

Raamwerk voor semi dynamische exergieanalyse

In de bouw wordt altijd over energie gesproken, en slechts zelden over exergie. Exergie is een maat voor de kwaliteit van energie en met een exergieanalyse kunnen kwaliteitsverliezen die bij processen plaatsvinden worden geïdentificeerd en gekwantificeerd. Terwijl er zeer veel energiesimulatieprogramma's bestaan [1], is het aanbod van exergiesimulatieprogramma's uiterst beperkt. In dit artikel wordt een raamwerk voor de semi-dynamische analyse van exergieverliezen van energievoorzieningsystemen voor de gebouwde omgeving beschreven. Het raamwerk vormt de basis voor een exergieanalysemethode die verder zal bestaan uit de benodigde formules voor het berekenen van de exergie-inhoud van de diverse energiestromen.

- door mevr. ir. S.C. Jansen*, mevr. dr.eng. E.C. Boelman MBA* en dr.ir. G. Korevaar**

Vanwege de relatieve onbekendheid in de bouw met het begrip exergie, wordt eerst een introductie gegeven op de achtergrond van het project, het begrip exergie, en de stand van zaken betreffende exergieanalyse in de gebouwde omgeving. Vervolgens wordt het raamwerk beschreven, afgesloten met een vereenvoudigd voorbeeld en de conclusie.

ACHTERGROND

Het beschreven raamwerk wordt ontwikkeld binnen het LowEx.NL-project. LowEx is een internationaal gebruikt begrip dat staat voor Low Exergy, wat neerkomt op het verminderen van de exergieverliezen en het zo veel mogelijk gebruik maken van laagwaardige energiebronnen. Het doel van het LowEx.NL-project is bij te dragen aan een aanzienlijke besparing

van het gebruik van hoogwaardige energiebronnen, door het toepassen van exergieanalyse. Het project wordt uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft (exergieanalyse), de Universiteit Twente (financiële aspecten) en de Technische Universiteit Eindhoven (thermisch comfort), met steun van het SenterNovem EOS-LT-programma [2].

Energiegebruik is een belangrijk onderdeel van onze samenleving. De energievoorziening voor gebouwen speelt een grote rol met een aandeel van circa 40 % van het landelijke energiegebruik in Nederland [3]. De Nederlandse overheid wil de overgang (transitie) naar een duurzame energiehuishouding bereiken en de CO₂-uitstoot verder beperken. Dit zogenoemde transitiebeleid is vormgegeven in het programma Energietransitie, dat

Mevr. ir. S.C. Jansen



Mevr. dr.eng. E.C. Boelman



Dr.ir. G. Korevaar



* Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, Delft, Nederland

** Technische Universiteit Delft, Faculteit der Technische natuurwetenschappen, Delft, Nederland

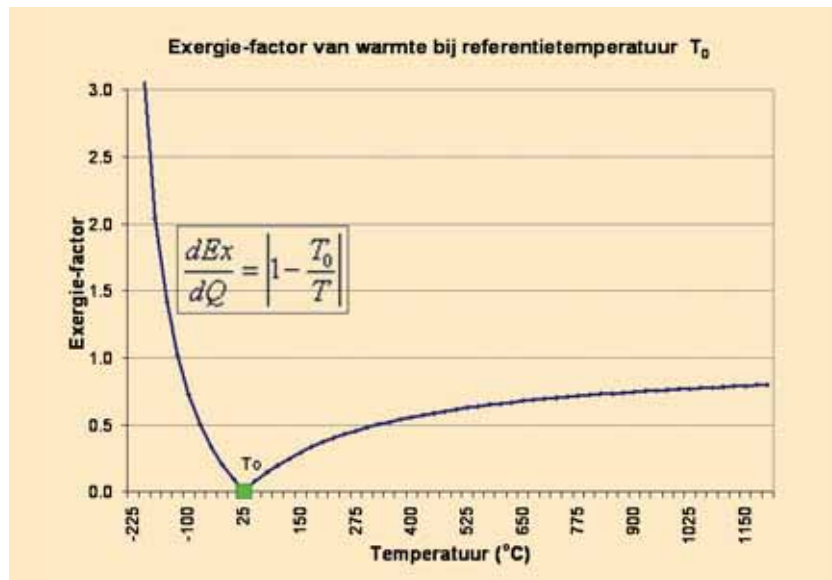
weer is onderverdeeld in zeven platforms, waaronder het platform gebouwde omgeving (PeGo) [4]. Daarnaast stimuleert de overheid via het EOS-LT-programma het vergroten van de kennis over energie-efficiency en duurzame energie in Nederland [2].

Internationaal wordt veel aandacht besteed aan de LowEx-benadering. Drie werkgroepen (Annex 37, 49 en 51) van het International Energy Agency (IEA) zijn gewijd aan het toepassen van de exergiebenadering in de gebouwde omgeving [5,6,7]. Daarnaast wordt internationale samenwerking gestimuleerd binnen het programma COSTeXergy.[8] Het LowEx.NL-project levert een bijdrage aan Annex 49 en COSTeXergy.

Introductie op het begrip exergie

Energie is een begrip waaronder verschillende energievormen worden verstaan, zoals kinetische energie, potentiële energie, elektrische energie, interne energie, warmte en arbeid, waarbij de laatste twee energieoverdrachtsvormen zijn. Volgens de eerste hoofdwet van de thermodynamica gaat energie nooit verloren: Bij de energieoverdracht tussen twee systemen is de hoeveelheid energie die het ene systeem uitgaat gelijk aan de hoeveelheid energie die het andere systeem in gaat. Een voorbeeld hiervan is de energie uit een warm bad: Na verloop van tijd is het bad afgekoeld en is de badkamer opgewarmd en hebben beide dezelfde temperatuur bereikt. De totale hoeveelheid energie in de badkamer is gelijk gebleven, aangenomen dat de badkamer zeer goed is geïsoleerd van de andere ruimten in het huis.

Uit ervaring weten we echter dat wanneer energie van een systeem naar een ander systeem is overgedragen, zoals in het voorbeeld, deze energie niet vanzelf weer teruggaat naar het oorspronkelijke systeem. In dit geval kan de energie in de warme badkamer niet opnieuw worden gebruikt om het bad op te warmen. Er is weliswaar geen energie verloren gegaan, maar de kwaliteit van de energie is verminderd. Bij processen die spontaan optreden, zoals de warmtestroom van een warm naar een koud systeem, gaat altijd kwaliteit verloren. Volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica geldt voor alle processen dat de kwaliteit van de



Exergiefactor van een warmtestroom bij een omgevingstemperatuur van 25 °C (298 K).

- FIGUUR 1 -

totale hoeveelheid energie gelijk blijft of verloren gaat. In de praktijk gaat er altijd kwaliteit verloren: processen waarbij de kwaliteit omhoog gaat vinden nooit spontaan plaats. Een voorbeeld hiervan is een warmtestroom van een systeem met een lage naar een systeem met een hoge temperatuur: Dit kan alleen worden gerealiseerd met inzet van arbeid (bv. elektriciteit bij een compressie warmtepomp), waarbij er bij werkelijke processen per saldo altijd netto kwaliteit verloren gaat.

Exergie is een maat voor de kwaliteit van de energie. De thermodynamische definitie van exergie is “de maximale hoeveelheid arbeid verkrijgbaar uit een systeem wanneer dit in evenwicht wordt gebracht met de omgeving”. Arbeid is een energievorm met de hoogste kwaliteit, omdat deze theoretisch volledig in elke andere energievorm kan worden omgezet. Elke energievorm bevat een bepaalde hoeveelheid exergie, die kan verschillen van de energie-inhoud. De exergie van een stof bestaat uit een mechanische, thermische en een chemische component, door verschillen in druk, temperatuur of chemische samenstelling. In dit artikel wordt voornamelijk alleen over de thermische component gesproken.

De exergie van een systeem kan worden uitgedrukt met een “exergiefactor”, die wordt gedefinieerd als de hoeveelheid exergie (ofwel arbeidspotentieel) van een systeem gedeeld door

de hoeveelheid warmte die uit hetzelfde systeem kan worden verkregen. De exergiefactor van warmte is afhankelijk van de temperatuur waarop de warmteoverdracht plaatsvindt en de temperatuur van de omgeving volgens formule 1 (aangepast naar [9]).

Formule (1) is weergegeven in figuur 1 voor een omgevingstemperatuur van 298 K (25 °C).

$$\frac{dE}{dQ} = \left| 1 - \frac{T_0}{T} \right| \quad (1)$$

dE = Exergie
dQ = Warmteoverdracht (in dit geval beschouwd als een positieve waarde zowel bij $T > T_0$ als bij $T < T_0$)
 T_0 = Omgevingstemperatuur (K)
T = Temperatuur waarop de warmteoverdracht plaatsvindt (K)

De grafiek laat zien dat warmte op omgevingstemperatuur geen arbeidspotentieel heeft: de exergiefactor is nul. Voor temperaturen hoger dan T_0 nadert de exergiefactor tot één. Dat betekent dat een warmtestroom die plaatsvindt op een oneindig hoge temperatuur theoretisch geheel kan worden omgezet in arbeid. Bij temperaturen lager dan T_0 stijgt de exergiefactor zeer scherp en nadert tot oneindig bij nul Kelvin. Dit betekent dat warmteoverdracht bij $T < T_0$ theoretisch een groot arbeidspotentieel heeft, maar ook dat het zeer veel arbeid kost om lage temperaturen te bereiken of in

stand te houden. Warmtestromen in de gebouwde omgeving vinden meestal plaats nabij omgevingstemperatuur en hebben daarom een lage exergiefactor en dus relatief weinig exergie-inhoud per eenheid energie. Theoretisch kunnen deze warmtestromen worden gerealiseerd met weinig arbeid. In de praktijk worden hier echter vaak energiebronnen met een hoge exergiefactor ingezet, zoals aardgas.

Exergie in de gebouwde omgeving: stand van zaken

In de gebouwde omgeving is het gebruikelijk een energieanalyse uit te voeren voor het ontwerpen, beoordelen en eventueel verbeteren van een energievoorzieningssysteem. Met een energieanalyse worden energieverliezen in kaart gebracht. Omdat energie nooit verloren gaat zijn dit in feite energielekken over de systeemgrenzen heen, zoals de transmissieverliezen in een distributieleiding. De kwaliteitsverliezen die in het systeem optreden, zoals bij de warmte-overdracht van een warm bad naar de badkamer maar ook van een radiator naar een ruimte, worden met een energieanalyse niet geïdentificeerd. Hierdoor lijkt het soms alsof processen zeer efficiënt zijn terwijl in feite de kwaliteit van de gebruikte energie vele malen hoger is dan die van de uiteindelijk benodigde energie. Een bekend voorbeeld hiervan is de HR-ketel: Terwijl de energie-efficiëntie van de ketel bijna 100 % kan zijn, is de exergie-efficiëntie uiteindelijk, wanneer de warmte is overgedragen aan de ruimte, slechts circa 5 %, omdat de exergiefactor van aardgas ongeveer 1 is en de exergiefactor van warmte op 20 °C slechts 0,051 (bij een omgevingstemperatuur van 5 °C, volgens formule 1). Dit betekent dat er een groot verbeterpotentieel is, dat wel uit een exergieanalyse blijkt, maar niet uit de energieanalyse naar voren komt.

Het nut van exergieanalyse in de gebouwde omgeving wordt door velen al onderschreven. Verschillende nationale en internationale studies zijn en worden uitgevoerd naar de exergieanalyse van gebouwen en wijken (5-8 en 10-14), zoals ook is beschreven in de achtergrond. Terwijl het aanbod van energie analysetools zeer groot is, is het aanbod van exergie analysetools echter nog zeer gering. In het kader

van Annex 37 is een spreadsheet ontwikkeld voor de *steady state* exergie-analyse voor ruimteverwarming en warmtapwater [11]. Het onderzoek naar exergie analysemethoden wordt in het kader van Annex 49 voortgezet. Door [12] is de simulatiesoftware h.e.n.k. ingezet voor de semi-dynamische analyse van de exergievraag voor ruimteverwarming en -koeling. Een algemeen toepasbare (semi) dynamische exergie analysemethode is echter nog niet algemeen beschikbaar.

Ondanks de veelbelovende bijdrage die exergieanalyse kan leveren aan het ontwikkelen van efficiënte energievoorzieningssystemen vindt het toepassen van exergieanalyse in de bouwwereld nog maar op zeer kleine schaal plaats, onder andere door de relatieve onbekendheid met het begrip exergie en het ontbreken van een algemeen toepasbare rekenmethode. Het Low-Ex.NL project beoogt hier verandering in te brengen door het ontwikkelen van een algemeen toepasbare semi-dynamische exergieanalysemethode.

BESCHRIJVING VAN HET RAAMWERK

Het energievoorzieningssysteem van een gebouw wordt opgebouwd uit de energievraag, de afgifte, omzetting, opslag en distributie van energie - samen de energieleveringsprocessen genoemd - en de uiteindelijk gebruikte energiebronnen. Dit is weergegeven in onderstaande figuur:

Het raamwerk verdeelt dit totale systeem onder in componenten¹ volgens

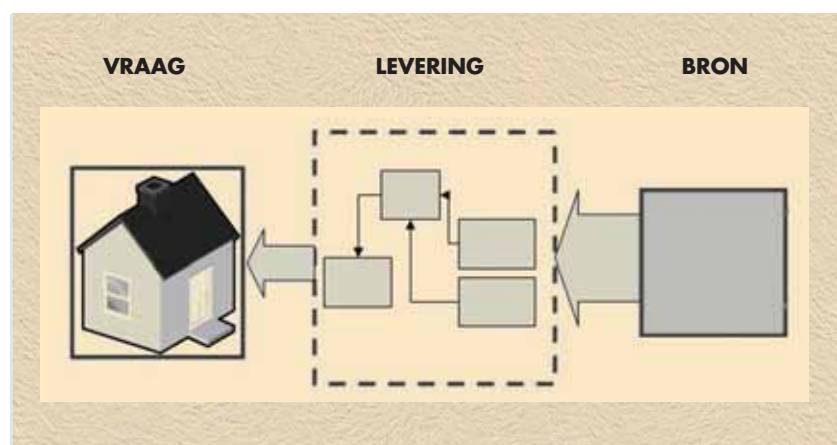
deze drie categorieën:

1. exergievraag: een gebouw met de bijbehorende energievraag (verschillende bouwtypen);
2. leveringscomponenten: afgifte, conversie, opslag en distributie (zoals een warmtepomp of een HR ketel);
3. energiebronnen (zoals aardgas, geothermische energie, zonne-energie of biomassa).

Voor al deze componenten kan de exergie-inhoud van de energiestromen die de component in en uit gaan worden berekend. Het verschil tussen exergie-input en exergie-output is gelijk aan het exergieverlies dat optreedt in een component. Tussen twee componenten vindt geen exergieverlies plaats: De output van een component (bijvoorbeeld een distributieleiding) staat per definitie gelijk aan de input van de volgende component (bijvoorbeeld een vloerverwarmingssysteem). Dit betekent dat ook de temperatuurniveaus van genoemde output en input gelijk dienen te zien. Indien dit niet het geval is omdat er bijvoorbeeld een warmtewisselaar tussen zit, dient deze als aparte component te worden ingevoerd. In figuur 3 wordt het raamwerk weergegeven.

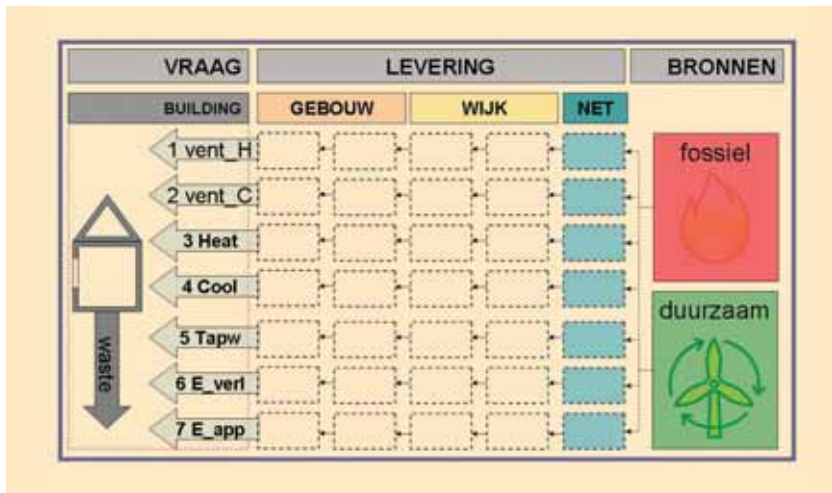
Algemene uitgangspunten voor het raamwerk

Voor de methode wordt gebruik gemaakt van het bestaande dynamische energiesimulatieprogramma TRNSYS, aangezien exergiestromen kunnen worden berekend op basis van de uurlijkse resultaten van deze simulaties (zoals energiestromen en tempe-



Schematische opbouw van het energievoorzieningssysteem van een gebouw, bestaande uit de vraag, de energielevering (afgifte, conversie, opslag en distributie) en de uiteindelijk gebruikte energiebronnen.

- FIGUUR 2 -



Raamwerk voor het analyseren van de exergie verliezen.

- FIGUUR 3 -

aturen). Doordat de exergieanalyse hiermee eigenlijk bestaat uit statische berekeningen per uur, is dit een semi-dynamische analyse. TRNSYS is gekozen vanwege de internationale bekendheid en omdat de berekeningsmethode goed aansluit bij het doel van de exergieanalyse: TRNSYS is opgebouwd uit componenten (zoals een gebouw en een warmtepomp) met inputs en outputs die aan elkaar kunnen worden verbonden, wat de berekeningen van de exergie verliezen per component goed mogelijk maakt. Het beschreven raamwerk kan echter in principe ook op andere simulatieprogramma's worden toegepast.

De momentane buitentemperatuur wordt als referentietemperatuur (T_0) beschouwd. Uitgangspunt voor de te ontwikkelen exergie analyse methode is dat zowel de exergie van de vraag als alle exergie verliezen bij de energie leveringsprocessen (afgifte, conversie, opslag en distributie) en de exergie-inhoud van energiebronnen gedurende het jaar worden berekend. Dit is belangrijk aangezien niet alleen de vraag afhangt van het tijdstip (o.a. door wisselende buitentemperatuur) maar ook de prestatie van de leveringsprocessen (zoals bij een warmtepomp) en de exergie-inhoud van een energiebron (zoals bij thermische energieopslag).

Exergievraag

In de analyse methode worden alle energievragen van een gebouw meegenomen inclusief het elektriciteitsverbruik voor apparatuur. Dit maakt het mogelijk de verhoudingen tussen de verschillende vragen weer te geven.

Daarnaast is het van belang voor het kunnen beoordelen van bepaalde (nieuwe) installaties, zoals een micro-WKK (ook wel HRe-ketel genoemd). Voorlopig wordt alleen de thermische component van de exergie in de analyse meegenomen. Chemische en megenergie kunnen mogelijk later ook worden berekend [13, 15] om de invloed van bijvoorbeeld be- en ontvochtiging mee te kunnen nemen.

Vanwege de verschillende energievormen van de vraag wordt in de analyse een onderscheid gemaakt tussen de volgende verschillende typen energievraag:

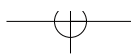
1. verwarmen van ventilatielucht (Vent_H);
2. koelen van ventilatielucht (Vent_C);
3. ruimteverwarming (Heat);
4. ruimtekoeling (Cool);
5. tapwater (Tapw);
6. elektriciteitsverbruik.

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen verwarming en koeling van ventilatielucht enerzijds en de resterende verwarmings- en koelvraag van de ruimte anderzijds, om twee redenen: Ten eerste worden vaak andere componenten ingezet voor het verwarmen van ventilatielucht dan voor het compenseren van de overige warmteverliezen. Een voorbeeld hiervan is een woning waarbij de ventilatielucht wordt voorverwarmd door middel van balansventilatie en de resterende warmtevraag door vloerverwarming wordt ingevuld. Om de verliezen aan de juiste installatie toe te kennen moeten de vragen apart worden geanalyseerd.

Ten tweede is het exergieverlies (per eenheid energie) door een ventilatiestroom niet gelijk aan het exergieverlies (per eenheid energie) door warmtetransport van transmissie. Hierdoor dient de exergievraag ook verschillend te worden berekend. Dit verschil kan als volgt inzichtelijk worden gemaakt: Voor het verwarmen van een ruimte dient de energie te worden toegevoerd op ten minste de binnentemperatuur of hoger. Voor het verwarmen van ventilatielucht dient de energie steeds te worden toegevoerd op ten minste de temperatuur van de ventilatielucht of hoger. Wanneer buitenlucht wordt opgewarmd tot de gewenste binnentemperatuur, is de temperatuur van deze lucht in het begin van het proces nog gelijk aan de buitentemperatuur. Deze temperatuur loopt op tot de binnentemperatuur. De energie kan in het begin van het proces dus worden toegevoerd op een temperatuur iets boven de buitentemperatuur en dient aan het eind van het proces te worden toegevoerd op een temperatuur iets boven de binnentemperatuur. De exergiefactor van de in het begin toegevoerde energie is lager dan de exergiefactor van de uiteindelijk toegevoerde energie (zie formule 1 en grafiek 1). Hierdoor is per eenheid energie voor het gehele verwarmingsproces van ventilatielucht minder exergie nodig dan voor het compenseren van transmissieverliezen. Dit wordt ook duidelijk door het principe van een tegenstroomwarmtewisselaar: het is niet mogelijk met retourlucht de ruimte op te warmen, maar het is wel mogelijk hiermee de toevoerlucht voor te verwarmen. In het ideale geval kan dit theoretisch zelfs tot de ruimtetemperatuur.

Er wordt voornamelijk geen nader onderzoek gedaan naar het gebruik van warm water. De hiermee gepaard gaande warmtevraag wordt als vast gegeven beschouwd en de exergievraag wordt berekend op basis van de temperatuur. Ook de elektriciteitsvraag voor verlichting en apparatuur wordt niet nader onderzocht maar als vast gegeven beschouwd op basis van literatuur.

Naast de genoemde exergievraag van een gebouw (een input) produceert het ook exergieafvalstromen die zijn gekoppeld aan de stofstromen door het gebouw (retour ventilatielucht en retour warmtapwater). In theorie com-



penseren de afvalstromen voor de ventilatielucht (retourlucht) de exergievraag voor ventilatielucht (toevoerlucht). Deze twee stromen worden echter toch apart benaderd, omdat er altijd processen (zoals warmteterugwinning) nodig zijn om de energie over te dragen. Bij deze processen gaat in de praktijk altijd exergie verloren. Daarnaast is het ook mogelijk de afvalstromen voor andere doeleinden te gebruiken, waardoor het nuttig is ze apart te berekenen.

Een ander belangrijk aspect bij het bepalen van de energievraag van een gebouw zijn de systeemgrenzen die voor dit gebouw worden gehanteerd. Bij het bepalen van de exergievraag wordt alleen gekeken naar gebouweigenschappen en worden alle gebouwinstallaties buiten beschouwing gelaten. In tegenstelling tot de aanpak bij bijvoorbeeld een EPC-berekening, waar de warmtevraag wordt bepaald ná toepassing van warmteterugwinning (indien aanwezig), wordt bij deze methode gekozen de warmtevraag vóór de toepassing van WTW te bepalen. De warmteterugwinning wordt apart beschouwd als een component met eigen inputs en outputs, waardoor de verliezen van de woning en de warmteterugwinning afzonderlijk worden gekwantificeerd. Indien de warmtevraag ná toepassing van warmteterugwinning wordt berekend, resulteert dit in een verminderde warmtevraag en een elektriciteitsvraag. Aangezien de verliezen van de woning én de warmteterugwinning hier beide aan de component “woning” worden toegekend, zou niet inzichtelijk kunnen worden gemaakt waar de verliezen precies plaatsvinden.

Componenten voor energielevering (afgifte, conversie, opslag en distributie)

Uitgangspunt voor deze analysemethode is om installaties die in de bouwpraktijk als één eenheid worden beschouwd, als component te beschouwen met inputs en outputs. Hierbij wordt ook grotendeels aangesloten bij de opbouw van TRNSYS. Alle verliezen binnen een installatie worden aan deze installatie toegekend. In werkelijkheid kunnen deze componenten bestaan uit verschillende processen, zoals compressie, verbranding en warmte-overdracht. De analyse van al deze processen binnen een installatie wordt in eerste instantie buiten beschouwing gelaten, omdat hierdoor het overzicht verloren gaat. Mogelijk kunnen installaties waar erg veel verliezen optreden nader worden onderzocht².

Het aantal mogelijke componenten voor energielevering is zeer groot en varieert van een distributieleiding tot een HR-ketel en van een elektriciteitscentrale tot een zonnecollector. In dit onderzoek zal de exergie-inhoud van inputs en outputs worden bepaald van een aantal veelvoorkomende componenten, zoals vloerverwarming, HR-ketel, een radiator, een warmtepomp en een zonnecollector én een aantal innovatieve, maar veelbelovende, installaties zoals een brandstofcel en een HRe-ketel. In de loop van het onderzoek zal blijken welke componenten dit zijn. Daarnaast zal het altijd mogelijk zijn het aanbod verder uit te breiden.

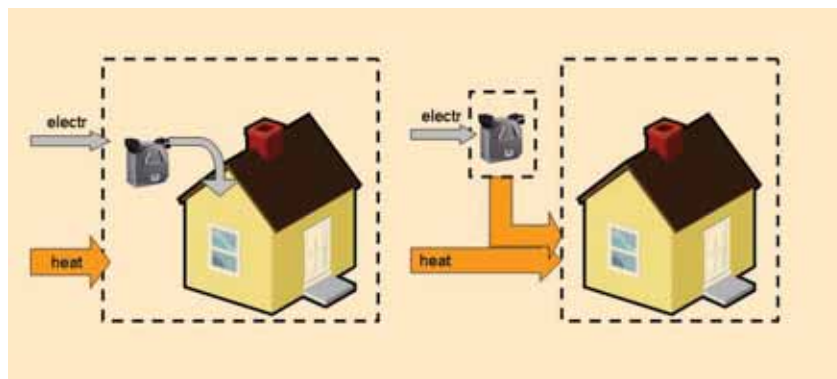
Energiebronnen

Er zijn verschillende soorten energiebronnen, zoals fossiele brandstoffen, geothermische energie, zonne- en windenergie. Van deze bronnen zal de exergie-inhoud worden bepaald met behulp van berekeningen of aan de hand van literatuur. In eerste instantie zal alleen worden gekeken naar de exergie-inhoud, dat wil zeggen de thermodynamische potentie van de bron. Op die manier kan worden bepaald hoe groot de verliezen zijn in de component die deze energiebron als input heeft. Eventueel kan ook een onderscheid worden gemaakt tussen duurzame en niet duurzame bronnen. Deze eigenschap is onafhankelijk van de thermodynamische potentie maar is van groot belang bij de uiteindelijke beoordeling van de wenselijkheid van het gebruik. Echter, dit is een zeer complex onderwerp – wat al blijkt uit de vele discussies over de duurzaamheid van bio brandstoffen – en wordt daarom voorlopig in dit onderzoek niet verder onderzocht.

GEPLANDE WEERGAVE VAN DE RESULTATEN

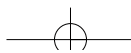
Voor de weergave van de resultaten wordt aangesloten bij de methode zoals ontwikkeld door [10] en [11]. Hierbij wordt per component het exergieverlies weergegeven, zoals te zien is in figuur 6. Het betreft hier alleen de energiestromen voor ruimteverwarming. Deze weergave maakt het mogelijk de exergieverliezen op één moment of de totale of gemiddelde exergieverliezen over een bepaalde periode weer te geven.

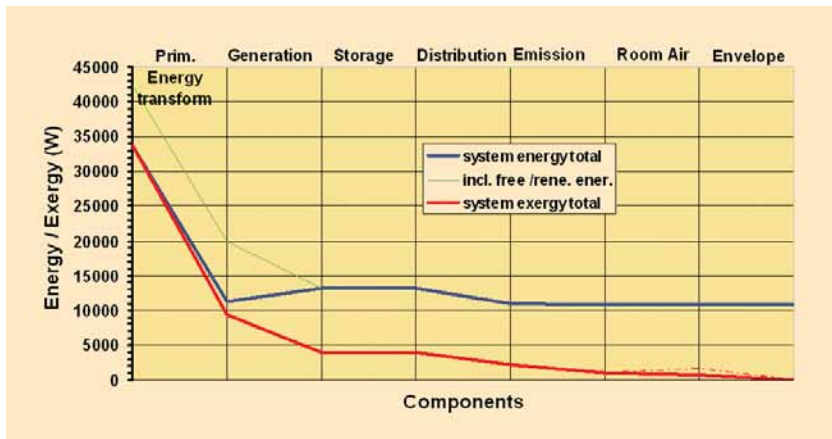
Om de exergieverliezen van de dynamische berekening te tonen zal aanvullend op deze weergave de exergie-input per component gedurende een geheel jaar worden weergegeven. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 6. Dit is een vereenvoudigd voorbeeld dat de resultaten weergeeft van een simulatie van een eengezinswoning (bouwkundige eigenschappen volgens de SenterNovem referentiewoning - tussenwoning [16]) met mechanische afzuiging, vloerverwarming en een warmtepomp (WP). De simulatie is uitgevoerd met TRNSYS, waarbij gebruik is gemaakt van de standaard componenten uit de TRNSYS-bibliotheek. Het betreft een voorbeeld



In de linker figuur wordt de warmteterugwinning binnen de grenzen van het gebouw geëvalueerd. De rechter figuur beschouwt de warmteterugwinning buiten de systeemgrenzen van het gebouw, waardoor de verliezen van de woning en de warmteterugwinning afzonderlijk worden gekwantificeerd.

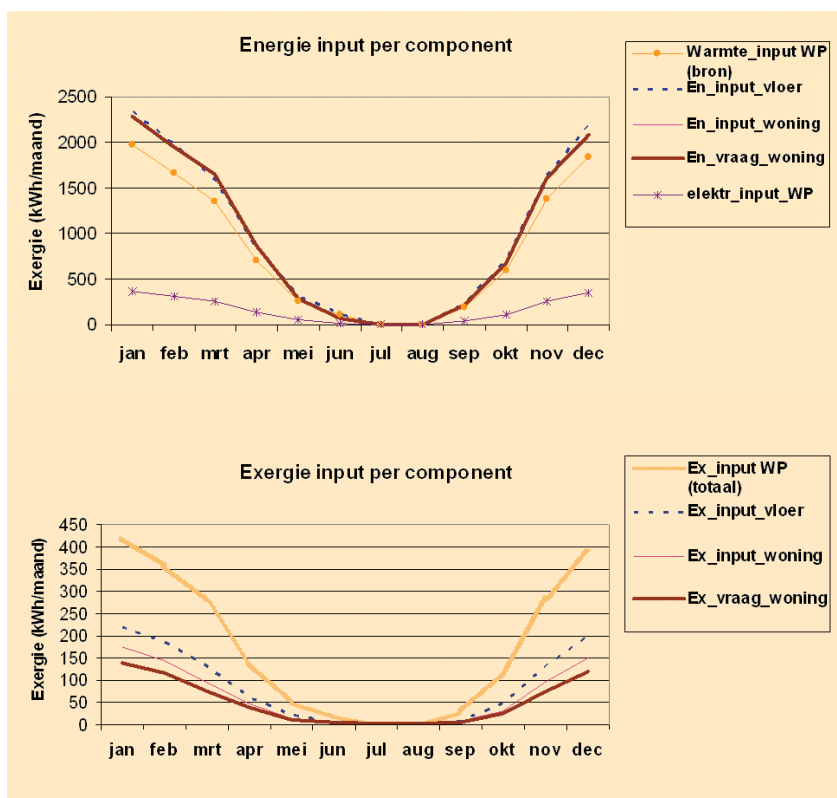
- FIGUUR 4 -





Weergave van de exergie verliezen per component zoals ontwikkeld door Shukuya [10] en Schmidt [11]

- FIGUUR 5 -



Weergave van de energie en exergie-input per component voor een vereenvoudigd verwarmingssysteem met vloerverwarming en een warmtepomp, gedurende een geheel jaar (let op verschillende schaal op de y-as).

- FIGUREN 6 EN 7 -

model, met eenvoudige aan-uit schakeling en een aantal vereenvoudigingen voor het gebruik, zoals een constante ventilatievoud en een constante binnentemperatuur. De simulatie is uitgevoerd in samenwerking met een afstudeerstudent aan de TU Delft, Arnaud Blom.

CONCLUSIES EN VERDER ONDERZOEK

Dit onderzoek beoogt bij te dragen aan de toepassing van exergieanalyse in de gebouwde omgeving door het beschikbaar maken van een semi-dynamische exergie analysemethode. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het bestaande energie analyseprogramma TRNSYS en de door [10] en [11] ontwikkelde aanpak voor analyse van exergie verliezen bij ruimteverwarming. Aanvullend op de bestaande exergie

analysemethoden is het doel dat deze methode algemeen toepasbaar is, de totale vraag in de beoordeling meeneemt en een semi-dynamische berekening maakt van zowel de vraag als van de exergie verliezen die in de componenten in het gehele energievoorzieningssysteem plaatsvinden.

De analysemethode zal verder worden uitgewerkt. Hierbij zullen de formules (verder) worden ontwikkeld voor het bepalen van de exergievraag en de exergie verliezen in een aantal componenten. Daarnaast wordt door de Universiteit Twente en de TU Eindhoven onderzoek gedaan naar financiële aspecten en thermisch comfort van LowEx energiesystemen, waarvan de resultaten in een later stadium zullen worden worden geïntegreerd in de analysemethode.

REFERENTIES

1. zie http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/
2. *Energie Onderzoek Subsidie: Lange Termijn* (http://www.senternovem.nl/eos/subsidies/eos_lt/Index.asp).
3. *European statistics*, (online), Available: Eurostat, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> (September 2007).
4. <http://www.senternovem.nl/energietransitie/>
5. IEA Annex 37: *Low Exergy Systems for Heating and Cooling* (1999-2003) (www.lowex.net).
6. IEA Annex 49: *Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities* (www.annex49.com).
7. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex51.htm>
8. Action C24: *COSTeXergy: Analysis and Design of Innovative Systems for Low-Exergy in the Built Environment*. (www.costexergy.eu).
9. Moran M.J., Shapiro H.N. 2005, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (5th Edition). John Wiley & Sons Inc. New York, USA.
10. Shukuya, M. and Hammache, A. 2002. *Introduction to the Concept of Exergy -for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems*, VTT Research Notes-2158, pp.1-41.
11. Schmidt D., (2003). *Design of Low Exergy Buildings - Method and a Pre-Design Tool; International*

- Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* Vol 3.
12. Itard L., (2005). *Implementation of exergy calculations in an existing software tool for energy-flow calculations in the early design stage*. Ninth International IBPSa conference, Montreal, Canada.
 13. Sakulpipatsin P., (2008). *Exergy Efficient Building Design*. Doctoral thesis Delft University of Technology.
 14. Asada, H. and Boelman, E.C. (2004) 'Exergy analysis of a low temperature radiant heating system', *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 25, No. 3, pp.197–209.
 15. Shukuya, M. 2008. *Exergy concept and its application to the built environment*. *Building and Environment*. Vol. xxx. pp.1-6.
 16. http://www.senternovem.nl/epn/referentiewoningen/referentiewoningen_nieuwbouw.asp

NOTEN

¹ In de gebouwde omgeving wordt het woord component vaak gebruikt, terwijl in de werktuigbouwkunde het woord component voor kleinere eenheden wordt gebruikt. Om aan te sluiten bij het berekeningsprogramma TRNSYS en het exergieonderzoek van Schmidt [11], zal in dit project ook het woord component worden gebruikt.

² Statische exergie analyse van werktuigbouwkundige installaties is bijvoorbeeld mogelijk met het bestaande programma Cycle Tempo.



ECO

KETELSERVICE VERHUUR

Tijdelijk of semi permanent behoefte aan extra warmte en/of energie?
Uw bron van informatie bij het kopen of huren van ketelinstallaties voor stoom, warm en heet water.

Verhuur

- warmwaterketels tot 8 MW
- heetwaterketels tot 12 MW
- automatische expansie-inrichtingen
- stoomketelunits tot 28 barg van 400 kg/hr tot 16.000 kg/st
- ontgassers, voedingswatertanks, ontharders
- olietanks 3, 5, 10 en 20m³
- in container, buitenopstelling of romneyloodsen

Services

- 24 uren storingsdienst
- leidingwerkmontage
- onderhoud
- engineering

Milieuzorg

- Low-NOx installaties
- geluidsbesparende omhuizingen
- CE normering

www.ecotilburg.com

Postbus 899, 5000 AW Tilburg - Hectorstraat 23, 5047 RE Tilburg - Tel: 013 5839440 - Fax: 013 5358315 - E-mail: info@ecotilburg.com