warmtevraag van de woning is gelijk aan de som van het warmteverlies door transmissie en accumulatie en ventilatie (inclusief infiltratie), verminderd met de warmte winst door zontoetreding. In TRNSYS wordt gebruikt gemaakt van vergelijking 2.

$$Q_{\text{Bui,out}} = Q_{\text{Bui,trans}} + Q_{\text{Bui,vent}} - Q_{\text{Bui,SolGains}} \quad (2)$$

Hierin is:

$$Q_{\text{Bui,trans}} = -Q_{\text{tot,comi}} + Q_{\text{tot,absi}} \quad (3)$$

$Q_{\text{Bui,out}}$ = warmtevraag woning in kW

$Q_{\text{Bui,trans}}$ = warmteverlies door transmissie en accumulatie in kW

$Q_{\text{Bui,vent}}$ = warmteverlies door ventilatie en infiltratie in kW

$Q_{\text{Bui,SolGains}}$ = warmte winst door zontoetreding in kW

$Q_{\text{tot,comi}}$ = convectie naar de binnenlucht en langgolvlige stralingsoverdracht met andere binnenoppervlakken gesommeerd voor alle vlakken behalve de vloer in kW

$Q_{\text{tot,absi}}$ = totale geabsorbeerde zonnestraling door alle binnenoppervlakken behalve de vloer in kW

De beganegrondvloer is niet meegenomen in de bepaling van het warmteverlies door transmissie want deze bevat de vloerverwarming, hierdoor geeft TRNSYS transmissiewinst aan.

Warmtestroom uit vloerverwarming

De afgegeven warmte door de vloer wordt berekend door de som van convectie naar de lucht en langgolvlige stralingsoverdracht van het vloeroppervlak, verminderd met de geabsorbeerde zonnestraling door de vloer.

In TRNSYS wordt gebruikt gemaakt van vergelijking 4.

$$Q_{\text{AL,out}} = Q_{\text{ft,comi}} - Q_{\text{ft,sun}} \quad (4)$$

Hierin is:

$Q_{\text{AL,out}}$ = afgegeven warmte door de vloer in kW

$Q_{\text{ft,comi}}$ = convectie naar de binnenlucht en langgolvlige stralingsoverdracht met andere binnenoppervlakken vanaf het vloeroppervlak in kW

$Q_{\text{ft,sun}}$ = geabsorbeerde zonnestraling door het vloeroppervlak in kW

Warmtestromen warmtepomp

De warmtestromen uit de bron, naar het afgiftesysteem en het elektrisch vermogen van de warmtepomp zijn standaard uitvoergrootheden van de TRNSYS warmtepomp component type 668: Water to Water Heat Pump. Dit type werkt op basis van de prestatiegegevens uit tabel 1. Voor tussenliggende temperaturen wordt geïnterpoleerd.

BEREKENING EXERGIE VAN WARMTESTROMEN

Exergie warmtevraag

De exergie van de warmtevraag wordt berekend met vergelijking 5. Als referentietemperatuur wordt de omgevingstemperatuur aangehouden. De temperatuur van de warmte is in deze component gelijk aan de temperatuur van de binnenlucht. Zodra deze warmte de gebouwschil is gepasseerd is de temperatuur van de warmte gelijk aan de omgevingstemperatuur en is de exergie nul.

$$Ex_{\text{RA,out}} = Q_{\text{Bui,out}} \times ExFac_{\text{RA,out}} \quad (5)$$

Hierin is:

$$ExFac_{\text{RA,out}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{Bui,Air}}}\right) \quad (6)$$

$ExFac_{\text{RA,out}}$ = exergie van de warmtevraag in kW

$Q_{\text{Bui,out}}$ = warmtevraag woning in kW

$Ex_{\text{RA,out}}$ = exergiefactor warmtevraag

T_0 = temperatuur omgeving/buitenlucht in K

$T_{\text{Bui,Air}}$ = temperatuur binnenlucht in K

Exergie vloerverwarming

De exergie van de warmte die de verwarmde vloer verlaat richting binnenlucht wordt berekend door de warmte uit de vloerverwarming te vermenigvuldigen met de exergiefactor die hoort bij de temperatuur van het oppervlak van de vloer (zie vergelijking 7).

$$Ex_{AL,out} = Q_{AL,out} \times ExFac_{AL,out} \quad (7)$$

Hierin is:

$$ExFac_{AL,out} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{fl,sur}}\right) \quad (8)$$

$Ex_{AL,out}$ = exergie van warmtestroom van vloerverwarming naar binnenlucht in kW

$Q_{AL,out}$ = afgegeven warmte door de vloer in kW

$ExFac_{AL,out}$ = exergiefactor vloerverwarming uit

T_0 = temperatuur omgeving/buitenlucht in K

$T_{fl,sur}$ = temperatuur oppervlak vloer in K

Exergie warmtepomp

Aan beide zijden van de warmtepomp, in de warmtewisselaars aan de bron- en afgiftezijde, is een kringloop gevuld met water. Het water aan de bronzijde is in temperatuur gedaald als het de warmtewisselaar verlaat. Het water aan de afgiftezijde is warmer geworden als het de warmtewisselaar verlaat. De exergie die in de warmtewisselaars wordt overgedragen is gebaseerd op de thermische component van de verandering in inwendige energie van het water in de kringlopen. Dit is aanvulling op de hiervoor gebruikte exergie van warmte. De afleiding van vergelijking 10 is te vinden in [2] en [4].

$$Ex_{HP,out} = Q_{HP,out} \times ExFac_{HP,out} \quad (9)$$

Hierin is:

$$ExFac_{HP,out} = 1 - \frac{T_0}{T_{HP,ld,out} - T_{HP,ld,in}} \times \ln \frac{T_{HP,ld,out}}{T_{HP,ld,in}} \quad (10)$$

$Ex_{HP,out}$ = exergie overgedragen van warmtepomp naar vloerverwarming in kW

$Q_{HP,out}$ = warmtestroom afgifte in kW

$ExFac_{HP,out}$ = exergiefactor warmtepomp uit

T_0 = temperatuur omgeving/buitenlucht in K

$T_{HP,ld,out}$ = temperatuur uitgang zijde afgifte in K

$T_{HP,ld,in}$ = temperatuur ingang zijde afgifte in K

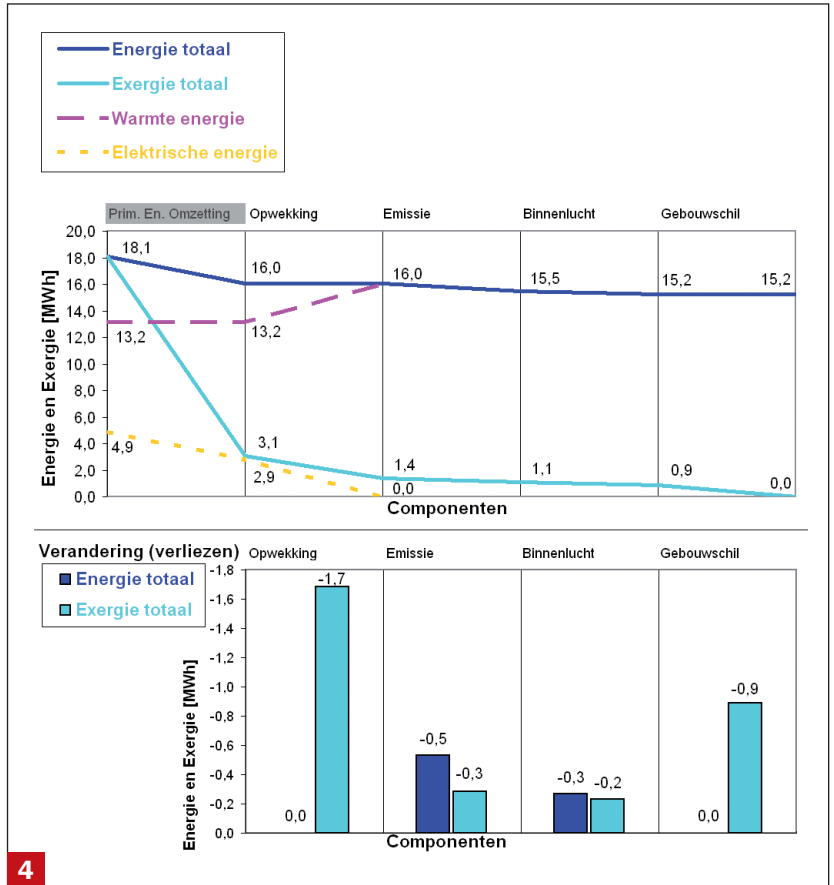
De exergie zoals die aan de warmtepomp wordt overgedragen kan op eenzelfde wijze berekend worden als in vergelijking 9 en 10.

De simulatie levert uurlijkse waarden voor de temperatuur en voor energie en exergie. Deze gegevens zijn met behulp van een binnen dit afstudeeronderzoek ontwikkeld grafisch gereedschap geanalyseerd.

RESULTATEN

In figuur 4 zijn de over het stookseizoen gesommeerde hoeveelheden energie (blauwe lijn) en exergie (lichtblauwe lijn) in het systeem zichtbaar. De bijbehorende staven geven de verliezen van zowel energie als exergie weer. De paarse gestreepte lijn geeft de warmte-energie weer. De gele gestippelde lijn geeft de elektrische energie weer. Ter illustratie is de primaire energie-omzetting weergegeven in de grafiek. Hierbij is uitgegaan van een rendement van 58% voor elektriciteitsopwekking in een stoom- en gascentrale. De resultaten zullen kort toegelicht worden.

In de component warmtepomp verlaat geen energie het systeem, de elektrische energie wordt volledig omgezet in warmte. Dit is te zien aan de dalende gele gestippelde lijn (elektriciteit) en de stijgende paarse gestreepte lijn



4 Energie en exergie in het systeem gesommeerd over het stookseizoen (1 oktober tot 1 mei)

(warmte). In deze component gaat wel meer dan de helft van de exergie verloren. Dit is in overeenstemming met de 40% van Carnot-COP warmtepomp. In de praktijk zijn de compressor, de condensor, de verdamer en het expansieventiel verantwoordelijk voor deze verliezen. Bij de bepaling van het energierendement van de warmtepomp is de omgevingswarmte meegenomen. Hierdoor is het energierendement 100%, terwijl de COP veel hoger is.

In de component vloerverwarming verlaat warmte het systeem via de vloer. Deze warmtestroom wordt tot de component vloerverwarming gerekend omdat deze hierdoor sterk wordt beïnvloed. Het exergieverlies ontstaat door het verschil tussen de gemiddelde temperatuur het warme water in de vloerverwarming en de gemiddelde temperatuur van het vloeroppervlak. Door deze temperatordaling gaat exergie verloren.

Het exergieverlies van de binnenlucht kan verklaard worden door het verschil tussen de gemiddelde temperatuur van het vloeroppervlak en de temperatuur van de binnenlucht. Bij lagetemperatuurverwarming is dit temperatuurverschil en exergieverlies in verhouding klein.

Zodra de warmtestroom de gebouwschil verlaat en de referentietemperatuur (omgeving) (T_0) aanneemt is de exergiefactor nul. Exergie gaat per definitie volledig verloren op het niveau van de referentietemperatuur.

CONCLUSIE

Geconcludeerd kan worden dat exergie-analyse van een warmtepompsysteem toegevoegde waarde heeft ten opzichte van alleen energie-analyse. Verliezen in de kwa-

liteit van energie worden zichtbaar waar de energie-analyse geen verlies laat zien. Aangetoond wordt dat er zelfs bij een warmtepomp met relatief hoge COP verliezen optreden, namelijk exergieverliezen. Ook is te zien dat er (exergie)verliezen zijn in het emissiesysteem vloerverwarming en binnenlucht, die niet met een energie-analyse geïdentificeerd worden. Bij het geanalyseerde systeem met vloerverwarming zijn deze verliezen relatief laag, maar bij systemen met een hogere temperatuur zijn de verliezen aanzienlijk groter. De verliezen worden met een exergie-analyse geïdentificeerd *en* gekwantificeerd, waardoor het werkelijke verbeterpotentieel zichtbaar wordt.

Aanvullend op de energie-analyse is dus inzicht verkregen in de mogelijkheden voor verbetering aan het systeem. Verbeteringen kunnen gezocht worden in ofwel het beperken van de energiestromen of het verlagen van de temperaturen van het systeem. De bedoeling is het omkeerbare proces zo dicht mogelijk te benaderen. ■

Dit afstudeeronderzoek is uitgevoerd in samenwerking met de afdeling Climate Design van de faculteit Bouwkunde van de TU Delft binnen het EOS LT (Energie Onderzoek Subsidie Lange Termijn) project 'Exergetic System Approach' (www.lowex.nl).

BRONNEN

- ▶ [1] Blom, A., *Exergie-analyse toegepast op een warmtepompsysteem, Een dynamische simulatie van een warmtepompsysteem voor woningverwarming*, Delft: TU Delft, 2009
- ▶ [2] Stougie, L., Woudstra, N., e.a., *Syllabus Exergie-analyse*, Delft: TU Delft, 1997
- ▶ [3] Agentschap NL referentie-tussenwoning (<http://regelingen.agentschapnl.nl/content/kenmerken-tussenwoning-energieprestatie-nieuwbouw-epn>)
- ▶ [4] Schmidt, D., *Design of Low Exergy Buildings, Method and a Pre-Design Tool* (Engels), International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol. 3, 2003
- ▶ [5] TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) versie 16.01.0003, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2007 (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys>)
- ▶ [6] Jansen, S., Woudstra, N., *Understanding the exergy of cold - Theory and practical examples*, (Engels), International Journal of Exergy 2010, Vol. 7, No. 6, p. 693 – 713 (<http://www.inderscience.com/browse/index.php?journalID=135&year=2010&vol=7&issue=6>)

■ UW ADVERTENTIE OOK OP DEZE PAGINA?

Meld u aan als sponsor bij de NVBV

