

Toepassing van het exergieconcept op ventilatie met warmteterugwinning

De afvoerlucht van het ventilatiesysteem wordt bij balansventilatie gebruikt om de toevoerlucht voor te verwarmen, of als een warmtebron in andere ventilatiesystemen. Voor het terugwinnen van de warmte van de afvoerlucht is elektriciteit benodigd. Omdat de hoeveelheid elektriciteit die benodigd is relatief klein is ten opzichte van de hoeveelheid energie die wordt teruggewonnen, zijn dergelijke systemen vanuit energetisch oogpunt efficiënt. Een belangrijk aspect dat echter vaak over het hoofd wordt gezien, is het verschil in 'kwaliteit' tussen de hoogwaardige elektriciteit die benodigd is en de laagwaardigere thermische energie die wordt teruggewonnen.

- door ir. P. Sakulpipatsin, prof.ir. J.J.M. Cauberg*,
dr.ir. H.J. van der Kooi* en dr.eng. E.Boelman**

Exergie-analysen vormen een gebruikelijke basis voor evaluatie van verschillende vormen van energie (zoals thermisch en elektrisch), waarbij de mogelijkheden worden afgewogen om arbeid te produceren in relatie tot een gegeven omgeving [1; 2; 3]. Exergie geeft aan dat energie alleen 'neerwaarts' kan worden gebruikt tot het niveau dat wordt gegeven door de omgeving. In tegenstelling tot energie, is exergie geen onderwerp in milieubescherminswetten.

Dit artikel beschrijft stationaire energie- en exergie-analysen op een momentane en dagelijkse basis voor woningventilatiesystemen en warmtapwaterproductiesystemen. De afvoerlucht van het ventilatiesysteem wordt gebruikt voor het voorverwar-

men van het warmtapwater. De resultaten van de analyses voor het klimaatjaar De Bilt worden gebruikt bij de discussie over mogelijke ontwerpvarianten.

SYSTEEMBESCHRIJVING

Er worden twee types systemen onderzocht: woningventilatiesystemen en huishoudelijke warmwaterproductiesystemen.

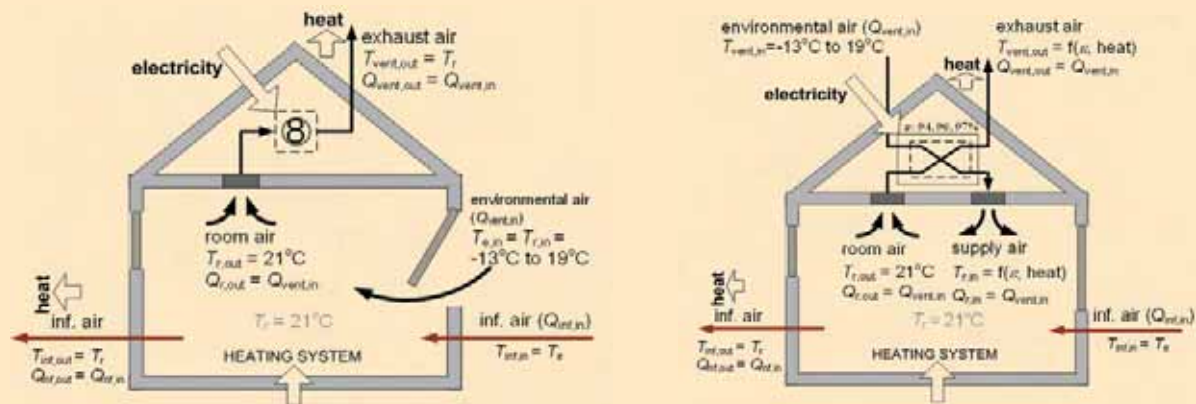
Ventilatiesystemen van woningen

De energie- en exergie-analysen voor de woningventilatiesystemen zijn gericht voor het ventilatiesysteem met mechanische afvoer en natuurlijke toevoer zonder warmteterugwinning (zie figuur 1a) en een gebalanceerd ventilatiesysteem met warmteterugwinning

(zie Figuur 1b). Het ventilatiesysteem met mechanische afvoer maakt gebruik van een DC-ventilator, Model: CVE ECO-fan 2 van Itho BV [4]. Het gebalanceerde ventilatiesysteem maakt gebruik van een DC warmteterugwinunit, Model: HRU ECO-fan 3 SB van Itho BV [5], deze bestaat uit twee DC ventilatoren en een warmtewisselaar met een hoge thermische efficiëntie ϵ . De thermische efficiëntie van de warmtewisselaar is berekend door de data van de fabrikant te interpoleren [4] in relatie tot de ventilatievouden (zie tabel 1). In figuur 1 worden de ventilatievouden en temperaturen van de luchtstromen door van ventilatie en infiltratie weergegeven voor de verschillende systemen. Luchtinfiltratie wordt eveneens meegenomen in de analyse.

In de energie- en exergie-analysen van de ventilatiesystemen wordt aangenomen dat de systemen stationair functioneren, daarnaast wordt er alleen gerekend met droge lucht. Het drukverschil tussen de lucht die het gebouw binnenkomt en de lucht die het gebouw verlaat wordt ook niet meegenomen in de berekening. De algemene rekenwaarden zijn weergegeven in tabel 2.

* Klimaatontwerp Groep, Bouwtechniek, Faculteit Architectuur, Technische Universiteit Delft, Vertaling van "Application of The Exergy Concept to Ventilation Using Heat Recovery from Exhaust Air", door ir. L. Schellen, promovenda bij de unit Building Physics & Systems van de TU Eindhoven.



Woningventilatiesystemen a) Ventilatiesysteem met mechanische afvoer en natuurlijke toevoer (links), b) Gebalanceerd ventilatiesysteem met warmteterugwinning (rechts).

- FIGUUR 1 -

Q_{vent} (m ³ /s)	ϵ (-)
0,063	0,94
0,042	0,96
0,028	0,97

De thermische efficiëntie ϵ versus de ventilatievouden Q_{vent} voor de DC HRU (links).

- TABEL 1 -

Parameters	Values
Air density (ρ_{air})	1,23 kg m ⁻³
Spec. heat capacity of air ($C_{p,air}$)	1.008 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Environmental air temperature (T_e)	from -13°C to 19 °C
Room air temperature (T_r)	21 °C
Ventilation airflow rates (Q)	0,028; 0,042; 0,063 m ³ /s

Algemene rekenwaarden (rechts). [6; 7]

- TABEL 2 -

Huishoudelijke warmwaterproductiesystemen

De warmtapwaterproductiesystemen maken gebruik van grondwater dat een constante temperatuur heeft (hiervoor wordt 13 °C aangenomen). Het tapwater komt de woning binnen met of zonder voorverwarming door de afvoerlucht van het woningventilatiesysteem dat in het geval van voorverwarming geschiedt door een warmtewisselaar of warmtepomp. De thermische efficiëntie ϵ van de warmtewisselaar en de prestatiecoëfficiënt COP van de warmtepomp worden aangenomen als respectievelijk 0,90 en 3,7. Er wordt aangenomen dat de energie-efficiëntie van de warmtapwater-voorverwarmingssystemen 1,0 bedraagt. De warmtapwatersystemen zijn in werking wanneer de temperatuur van de afvoerlucht van het ventilatiesysteem hoger is dan de maximale temperatuur tussen het toevoerwater en de omgeving (indien er gebruik wordt gemaakt van een warmtewisselaar) en hoger dan de maximale temperatuur van de omgeving (in het geval van een warmtepomp). De afvoerlucht van het ven-

Hour	Ventilation airflow rate Q_{vent} (m ³ /s)
0:00 - 8:00	0,028
8:00 - 9:00	0,042
9:00 - 17:00	0,063
17:00 - 18:00	0,042
18:00 - 24:00	0,028

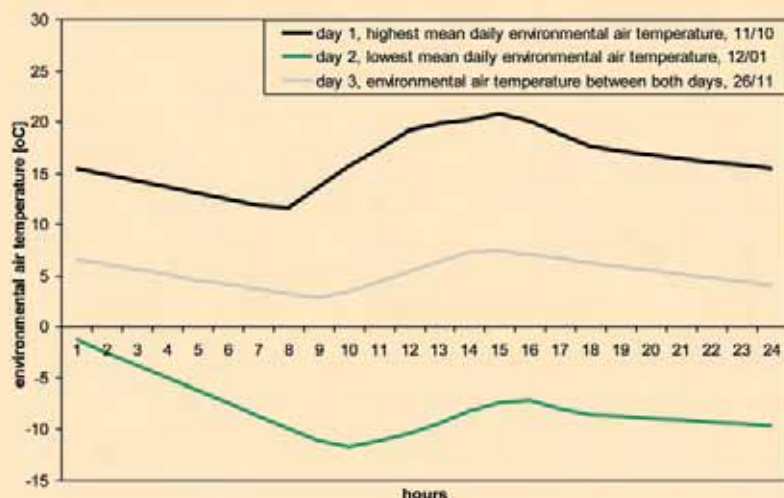
Uurlijks schema: het woningventilatiesysteem (links); en het warmtapwatergebruik (rechts).

- TABEL 3 -

Hour	Q_{DHW} (m ³ /s)	T_{DHW} (°C)
00:00 - 07:00	0	0
07:00 - 09:00	0,00001	65
09:00 - 18:00	0	0
18:00 - 20:00	0,00001	65
20:00 - 24:00	0	0

Benodigde elektriciteit P_e voor de DC-ventilator en de HRU versus de luchthoeveelheden door ventilatie Q_{vent} .

- TABEL 4 -



Uurlijkse buitentemperatuurprofielen gedurende drie winterdagen in De Bilt.

- FIGUUR 2 -

tilatiesysteem wordt gekoeld tot een temperatuur die overeenkomt met de thermische efficiëntie ε (in het geval van een warmtewisselaar) en tot een temperatuur die overeenkomt met de omgevingstemperatuur T_e (in het geval van een warmtepomp). De lucht- en waterdebieten worden constant aangenomen in de toevoer en afvoer. Binnen dit onderzoek worden stromingseffecten in het systeem eveneens niet meegenomen.

Dagelijkse temperatuurprofielen gedurende de winterdagen in De Bilt.

In Figuur 2 worden drie uurlijkse buitentemperatuurprofielen weergegeven voor winterdagen met maximale, minimale en tussenliggende gemiddelde buitenluchttemperaturen. De klimaatdata van De Bilt zijn verkregen uit de TMY2 weerdata [8].

Het ventilatiegebruik en het warmtapwatergebruik in de woning zijn voor deze drie dagen uurlijks geschematiseerd. Een overzicht hiervan is weergegeven in tabel 3.

ENERGIE- EN EXERGIE-ANALYSEN

De vergelijking van de ontwerpvarianten voor de combinatie tussen woningventilatie en huishoudelijke warmwaterproductie is gebaseerd op een berekening van de thermische energie- en de thermische exergiebehoefte. Deze behoeften komen voort uit de ventilatie- en infiltratie luchtstromingen in relatie tot de buitentemperatuur, en de elektriciteit die benodigd is voor de ventilatie-unit en

het voorverwarmingssysteem van het warmtapwater. De energie- en exergieanalyses zijn verricht op een momentane basis waarin T_e tussen $-13\text{ }^\circ\text{C}$ en $19\text{ }^\circ\text{C}$ lag, en op een dagelijkse basis voor de representatieve winterdagen (zie Figuur 2).

Energie- en exergiebehoefte voortkomend uit infiltratie

De luchtstroming door infiltratie Q_{inf} is berekend aan de hand van [9]. De hoeveelheid luchtstroming door infiltratie hangt af van het type ventilatiesysteem: een ventilatiesysteem met mechanische afvoer $Q_{inf,mc}$ (vergelijking 1) en een gebalanceerd ventilatiesysteem $Q_{inf,bv}$ (vergelijking 2).

$$Q_{inf,mc} = \left(\frac{q_{v10}}{500}\right) \left((A + BCv + D\Delta T)q_{v10}\right) \quad (1)$$

$$Q_{inf,bv} = 0,8 \left((A + BCv + D\Delta T)q_{v10}\right) \quad (2)$$

waarin q_{v10} (dm^3/s) het luchtdebiet door infiltratie is, uitgedrukt in een debiet qv met een drukverschil van 10 Pa. De windsnelheid op een referentiehoogte van 10 m boven de grond is v (m/s) en ΔT (K) is het temperatuurverschil tussen de ruimtelucht T_r en de buitenlucht T_e . A, B, C en D zijn de coëfficiënten voor turbulentie, beschutting, verdeling van de luchtdoorlatendheid over de omhulling van de woning en de temperatuur.

De volgende waarden zijn toegepast op het onderzoek: q_{v10} is $150\text{ dm}^3/\text{s}$ voor de woning met het ventilatiesys-

teem met mechanische afvoer en $80\text{ dm}^3/\text{s}$ voor de woning met het gebalanceerde ventilatiesysteem. A, B, C en D zijn respectievelijk 0,02, 0,25, 0,20 en 0,004. Deze waarden zijn bepaald voor woningen met een volume van 250 m^3 , een hoogte van 5,4 m en een normale beschutting. Uit de TMY2 weerdata zijn v , T_i en T_e vastgesteld [8].

De luchtdebieten door infiltratie Q_{inf} wordt gebruikt voor de berekening van de thermische energie- $En_{th,inf}$ (vergelijking 3) en de thermische exergiebehoefte $Ex_{th,inf}$ (vergelijking 4) die voortkomen uit luchtstromingen door infiltratie.

$$En_{th,inf} = \rho_{air} Q_{inf} C_{p,air} (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

$$Ex_{th,inf} = \rho_{air} Q_{inf} C_{p,air} (T_{out} - T_{in} - T_e \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right)) \quad (4)$$

waarin T_{out} en T_{in} respectievelijk de temperaturen zijn van de infiltratielucht die de woning verlaat en de lucht die de woning binnenkomt. Alle luchttemperaturen zijn in Kelvin.

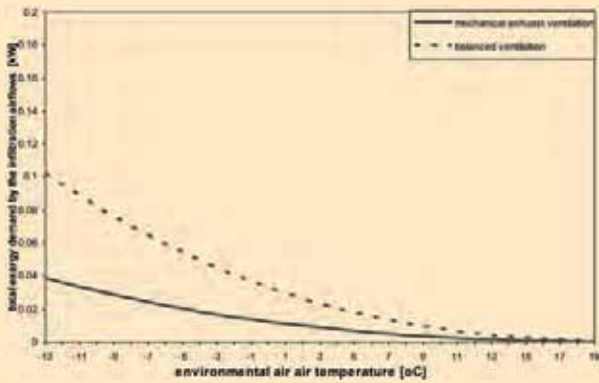
Energie- en exergiebehoefte door ventilatie

De energie- en exergiebehoefte door ventilatie zijn verkregen uit de thermische behoefte door ventilatie en de elektriciteit die benodigd is voor de ventilatie-unit.

De thermische energie- en exergiebehoefte door ventilatie zijn berekend door toepassing van vergelijkingen 3 en 4. De temperaturen van de toevoerlucht naar de woning T_{cin} voor het balansventilatiesysteem zijn berekend door gebruik te maken van de vergelijking die de effectiviteit van het warmtetransport van de warmtewisselaar beschrijft [ASHRAE, 1993] en de warmtebalansvergelijking. Hierbij werd aangenomen dat de hoeveelheid door de warmtewisselaar toegevoerde en afgevoerde lucht gelijk was.

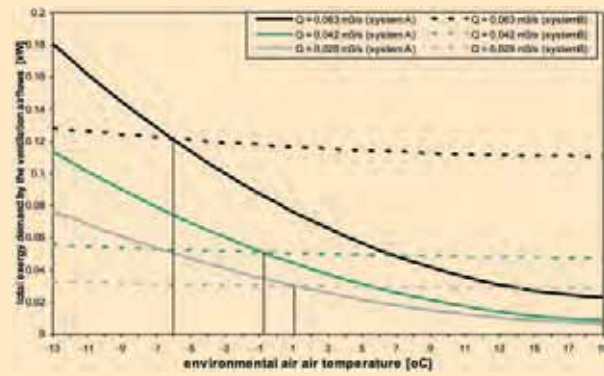
$$T_{r,in} = T_e + \varepsilon(T_r - T_e) \quad (5)$$

De benodigde elektriciteit is voor energie en exergie gelijk [11]. De elektriciteit Pe is berekend aan de hand van data van de fabrikant van de ventilator en de ventilatorwet [10], zie vergelijking 6.



De totale exergiebehoefte door infiltratie E_{xinf} versus T_e (links).

- FIGUUR 3 -



De totale exergiebehoefte door ventilatie E_{xvent} versus T_e (rechts).

- FIGUUR 4 -

$$Pe_1 = Pe_2 \left(\frac{\phi_2}{\phi_1} \right)^4 \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^3 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (6)$$

waarin ϕ de diameter van de ventilator is. De ventilatorwet wordt gebruikt voor het voorspellen van de prestatie van de ventilator indien er testdata beschikbaar zijn (data met onderschrift 2 in vergelijking 6). De testdata van de ventilatorfabrikant worden gebruikt [4; 5].

Energie- en exergiebehoeften door huishoudelijk warmwater

De thermische energie- en exergiebehoeften door de warmtapwaterstroming zijn functies van de warmtapwatertemperaturen die benodigd zijn voor toevoer naar de woning T_{DHW} (aangenomen wordt 65°C) en de voorverwarmde warmtapwatertemperatuur $T_{preheat}$. De behoeften zijn berekend door toepassing van vergelijkingen 3 en 4, waarbij de temperatuur van het toevoerwater T_w als referentietemperatuur wordt gebruikt. $T_{preheat}$ hangt af van de typen warmtapwater-voorverwarmingssystemen en wordt berekend aan de hand van vergelijking 7 (in het geval van een warmtewisselaar, $T_{preheat,ex}$) en vergelijking 8 (in het geval van een warmtepomp, $T_{preheat,hp}$).

$$T_{preheat,ex} = \varepsilon \frac{C_{min}}{C_w} (T_{vent,out} - T_{max}) + T_w \quad (7)$$

$$T_{preheat,hp} = \varepsilon \frac{C_{min}}{C_w} (T_{vent,out} - T_{max}) + T_w \quad (8)$$

waarin C_{min} de minimale waarde is voor de thermische capaciteiten tussen

de afvoerlucht van de woningventilatie en het toevoerwater, C_w is de thermische capaciteit van het toevoerwater en $C_{p,w}$ is de specifieke warmtecapaciteit van het toevoerwater ($4,19 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$). T_{max} is de maximale temperatuur tussen het toevoerwater en de omgeving. T_w is de temperatuur van het toevoerwater en $T_{c,out}$ is de temperatuur van de lucht die door het ventilatiesysteem wordt afgevoerd.

De elektriciteit die benodigd is voor de warmtepomp is berekend aan de hand van het verschil tussen de thermische energie die door de afgevoerde ventilatielucht wordt toegevoerd aan de warmtepomp en de thermische energie die door de warmtepomp wordt afgegeven aan het toevoerwater. Dit is gedaan omdat de energie-efficiëntie van het warmtepompproces aangenomen is als 1,0.

RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van de energie- en exergie-analysen van de woningventilatie en de warmtapwater-productiesystemen, zowel op momentane als op dagelijkse basis.

Totale exergiebehoeften door infiltratie en ventilatie

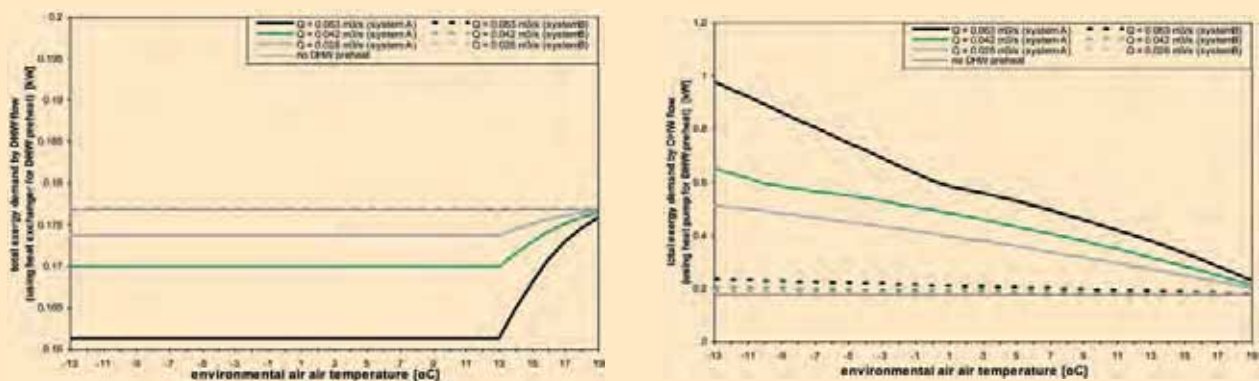
In Figuur 3 en 4 worden de totale exergiebehoeften door infiltratie E_{xinf} en door ventilatie E_{xvent} , als functie van de buitentemperatuur T_e weergegeven.

In Figuur 4 worden het ventilatiesysteem met mechanische afvoer en natuurlijke toevoer en het gebalanceerde afzuigstelsel respectievelijk systeem A en systeem B genoemd.

In Figuur 3 hebben de E_{xinf} -lijnen voor de ventilatiesystemen een niet-lineair verband met T_e . Deze zijn afhankelijk van de logaritmische term van de verhouding tussen de luchttemperaturen van de inlaat- en uitlaat-infiltratie (zie vergelijking 4), omdat wordt aangenomen dat E_{xinf} gelijk is aan $E_{xh,inf}$. In aanvulling hierop geldt dat de E_{xinf} -lijnen voor het gebalanceerde ventilatiesysteem met warmteterugwinning hoger liggen dan de lijnen die E_{xinf} representeren voor het afvoersysteem door de grotere geïnfiltreerde luchthoeveelheid in het hele bereik van T_e .

In figuur 4 neemt E_{xvent} af bij een gegeven Q_{vent} , wanneer T_e toeneemt van -13°C naar 19°C . De E_{xvent} -lijnen (geleidelijke lijnen) voor het ventilatiesysteem met mechanische afvoer, gebruik makende van een DC ventilator (DC-ventilatorlijn genoemd), zijn steiler dan de E_{xvent} -lijnen (gestippelde lijnen) voor het gebalanceerde ventilatiesysteem met warmteterugwinning door middel van de DC HRU (DC HRU-lijn genoemd). De DC HRU-lijnen zijn minder gevoelig binnen het bereik van T_e , omdat voor de DC HRU voornamelijk elektriciteit benodigd is, terwijl voor de DC-ventilator relatief gezien meer warmte benodigd is. De DC-ventilator vereist meer exergie bij een lage T_e , en relatief weinig exergie wanneer T_e stijgt richting de ruimtetemperatuur T_r . De benodigde elektriciteit voor de DC-ventilator en voor de DC HRU zijn weergegeven in Tabel 4.

De lijnen van de DC-ventilator en de lijnen van de DC HRU kruisen elkaar



Totale exergiebehoefte door de warmtapwaterstroom met voorverwarming door de afvoerlucht van het ventilatiesysteem, door respectievelijk de warmtewisselaar $Ex_{DHW,ex}$ (a, links) en de warmtepomp $E_{x,DHW,hp}$ versus T_e (b, rechts).

- FIGUUR 5 -

bij een bepaalde buitentemperatuur $T_{e,intersect}$ voor een gegeven Q_{vent} . Wanneer T_e groter is dan $T_{e,intersect}$ dan resulteert de gebruikmaking van het ventilatiesysteem met mechanische afvoer in een kleinere totale exergiebehoefte dan bij gebruikmaking van het gebalanceerde ventilatiesysteem met de DC HRU (bij een gelijke luchthoeveelheid). $T_{e,intersect}$ neemt toe wanneer de ventilatie werkzaam is bij een lagere Q_{vent} , omdat de benodigde hoeveelheid elektriciteit voor de DC HRU kleiner is.

Totale energiebehoeften door de huishoudelijke warmwaterstroom

In figuur 5 is de totale exergiebehoefte door de warmtapwaterstroom met voorverwarming door de afvoerlucht van het ventilatiesysteem, door respectievelijk de warmtewisselaar $Ex_{DHW,ex}$ (figuur 5a) en de warmtepomp $Ex_{DHW,hp}$ (figuur 5b), weergegeven in relatie tot T_e . Het ventilatiesysteem met mechanische afvoer en natuurlijke toevoer en het gebalanceerde ventilatiesysteem worden respectievelijk systeem A en B genoemd. De dunne lijnen geven de totale exergiebehoefte weer door de warmtapwaterstroom zonder voorverwarming. Deze lijnen dienen als referentie voor de vergelijking met $Ex_{DHW,ex}$ en $Ex_{DHW,hp}$.

In figuur 5a zijn de lijnen van $Ex_{DHW,ex}$ voor systeem B (gestippelde lijnen) nagenoeg congruent aan de referentielijn (geen voorverwarming van het warmtapwater), omdat de E_{nh} en E_{xth} van de afvoerlucht van het ventilatiesysteem heel klein zijn. De meeste hiervan zijn teruggewonnen in de HRU. De $Ex_{DHW,ex}$ -lijnen voor systeem

A (geleidelijke lijnen) zijn constant wanneer $T_e > T_w$, als gevolg van de aanname dat het warmtapwater wordt voorverwarmd totdat $T_{vent,out} = T_w$. Bovendien hangt $Ex_{DHW,ex}$ af van Q_{vent} . Voor systeem A, met de verschillende debieten $Q_{vent} = 0,063, 0,042$ en $0,028$ m³/s, is $Ex_{DHW,ex}$ respectievelijk 91,24 %, 96,06 % en 98,24 % van de Ex_{DHW} (geen voorverwarming van het warmtapwater) wanneer $T_e < T_w$. Indien geldt dat $T_e > T_w$, dan stijgt $Ex_{DHW,ex}$ doordat de energie en exergie van de afvoerlucht van het ventilatiesysteem afnemen.

In figuur 5b neemt $Ex_{DHW,hp}$ af wanneer T_e stijgt van -13 °C naar 19 °C of wanneer Q_{vent} afneemt. Bovendien, de $Ex_{DHW,hp}$ -lijnen voor systeem A (geleidelijke lijnen) zijn steiler dan de $Ex_{DHW,hp}$ -lijnen voor systeem B (gestippelde lijnen). Dit komt doordat er meer energie van systeem A wordt gebruikt in de voorverwarming van het warmtapwater. Dit kost meer elektriciteit, wat hoogwaardige energie is, voor de warmtepomp.

De $Ex_{DHW,hp}$ -lijnen voor systeem A (geleidelijke lijnen) hebben een niet constante helling in het bereik van T_e . Bij de kleinste helling (in dit geval $T_e > 0$ °C voor $Q_{vent} = 0,063$ m³/s) verwarmt de warmtepomp het tapwater tot een temperatuur lager dan T_{DHW} . Aanvullende warmte is dan vereist. Aan de andere kant, bij de steilere helling, zou de warmtepomp het warmtapwater kunnen verwarmen tot T_{DHW} door alleen gebruik te maken van elektriciteit. De $Ex_{DHW,hp}$ -lijnen voor systeem B (gestippelde lijnen) hebben slechts één helling in het bereik van

T_e , omdat de warmtepomp het warmtapwater niet kan verwarmen tot een temperatuur lager dan T_{DHW} .

De totale energie en totale exergiebehoeften door de woningventilatie en de huishoudelijke warmwater-productiesystemen gedurende winterdagen

In dit gedeelte worden voorbeelden van cumulatieve energie- en exergiebehoeften gepresenteerd voor De Bilt voor drie representatieve winterdagen (zie figuur 2). In figuur 6 zijn de behoeften van energie En en exergie Ex weergegeven van elke ontwerpvariant. Dit is op componentniveau gedaan in termen van warmte en elektriciteit (merk op dat de schalen in de figuren 6a en 6b niet gelijk zijn). De namen van de ontwerpvarianten bestaan uit een letter (A: het ventilatiesysteem met mechanische afvoer en natuurlijke toevoer; B: het gebalanceerde ventilatiesysteem met warmterugwinning) en een nummer (1: geen voorverwarming van het warmtapwater; 2: voorverwarming van het warmtapwater door middel van een warmtewisselaar; 3: voorverwarming door middel van een warmtepomp).

In Figuur 6a is optie B3 het meest energie-efficiënt om te gebruiken gedurende de winterdagen, omdat voor deze optie de minste energie En benodigd is in vergelijking tot de andere opties. De En van optie B3 in het ventilatie en infiltratie gedeelte hangt af van de omgeving. De energiebehoefte is het grootst op dag 2 en het kleinst op dag 1. Optie B3 bespaart 0,45 % van de En in de warmtapwater-productie van optie 1 (geen voor-

Hour	ventilation airflow rate Q_{vent} (m ³ /s)	electricity inputs P_e (W)
DC fan	0,028	6
	0,042	8
	0,063	22
DC HRU	0,028	28
	0,042	47
	0,063	110

Benodigde elektriciteit P_e voor de DC-ventilator en de HRU versus de luchthoeveelheden ten gevolge van ventilatie Q_{vent} .

- TABEL 5 -

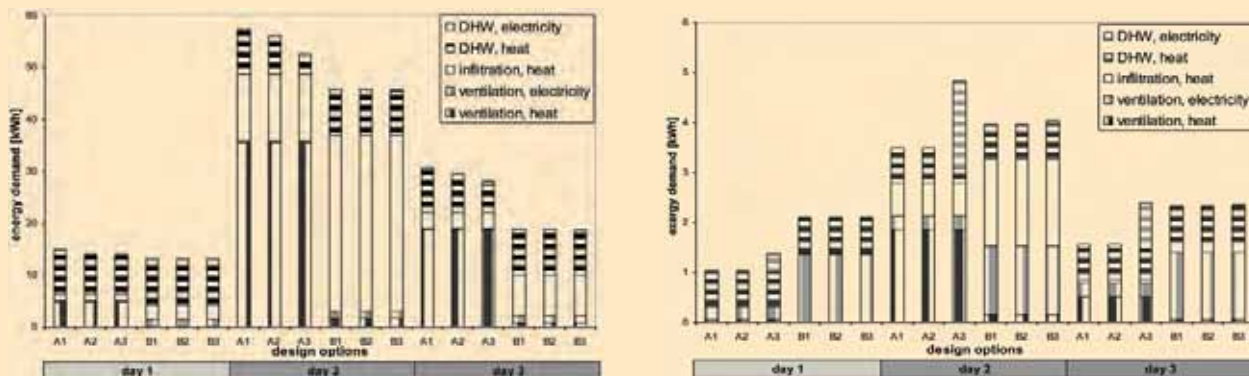
verwarming van het warmtapwater), omdat een geringe warmte van de afvoerlucht van het ventilatiesysteem wordt gebruikt voor het voorverwarmen van het warmtapwater. In figuur 6b is optie A2 het meest exergie-efficiënt gedurende de winterdagen, omdat deze optie in vergelijking met de andere onderzochte opties de minste exergie Ex vereist. In het gedeelte van de mechanische ventilatie is voor de opties A1-A3 meer thermische exergie benodigd dan voor de opties B1-B3, maar de benodigde elektrische exergie is veel geringer. In het gedeelte van de infiltratie is er voor de opties A1-A3 veel minder thermische exergie benodigd dan voor de opties B1-B3. In totaliteit is er in de gedeelten mechanische ventilatie en infiltratie minder totale exergie benodigd voor de opties A1-A3 dan voor de opties B1-B3. In het gedeelte van de warmtapwaterproductie is de Ex van optie A2 kleiner dan de behoefte van optie A1 (zonder voorverwarming van het warmtapwater). Echter, in hetzelfde gedeelte is de θ van opties A3

en B3 (met voorverwarming van het warmtapwater door middel van een warmtepomp) hoger dan de behoefte van optie A1 (zonder voorverwarming van het warmtapwater), vanwege de elektriciteit die benodigd is voor de warmtepomp. Dit komt doordat de warmtepomp elektriciteit nodig heeft voor het pompen van laagwaardige warmte. Desondanks bespaart optie A3 meer thermische exergie dan optie A2. De elektrische exergie die benodigd is voor de warmtepomp dient te worden gereduceerd. Daarnaast besparen opties B2 en B3 een zeer geringe hoeveelheid thermische exergie in de warmtapwaterproductie.

CONCLUSIE

Dit artikel presenteert stationaire energie- en exergie-analysen van woning-ventilatiesystemen en warmtapwaterproductiesystemen op momentane en dagelijkse basis. De analyseresultaten voor De Bilt zijn gebruikt voor de discussie over de ontwerpvarianten van de systemen.

Op momentane basis zijn de exergie-behoefte door infiltratie van het gebalanceerde ventilatiesysteem met warmteterugwinning hoger dan de exergiebehoefte van het ventilatiesysteem met mechanische afvoer (in het gehele bereik van buitentemperaturen). Dit geldt echter niet voor de exergiebehoefte door ventilatie, omdat de elektrische exergie die benodigd is voor de ventilatie-unit groot is en daardoor de totale exergiebehoefte overheersen. Wanneer de buitentemperatuur nabij de ruimtetemperatuur ligt, zijn de exergiebehoefte door ventilatie voor het gebalanceerde ventilatiesysteem met warmteterugwinning lager dan de exergiebehoefte van het ventilatiesysteem met mechanische afvoer. In het warmtapwaterproductiegedeelte wordt er een kleine hoeveelheid van de exergiebehoefte van de warmtapwaterproductie bespaard dankzij een kleine hoeveelheid warmte van de lucht, wanneer er gebruik wordt gemaakt van de warmtewisselaar voor de voorverwarming van het warmtapwater (warmteterug-




Energiebehoefte (a, links) en exergiebehoefte (b, rechts) van de ontwerpmogelijkheden.

- FIGUUR 6 -

winning uit de afvoerlucht van het gebalanceerde ventilatiesysteem). Het voorverwarmen van het warmtapwater met de afvoerlucht van het ventilatiesysteem met mechanische afvoer is beter door de grotere hoeveelheid warmte. De warmtapwaterproductie met voorverwarming van het warmtapwater door gebruikmaking van een warmtepomp vereist meer exergie dan de warmtapwaterproductie zonder voorverwarming, omdat de warmtepomp elektriciteit nodig heeft voor het pompen van laagwaardige warmte. De exergie van de elektriciteit die benodigd is voor de warmtepomp is groter dan de exergie van de warmte die teruggewonnen wordt bij de voorverwarming van het warmtapwater.

Gedurende de winterdagen zijn, op dagelijkse basis, de totale energiebehoeften het laagst van het gebalanceerde ventilatiesysteem en de warmtapwaterproductie met voorverwarming met een warmtepomp door de afvoerlucht van het ventilatiesysteem. Voor de totale exergiebehoeften is dit niet het geval. De totale exergiebehoeften

worden in belangrijke mate bepaald door de exergie van de elektriciteit die benodigd is voor de warmteterugwinunit en de warmtepomp. 

REFERENTIES

1. Asada, H and Boelman, E C. 2004. *Exergy analysis of a low temperature radiant heating system. Building Services Engineering Research and Technology*. Vol. 25 (3), pp 197-209.
2. Wall, G. 1990. *Exergy Needs to Maintain Real Systems Near Ambient Conditions*, Proceedings of the Florence World Energy Research Symposium, Florence, Italy, pp261-270.
3. Rosen, M A. and Dincer, I. 2001. *Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development*. The International Journal of Exergy. Vol. 1, pp 3-13.
4. Itho bv. 2005a. *Afzuigunit CVE 166 - Technische documentatie*. <http://www.itho.nl/> (in dutch).
5. Itho bv. 2005b. *Warmteterugwinunit HRU ECO-fan 3 - Technische documentatie*. <http://www.itho.nl/> (in dutch).
6. CEN. 2000. *EN12524 - Building materials and products – Hygrothermal properties – tabulated design values*. Brussels: European Committee for Standardisation.
7. CEN. 2005. *EN15251 - Criteria for the Indoor Environment including thermal, indoor air quality, light and noise*. Brussels: European Committee for Standardisation.
8. NREL. 1995. *User's Manual for TMY2s (Typical Meteorological Years)*, NREL/SP-463-7668, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
9. NEN 2867. 1989. *Air leakage of dwellings – Requirements*. Delft: Nederlandse norm-NEN (in dutch).
10. ASHRAE. 1993. *1993 ASHRAE handbook fundamentals*, SI ed., Atlanta: ASHRAE.
11. Moran, M J. 1989. *Availability Analysis - a guide to efficient energy use*. New York: ASME Press.



CHRIST
Clean Water Technology Group

Je doet het niet in je "eendje"

Bij **CHRIST HOLLAND Waterbehandeling** staan wij voor

- Kwaliteitsproducten
- Ontwerp & Projectmanagement
- Productie
- Montage
- Inbedrijfstelling
- Validatie
- After Sales Service
- (24 uur) Service & Onderhoud



Dat doe je echt niet in je "eendje"

CHRIST HOLLAND B.V.
Energieweg 5
2382 NA Zoeterwoude

Tel. 071 - 580 02 18
www.christ.nl
sales@christ.nl

compleet vernieuwd ontwerp

verwarmde sensor voor relatieve vochtigheid



Rense Instruments

PC523/xH verwarmde %RV sensor
speciaal ontworpen voor omgevingen met hoge %relatieve vochtigheden of dauwpuntcondities

- chip voor %RV sensor + verwarming Pt100
- tegelijk nauwkeurige temperatuursensor
- optimale thermische koppeling
- excellente lineariteit
- bestand tegen dauwpunt

Vraag om meer informatie of een offerte!

SENSOR DATA

postbus 1111 2280 cc rijswijk tel 070 3070736 fax 0703070938 info@sensordata.nl www.sensordata.nl