

2014•2015
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Analyse en optimalisatie van een hybride warmtepompsysteem

Promotor :
ir. Brecht BAETEN
ir. Frederik ROGIERS

Dries Nackaerts

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015
Faculteit Industriële
ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Analyse en optimalisatie van een hybride
warmtepompsysteem

Promotor :
ir. Brecht BAETEN
ir. Frederik ROGIERS

Dries Nackaerts
*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: energie*

Woord vooraf

Onderzoek naar duurzame en ecologische technologieën is heel belangrijk met oog op verbetering van het milieu. Het is me dan ook een genoegen om voor een heel klein deel uit te maken van dit onderzoek. Het grotere plaatje in deze masterproef is dus duurzaamheid en dit is ook een heel grote motivatie geweest door het jaar heen. Het grootste deel van de masterproef bestond uit het maken van Matlab-scripts. Echter was mijn Matlab-kennis behoorlijk minimaal maar mijn promotor ir. Brecht Baeten heeft me hier heel goed in begeleid. Daarom zou ik hem dus willen bedanken voor zijn zorgvuldige begeleiding. Verder wil ik ook nog Joost Berckx (Bosch Thermotechnology nv/sa) bedanken om mijn vragen rond hun hybride warmtepompsysteem met de nodige professionaliteit te behandelen. Wie ook niet mag ontbreken in dit dankwoord is mijn broer ir. Toon Nackaerts, die me in het begin heeft kunnen helpen met Matlab. Ook dank ik mijn vriendin Joke Peeters om me te steunen tijdens de moeilijke en stresserende periodes tijdens deze masterproef. Als laatste dank ik mijn ouders voor de kans om mijn kennis en vaardigheden te kunnen ontwikkelen tijdens de opleiding tot industrieel ingenieur.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract.....	9
1 Inleiding.....	12
1.1 Situering.....	12
1.2 Probleemstelling.....	12
1.3 Doelstellingen	13
2 Hybride warmtepompsysteem	15
2.1 Inleiding.....	15
2.2 Warmtepomp	15
2.2.1 <i>Het principe</i>	15
2.2.2 <i>De thermodynamica van een warmtepomp</i>	16
2.2.3 <i>Mechanische onderdelen van een lucht/water warmtepomp</i>	20
2.3 Gascondensatieketel	22
2.3.1 <i>Verbrandingswaarde aardgas</i>	23
2.4 Waarom hybride warmtepompsysteem	24
2.4.1 <i>Seasonal Performance Factor</i>	24
3 Systeemidentificatie van een ééngeswoning.....	25
3.1 Meetdata.....	25
3.1.1 <i>Correctiefactor elektriciteits- en gasverbruik</i>	25
3.1.2 <i>Warmtewinsten van de gascondensatieketel</i>	26
3.2 Werkwijze.....	27
3.2.1 <i>Model opstellen</i>	27
3.2.2 <i>COP modellering</i>	28
3.2.3 <i>Identificatie</i>	29
3.2.4 <i>Grenzen van de modelparameters kiezen</i>	29
3.2.5 <i>Cross validatie</i>	30
3.3 Thermisch modelleren van een ééngeswoning	30
3.3.1 <i>Model met één enkele zone</i>	30
3.3.2 <i>Model met één enkele zone met vloerverwarming</i>	32
3.3.3 <i>Model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern gesplitst</i> .	34
3.3.4 <i>Conclusie</i>	37
4 Simulatie.....	39
4.1 Werkwijze.....	39
4.1.1 <i>Veronderstellingen</i>	39
4.1.2 <i>Regeling</i>	39
4.2 Resultaten.....	45
4.2.1 <i>Simulatie van een eengezinswoning met warmtepomp</i>	45
4.2.2 <i>Simulatie van een eengezinswoning met gascondensatieketel</i>	46
4.2.3 <i>Simulatie van een eengezinswoning met hybride warmtepompsysteem</i>	47
4.2.4 <i>Simulatie met een lagere gewenste temperatuur</i>	48
4.2.5 <i>Conclusie</i>	50
5 Life Cycle Analysis (LCA)	51
5.1 LCA vergelijking warmtepomp, gascondensatieketel en hybride warmtepompsysteem	51
5.1.1 <i>Doel en scope</i>	51

5.1.2	<i>Inventarisatie van de levenscyclus</i>	52
5.1.3	<i>Impact analyse (LCIA)</i>	56
5.1.4	<i>Interpretatie</i>	66
5.2	Conclusie	68
6	Conclusies	69
	Literatuurlijst	71

Lijst van tabellen

<i>Tabel 1: Life Cycle Inventory (LCI) van een warmtepomp 15 kW.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabel 2: Life Cycle inventory (LCI) van een gascondensatieketel 15 kW.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabel 3: Life Cycle inventory (LCI) van een hybride warmtepompsysteem 15 kW.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabel 4: LCIA resultaten voor de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 1.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabel 5: LCIA resultaten voor de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 2.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabel 6: LCIA resultaten voor de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 3.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabel 7: LCIA resultaten voor de gascondensatieketel.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabel 8: LCIA resultaten voor het hybride warmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 1.</i>	<i>63</i>
<i>Tabel 9: LCIA resultaten voor het hybride warmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 2.</i>	<i>64</i>
<i>Tabel 10: LCIA resultaten voor het hybride warmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 3.....</i>	<i>65</i>

Lijst van figuren

fig. 1: Principe van een koelkast (a) en van een warmtepomp (b).	15
fig. 2: Ts-diagram van het carnotproces	16
fig. 3: Principe van de dampcompressiecyclus.	18
fig. 4: Ts-diagram van de dampcompressiecyclus	19
fig. 5: Illustratie van een lucht gedreven warmtepomp met de buiteneenheid (links) en de binneneenheid (rechts).	20
fig. 6: Buiteneenheid.	21
fig. 7: Illustratie van een lucht gedreven warmtepomp in een woning.	21
fig. 8: Principe van een gascondensatieketel	22
fig. 9: Rendementwinst door condensatie in een gascondensatieketel.	23
fig. 10: Staafdiagram met boven dag-, nacht- en totaal elektriciteitsverbruik en gasverbruik. En onder de correctiefactoren op deze energieverbruiken.	26
fig. 11: De originele gasmeting boven en onder de gefilterde gasmeting.	27
fig. 12: Onbewerkt COP-model	28
fig. 13: Bewerkt COP-model.	29
fig. 14: Model met één enkele zone.	30
fig. 15: Identificatie van het model met één enkele zone.	31
fig. 16: Model met één enkele zone met vloerverwarming.	32
fig. 17: Identificatie van het model met één enkele zone met vloerverwarming.	33
fig. 18: Model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern opgesplitst.	34
fig. 19: Identificatie van het model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern opgesplitst.	35
fig. 20: Cross validatie van het model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern opgesplitst.	36
fig. 21: Cross validatie, voorbeeld afwijkende factoren (geopend deur of raam vermoedelijk).	37
fig. 22: Gekozen model voor een eengezinswoning na identificatie en cross validatie.	37
fig. 23: Stooklijn van een verwarmingsregeling mt de vier instelparameters.	40
fig. 24: Simulatie van 5 dagen met $dQdT$ gelijk aan één derde van het maximale vermogen.	42
fig. 25: Simulatie van 5 dagen met $dQdT$ gelijk aan het maximale vermogen (warmtepomp).	42
fig. 26: Simulatie van 5 dagen met $dQdT$ gelijk aan het maximale vermogen (gascondensatieketel).	43
fig. 27: Simulatie van 5 dagen met $dQdT$ gelijk aan het maximale vermogen (hybride).	43
fig. 28: Relatieve kost functie met de bivalente temperatuur.	44
fig. 29: Buitentemperatuur en de zonneprijzen voor bepaling van de verwarmingsperiode.	45
fig. 30: Simulatie met warmtepomp, $T_{\text{gewenst}} = 21^{\circ}\text{C}$ (maand maart weergegeven).	46
fig. 31: Simulatie met gascondensatieketel, $T_{\text{gewenst}} = 21^{\circ}\text{C}$ (maand maart weergegeven).	47
fig. 32: Simulatie met hybride warmtepompsysteem, $T_{\text{gewenst}} = 21^{\circ}\text{C}$ (maand maart weergegeven).	47
fig. 33: Verloop van het gasverbruik i.f.v. de gewenste temperatuur voor de drie besproken systemen.	49
fig. 34: De buitentemperatuur over een heel jaar met de bivalente temperatuur.	50
fig. 35: Elektriciteitspark 1.	53
fig. 36: Elektriciteitspark 2.	53
fig. 37: Elektriciteitsproductie in België 2013.	53
fig. 38: Overzichtsschema van de LCIA-methode "eco-indicator 99".	57
fig. 39: Overzicht van alle processen tijdens de levensloop van een warmtepomp.	57
fig. 40: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een warmtepomp (electriciteitspark 1).	58
fig. 41: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een warmtepomp (electriciteitspark 2).	59
fig. 42: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een warmtepomp (electriciteitspark 3).	59
fig. 43: Overzicht van alle processen tijdens de levensloop van een gascondensatieketel.	60
fig. 44: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een gascondensatieketel.	61
fig. 45: Overzicht van alle processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem.	61
fig. 46: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem (electriciteitspark 1).	63

<i>fig. 47: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem (elektriciteitspark 2).</i>	64
<i>fig. 48: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem (elektriciteitspark 3).</i>	65
<i>fig. 49: Single score indicator met elektriciteitspark 1.</i>	66
<i>fig. 50: Single score indicator met elektriciteitspark 2.</i>	66
<i>fig. 51: Single score indicator met elektriciteitspark 3.</i>	67
<i>fig. 52: Single score indicator, vergelijking tussen de drie elektriciteitsparken.</i>	67

Abstract

Het verwarmen van woningen gaat gepaard met een grote CO₂-uitstoot. Om deze uitstoot te reduceren is er nood aan duurzame technologieën. M.b.v. een warmtepomp kan men de CO₂-uitstoot drastisch terugdringen. Echter door de slechte COP (coefficient of performance) in koude omstandigheden is het veel aantrekkelijker om een warmtepomp te combineren met een gascondensatieketel. Dit noemt men een hybride warmtepompsysteem.

M.b.v. een equivalent model kan men het thermisch gedrag van een eengezinswoning identificeren. Hiermee onderzoekt men dan de mogelijkheden van een hybride warmtepompsysteem als verwarmingsinstallatie. M.b.v. simulaties kan het energieverbruik van dergelijk systeem geanalyseerd worden. En om de milieu-impact van een hybride warmtepomp te analyseren kan er een Life Cycle Analysis worden uitgevoerd.

Bij de systeemidentificatie is het belangrijk om juiste grenzen te kiezen voor de modelparameters. Zo vermijdt men dat verkeerde parameters worden geïdentificeerd. Uit de simulaties blijkt dat de instelling van de verwarmingsregeling een grote invloed heeft op het energieverbruik. Een goede regeling is dus belangrijk om het verbruik te minimaliseren. Het verbruik van de gascondensatieketel hangt af van de warmtevraag. Door de warmtevraag te beperken (bv. lagere gewenste temperatuur) kan het gasverbruik minimaal zijn.

Afhankelijk in welke omstandigheden een hybride warmtepompsysteem gebruikt wordt kan het een duurzaam verwarmingsysteem zijn. Zo heeft een hoge gewenste temperatuur een negatief effect op de duurzaamheid.

Abstract in english

Domestic heating leads to great carbon dioxide emissions. In order to reduce these emissions there is a great need for sustainable technologies. With a heat pump it is possible to reduce these emissions. Though due to low COP (coefficient of performance) in cold conditions it is better to combine a heat pump with a condensing boiler. This system is called a hybrid heat pump.

With an equivalent model it is possible to identify the thermal behavior of a dwelling. The possibilities of a hybrid heat pump, as a heating system, can be investigated with this model. Using simulations, the energy consumption of this system can be analysed. A Life Cycle Analysis analyses the environmental impact of a hybrid heat pump.

Choosing good limits for the model parameters is important during the model identification, avoiding wrong parameters to be identified. After simulations it appears that the heating regulation's settings have great influence on the energy consumption. Good settings therefore result in minimizing the consumption. The consumption of the condensing boiler depends on the desired heating value. Reducing the desired heating value (lower desired temperature) causes the gasconsumption to be minimal.

The sustainability of a hybrid heat pump depends on the user and the conditions where the system is installed. A high desired temperature has a negative effect on the sustainability.

1 Inleiding

1.1 Situering

De verwarming van onze woningen en kantoren zorgt ervoor dat we als mens in een comfortabele omgeving kunnen leven en werken. Ongeveer 30 % van onze totale energieconsumptie gaat naar de energievoorziening in onze gebouwen (zowel residentieel als professioneel) en ongeveer de helft hiervan wordt gebruikt voor de verwarming van deze gebouwen [1]. Om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, en zo de opwarming van de aarde tegen te gaan, is er nood aan betere en duurzamere technologieën om onze gebouwen comfortabel te verwarmen [2]. Een voorbeeld hiervan is gebruik maken van een warmtepompsysteem i.p.v. een conventionele gasverwarming, dit omdat een conventionele gasverwarming zorgt voor een significante CO₂-uitstoot.

Een warmtepomp is een thermodynamisch toestel dat warmte pompt van een lage temperatuur naar een nuttige ruimte, op hoge temperatuur. In deze masterproef wordt er gebruik gemaakt van een luchtgedreven warmtepomp, waarbij de omgevingslucht het warmtereservoir is. Bij lage temperaturen is het rendement van een dergelijk warmtepompsysteem teleurstellend (de efficiëntie van deze warmtepomp is afhankelijk van de buitentemperatuur). Om de totale efficiëntie van het systeem te verhogen gebruikt men een hybride systeem, de combinatie van een warmtepomp en gascondensatieketel [3].

1.2 Probleemstelling

Het hybride warmtepompsysteem kan efficiënter en goedkoper gebruikt worden in combinatie met de thermische opslagcapaciteit van het gebouw, wat inhoudt dat er thermische energie wordt opgeslagen in het gebouw. Voor de regeling van zo'n systeem is een vereenvoudigd model van het gebouw en het verwarmingssysteem nodig. Dit model moet de thermische eigenschappen van het gebouw zo goed mogelijk weergeven. Welke type model kan de thermische eigenschappen van de woning zo goed mogelijk identificeren? Voor de identificatie is er meetdata van het gebouw ter beschikking. Welke metingen zijn dus noodzakelijk om het model te identificeren?

1.3 Doelstellingen

Het doel van deze masterproef is om het thermisch gedrag van een eengezinswoning waarop een hybride warmtepompsysteem is aangesloten te identificeren. Dit a.d.h.v. metingen in de desbetreffende woning. A.d.h.v. dit thermisch gedrag kan dan een geschikt model worden opgesteld. Met dit model kunnen dan simulaties worden uitgevoerd met als doel kamertemperatuur en verbruik te voorspellen met als input gewenste temperatuur alsook de weersomstandigheden. Zo is het mogelijk om enerzijds het nut van een hybride warmtepompsysteem te analyseren (verbruik, emissies, ...) alsook de mogelijkheden van thermische energieopslag. Dit om het elektriciteitsnet meer flexibiliteit te kunnen bieden [4], [5].

De focus in deze masterproef ligt dus vooral op duurzaamheid. Het is dan ook aan te raden om de duurzaamheid van de gebruikte technologieën in vraag te stellen. Om een antwoord te bieden op deze vraag kan men de warmtepomp en gascondensatieketel, maar vooral het hybride warmtepompsysteem analyseren a.d.h.v. een Life Cycle Analysis (LCA).

2 Hybride warmtepompsysteem

2.1 Inleiding

De masterproef handelt over het thermisch modelleren van een eengezinswoning, en deze woning is gekoppeld met een hybride warmtepompsysteem. Een hybride warmtepompsysteem bestaat enerzijds uit een warmtepomp en anderzijds een gascondensatieketel. Hieronder wordt er dieper in gegaan op de werking van deze twee verwarmingstechnologieën. Daarna wordt de reden geanalyseerd waarom een hybride warmtepompsysteem wordt gebruikt.

2.2 Warmtepomp

Een warmtepomp is een thermodynamisch toestel dat volgens hetzelfde principe werkt als een koelkast, nl. de thermische motor. D.m.v. toegevoerde arbeid kan men warmte onttrekken van een koud reservoir en deze afgeven aan een heet warmtereservoir [6]. Het principe wordt in de volgende paragraaf in detail besproken. Daarna komen de thermodynamische eigenschappen van een warmtepomp aan bod en als laatste de mechanische aspecten van een warmtepomp.

2.2.1 Het principe

Om warmte op te nemen bij lage temperatuur en deze terug af te geven op hoge temperatuur is er arbeid nodig. Dit principe wordt geïllustreerd in fig. 1.

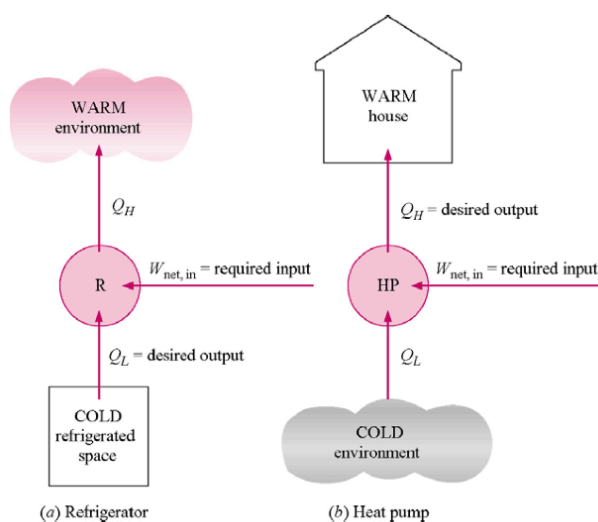


fig. 1: Principe van een koelkast (a) en van een warmtepomp (b) [7].

Men beschikt over een koud reservoir met temperatuur T_L en een warm reservoir met temperatuur T_H . Door middel van de toegevoerde arbeid $W_{in,netto}$ wordt er een warmte Q_L onttrokken van het koude reservoir. En vervolgens wordt er warmte afgegeven aan het warm reservoir, $Q_H (=Q_L+W_{in,netto})$ [7]. Dit noemt men de koelcyclus (warmtepomp en koelmachines werken op hetzelfde principe).

De koelcyclus is wat men noemt een negatief kringproces. In fig. 1 is links het principe van de koelmachine geïllustreerd en rechts het principe van de warmtepomp. Voor alle duidelijkheid het principe is hetzelfde maar het doel is verschillend nl. een koelmachine wilt een koude ruimte koud houden en een warmtepomp wilt een warme ruimte warm houden. Het doel bij de warmtepomp is dus het warme reservoir, bij de koelmachine is dit het koude reservoir.

In de volgende paragraaf wordt de thermodynamica van een warmtepomp toegelicht.

2.2.2 De thermodynamica van een warmtepomp

2.2.2.1 Carnot cyclus

De carnotcyclus is een ideaal kringproces uit de thermodynamica. Het is een reversibel proces (reversibel = omkeerbaar) [6]. M.a.w. het is een theoretisch kringproces waarop zowat alle kringprocessen zijn gebaseerd. Hieronder is het Ts-diagram van het omgekeerde carnotproces te zien (fig. 2).

De verschillende processtappen zijn:

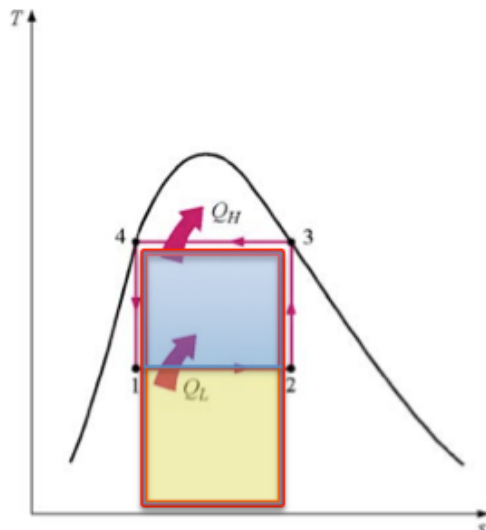


fig. 2: Ts-diagram van het carnotproces [7].

- 1→2: isotherme warmtetoevoer
- 2→3: adiabatische compressie
- 3→4: isotherme warmteafvoer
- 4→1: adiabatische expansie

2.2.2.2 Carnotrendement

De reden waarom men het carnotproces bestudeert is om het theoretische rendement (zonder irreversibiliteiten) te kunnen bepalen. Bij warmtepompen spreekt men niet van een rendement maar van een “coefficient of performance”, de COP. De efficiëntie van een toestel wordt beschreven als de gewenste output in verhouding met de nodige input om dit te bekomen. In het geval van de warmtepomp is de gewenste output de warmte Q_H (die gebruikt wordt om de woning te verwarmen). Voor een koelmachine is dit Q_L . De nodige input hiervoor is de arbeid toegevoegd aan de compressor, nl. $W_{in,netto}$ [7].

$$COP = \frac{Q_H}{W_{in,netto}} \quad (1)$$

Van stap 2 naar stap 3 wordt er arbeid toegevoerd aan het proces, te definiëren m.b.v. de eerste hoofdwet. Deze grootheden zijn grafisch geïllustreerd in fig. 2. De warmte Q_H stelt het rode vierkant voor en Q_L is het gele vierkant. Het verschil van deze twee geeft de arbeid, het blauwe vierkant:

$$W_{in,netto} = Q_H - Q_L \quad (2)$$

Hier kan dan de COP uitgehaald worden:

$$COP = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \quad (3)$$

De warmtestromen kunnen gedefinieerd worden met de tweede hoofdwet:

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (4)$$

De warmtestromen in het carnotproces gebeuren isotherm, zie fig. 2. Dit wil zeggen dat T_1 gelijk is aan T_2 en T_3 gelijk aan T_4 . Aangezien dat de temperatuur constant is mag deze buiten de integraal gezet worden:

$$T(s_2 - s_1) = \int_1^2 \delta Q \quad (5)$$

De integraal beschrijft nu enkel de warmte toegevoerd (of afgevoerd) aan het proces. Respectievelijk toegepast op de warmtetoevoer Q_L en warmteafvoer Q_H geeft dit een uitdrukking voor de warmtestromen Q_L en Q_H :

$$Q_{12} = Q_L = T_L(s_2 - s_1) \quad (6)$$

Aangezien dat de entropieverandering bij de warmtetoevoer dezelfde is als bij de warmteafvoer zijn deze gelijk:

$$\begin{aligned} Q_{34} &= Q_H = T_H(s_4 - s_3) \\ \rightarrow Q_H &= T_H(s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (7)$$

Door substitutie van vgl (6) en (7) in vgl (3):

$$COP = \frac{T_H(s_2 - s_1)}{T_H(s_2 - s_1) - T_L(s_2 - s_1)} \quad (8)$$

De entropie termen mogen geschrapt worden, aangezien dat deze dezelfde zijn, met als resultaat de COP van een carnotwarmtepomp:

$$COP_{carnot,HP} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (9)$$

2.2.2.3 Dampcompressiecyclus

Het carnotproces zoals hierboven omschreven is dus een reversibel proces, waarbij geen rekening is gehouden met verliezen. Vervolgens komt de ideale dampcompressiecyclus, het principe waarop de meeste warmtepompen zijn gebaseerd, aan bod. De mechanische onderdelen van een warmtepomp komen in het volgende hoofdstuk uitgebreid aan bod. Het is noodzakelijk om de belangrijkste onderdelen te kennen om het hele systeem te begrijpen. In fig. 3 zijn de belangrijkste onderdelen van de warmtepomp duidelijk geïllustreerd. Deze figuur verduidelijkt ook de link met het theoretische principe besproken in 2.2.1.

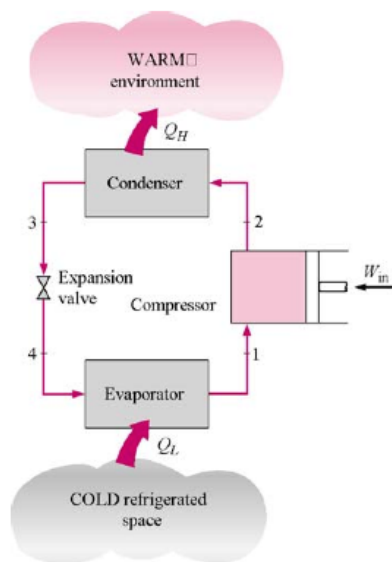


fig. 3: Principe van de dampcompressiecyclus [7].

Eenzijds bestaat een warmtepomp uit een verdamper, die de warmte uit het koude reservoir onttrekt. Daarna volgt de compressor die de nodige arbeid toevoert aan het systeem. Als derde komt de condensor die de warmte afgeeft aan het warme reservoir. En als laatste sluit het expansieventiel het systeem. In dit systeem vloeit een koelmiddel, de keuze van het koelmiddel is vooral afhankelijk van de temperaturen van het koude en het warme reservoir.

fig. 3 illustreert het systeem en in fig. 4 vind men het Ts-diagram van een dampcompressiecyclus. Deze figuur verduidelijkt de thermodynamica achter dit systeem.

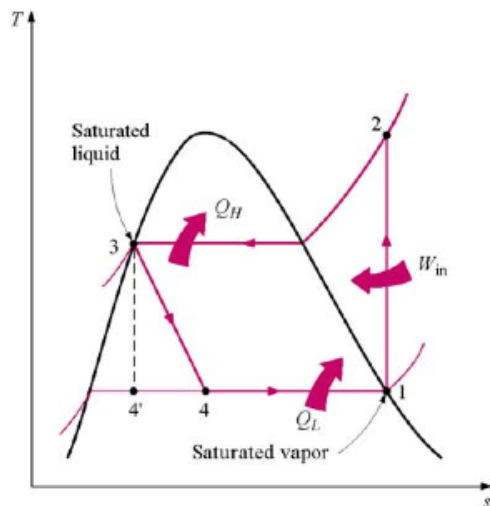


fig. 4: Ts-diagram van de dampcompressiecyclus [7].

- 1→2: isentrope compressie
- 2→3: isobare warmteafvoer
- 3→4: expansie
- 4→1: isobare warmtetoevoer

De cyclus begint bij de verdamper. De verdamper is simpelweg een warmtewisselaar en neemt de warmte op van het koude reservoir (Q_L). Door deze toegevoerde warmte gaat het koelmiddel beginnen verdampen ($4 \rightarrow 1$). De zwarte curve op de figuur illustreert de aggregatietoestand van het koelmiddel, met links van de curve onderkoelde vloeistof en rechts van de curve oververhitte damp.

Het koelmiddel verdampt dus beetje bij beetje, tot in stap 1 het koelmiddel volledig verdampt is.

Op dat moment zal de compressor het verdampte koelmiddel afzuigen en afvoeren naar de condensor ($1 \rightarrow 2$), hierbij zal de druk en temperatuur toenemen.

De condensor is wederom gewoon een warmtewisselaar en hier zal de overtollige warmte (Q_H) afgevoerd worden naar het warme reservoir ($2 \rightarrow 3$). Het koelmiddel staat nog steeds onder hoge druk, het expansieventiel dient dan ook om de druk te verlagen ($3 \rightarrow 4$).

In de vorige paragraaf (2.2.2.2) zijn de warmtes Q_H en Q_L alsook $W_{in,netto}$ gedefinieerd a.d.h.v. het omgekeerde carnotproces. Zoals vermeld is dit een reversibel en theoretisch proces (zonder verliezen). Als je de twee Ts-diagrammen gaat vergelijken zie je duidelijk dat het ingesloten oppervlakte van de dampcompressiecyclus(1-2-3-4) veel groter is dan deze van het omgekeerde carnotproces. M.a.w. er is meer arbeid nodig voor dezelfde warmteoutput. Wat ook logisch is want de dampcompressiecyclus is een irreversibel proces en houdt dus rekening met verliezen. Dus de COP van de dampcompressiecyclus ligt gevoelig lager dan deze van het omgekeerde carnotproces, de verschilfactor houdt rekening met de irreversibiliteiten:

$$COP_{dampcompressiecyclus} = \frac{T_H}{T_H - T_L} * k_{irreversibel} \quad (10)$$

2.2.3 Mechanische onderdelen van een lucht/water warmtepomp

De belangrijkste onderdelen van een warmtepomp zijn al even besproken hierboven, zie 2.2.2. In deze paragraaf worden deze in een iets praktischer context geplaatst. Er bestaan verschillende soorten warmtepompen, die voornamelijk verschillen in de manier waarop ze warmte onttrekken en afgeven. Deze paragraaf beperkt zich tot de luchtgedreven warmtepomp, meerbepaald de lucht/water warmtepomp.

Zoals hierboven reeds gezegd bestaat een warmtepomp uit 4 essentiële onderdelen: verdamper, compressor, condensor en expansieventiel. Een luchtgedreven warmtepomp bestaat uit een binneneenheid en een buiteneenheid, zie fig. 5.



fig. 5: Illustratie van een lucht gedreven warmtepomp met de buiteneenheid (links) en de binneneenheid (rechts) [8].

2.2.3.1 Buiteneenheid

De buiteneenheid wordt buiten geplaatst naast de woning en bevat de verdamper en compressor. Een ventilator zorgt voor een luchtcirculatie (buitenlucht). De verdamper is in wezen een warmtewisselaar en onttrekt de warmte uit de lucht. Geleidelijk aan verdampt het koelmiddel en de compressor zuigt het gasfzig koelmiddel af naar de binneneenheid. In fig. 6 is een buiteneenheid geïllustreerd.



fig. 6: Buiteneenheid [9].

2.2.3.2 Binneneenheid

De binneneenheid bevat de condensor en is eigenlijk een grote warmtewisselaar, die de nuttige warmte van het koelmiddel afstaat aan een waterreservoir. Dit water wordt dan gebruikt om de vloerverwarming te voeden. In fig. 7 wordt de warmte van de warmtepomp ook gebruikt voor het warm water, dit is niet het geval in de onderzochte woning.

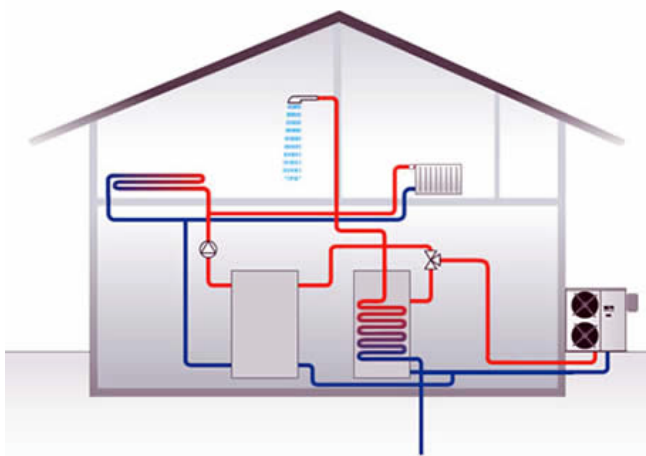


fig. 7: Illustratie van een lucht gedreven warmtepomp in een woning [9].

2.3 Gascondensatieketel

Een gascondensatieketel is een verwarmingsapparaat dat werkt op het principe van verbranding van aardgas, waarbij warmte vrijkomt. Het verschil met een conventionele gasverwarming is dat een gascondensatieketel de verbrandingsgassen condenseert (de verbrandingsgassen bevatten waterdamp), en deze extra warmte gebruikt om het fluïdum nog eens op te warmen [10]. Daarbij gaat er dus minder energie verloren dan bij een conventionele gasverwarming. Het principe van de gascondensatieketel is geïllustreerd in fig. 8.

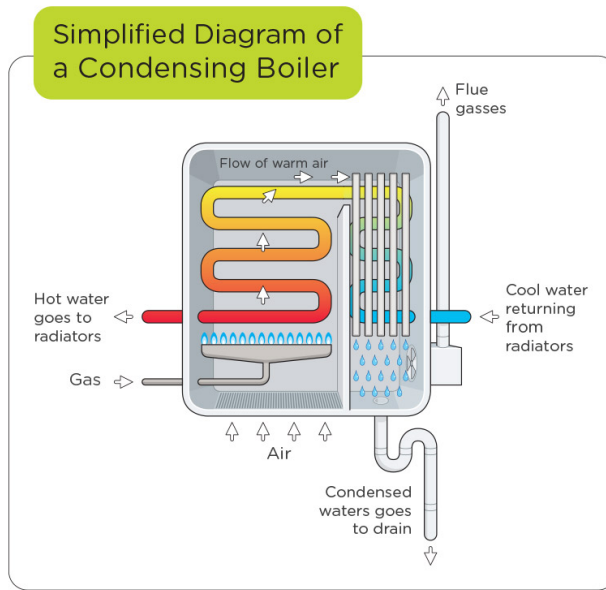
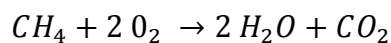


fig. 8: Principe van een gascondensatieketel [11].

Aardgas bestaat voornamelijk uit methaan [12]. Dit geeft dan volgende verbrandingsreactie:



Een deel van de verbrandingsenergie wordt gebruikt om het water te verdampen. De waterdamp maakt dan deel uit van de verbrandingsgassen.

Bij een conventionele gasverwarming worden deze afgezogen. Bij een gascondensatieketel worden de verbrandingsgassen door een condensor gehaald alvorens ze worden afgezogen. Deze condensor haalt de nuttige warmte uit de gassen, waardoor de totale efficiëntie van de verwarming stijgt.

2.3.1 Verbrandingswaarde aardgas

Bij de verbranding van een brandstof komt er warmte vrij, deze warmte wordt gedefinieerd door de verbrandingswaarde van de gebruikte brandstof. Echter moet men onderscheid maken tussen de bovenste verbrandingswaarde (H_b) en de onderste verbrandingswaarde (H_o). Zoals net omschreven vormt er zich bij de verbranding van fossiele brandstoffen water. Een deel van de vrijgekomen warmte wordt gebruikt om het water te verdampen en dit is net het onderscheid tussen de bovenste en onderste verbrandingswaarde (MJ/m^3):

$$H_b = H_o + \text{condensatiwarmte} \quad (11)$$

Typische waarden voor deze verbrandingswaarde van aardgas zijn 35 à 41 MJ/m^3 [13]. M.b.v. het volumedebiet kan de warmtestroom berekend worden:

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{V} * H_b \quad (12)$$

Een deel van deze warmte wordt rechtstreeks gebruikt als nuttige warmte (H_o) en het andere deel is condensatiwarmte dat in de condensor voor een groot deel wordt gerecupereerd. Volgens Viessmann kom je zo tot een efficiëntie van 98% [10] (de 2% energieverlies zit in het condensaat), zie fig. 9. Maar deze efficiëntie is echter wel sterk afhankelijk van de temperatuur van het toegevoerde water [14].

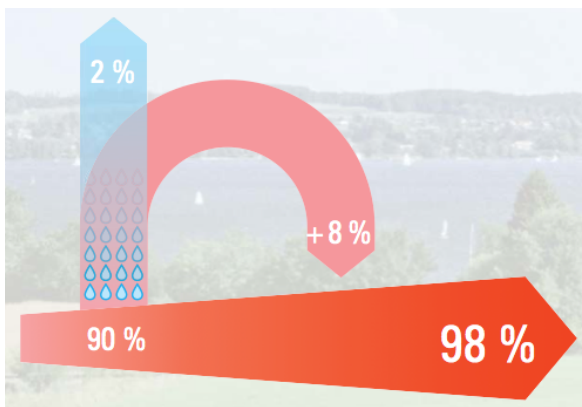


fig. 9: Rendementwinst door condensatie in een gascondensatieketel [10].

2.4 Waarom hybride warmtepompsysteem

Met een warmtepomp kan men een woning op een ecologisch verantwoorde manier verwarmen. Het type warmtepomp zoals in de onderzochte woning gebruikt, namelijk een luchtgedreven warmtepomp, beschikt over een COP die sterk afhankelijk is van de buitentemperatuur. In de wintermaanden is de efficiëntie van dergelijk warmtepompsysteem dus teleurstellend. Om de totale efficiëntie op te krikken wordt er in combinatie met de warmtepomp ook een gascondensatieketel gebruikt welke bijspringt als de COP te laag is (afhankelijk van de buitentemperatuur).

2.4.1 Seasonal Performance Factor

Zoals in de inleiding besproken is de COP sterk afhankelijk van de buitentemperatuur. Om deze ogenschijnlijke misleiding tegen te gaan is er een andere factor in het leven geroepen, de Seasonal Performance Factor (SPF). Deze brengt de efficiëntie van een warmtepomp over een heel jaar in kaart.

Concreet is het de verhouding tussen de hoeveelheid warmte over de periode van een jaar en het gebruikte vermogen van de compressor tijdens deze periode [15].

$$SPF = \frac{\int \dot{Q}_{warmtepomp} * dt}{\int \dot{W}_{compressor} * dt} \quad (13)$$

Een luchtgedreven warmtepomp heeft een lage SPF. Om deze reden wordt een luchtgedreven warmtepomp gecombineerd met een gascondensatieketel. Dergelijk systeem noemt men een hybride warmtepompsysteem. Het nadeel van een luchtgedreven warmtepomp is de slechte COP bij koude omstandigheden. Bij een gascondensatieketel is dit de CO₂-uitstoot welke vandaag de dag zo klein mogelijk moet zijn. Door de gascondensatieketel te gebruiken bij koude omstandigheden (en dus voor de warmtepomp een slechte COP) maximaliseert men de totale efficiëntie met behoud van duurzaamheid.

3 Systeemidentificatie van een ééngezinwoning

De bedoeling is dat er een dynamisch model wordt gemaakt van het thermische gedrag van de woning. Zo'n thermisch model kan op verschillende manieren gemaakt worden. In deze masterproef wordt gekozen voor een lineair model, nl. equivalent RC-netwerk.

Zo'n RC-netwerk bestaat enerzijds uit weerstanden. Deze bepalen de warmtestromen naar buiten alsook tussen de ruimtes. Anderzijds bestaat het netwerk ook uit capaciteiten. Deze staan voor de warmtecapaciteit van de ruimte of vloer. Met dit lineair model kan men op relatief eenvoudige manier een vrij nauwkeurig thermisch model bekomen.

Om dit model te kunnen identificeren moeten er echter eerst nog wat onnauwkeurige data aangepast worden.

3.1 Meetdata

3.1.1 Correctiefactor elektriciteits- en gasverbruik

De metingen van de vermogens, gas en elektriciteit, zijn niet al te nauwkeurig. Daarom wordt er eerst een correctiefactor berekend. Door eerst het verbruik over een periode te berekenen, m.b.v. de gemeten vermogens kan deze vergeleken worden met de gemeten verbruiken (kWh-meter voor elektriciteit en volumemeter voor gas). Deze verhouding geeft dan een correctiefactor voor het verbruik.

Meting van het compressorvermogen

Het vermogen van de compressor waaruit de warmtetoevoer van de warmtepomp kan gehaald worden wordt gemeten m.b.v. een stroomtang. Dergelijke meting is echter niet al te nauwkeurig. Een correctiefactor is dus aan de orde om zo nauwkeurige data te bekomen.

Meting van het gasvermogen

Het vermogen van de gascondensatieketel kan niet rechstreeks gemeten worden, dit doet men via het volume. De volumemeting gebeurt m.b.v. pulsen, de gasmeter geeft per 10 liter verbruik een puls. Als men de tijd tussen deze pulsen meet bekomt men zo het volumedebiet [m^3/s]. Het volumedebiet vermenigvuldigd met de energie-inhoud van gas geeft het warmtevermogen:

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{V} * H_b = \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \quad (14)$$

Aangezien men twee pulsen nodig heeft om het vermogen te berekenen ontstaat bij oneven aantal pulsen een onnauwkeurige berekening. Hiervoor moet dus een correctiefactor in rekening gebracht worden om de nauwkeurigheid te verbeteren. In fig. 10 is een overzicht van de correctiefactoren te zien.

- Correctiefactor dagverbruik: 0.9031
- Correctiefactor nachtverbruik: 0.8957
- Correctiefactor gasverbruik: 0.8061

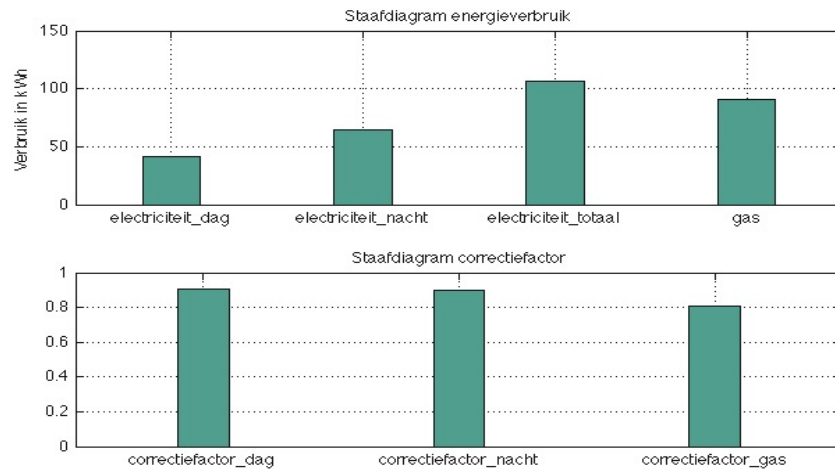


fig. 10: Staafdiagram met boven dag-, nacht- en totaal elektriciteitsverbruik en gasverbruik. En onder de correctiefactoren op deze energieverbruiken.

3.1.2 Warmtewinsten van de gascondensatieketel

Zoals eerder al vermeld is het verwarmingssysteem in de onderzochte woning een hybride warmtepompsysteem. Men haalt dus de nodige warmte zowel uit een warmtepomp als een gascondensatieketel. Voor het model zijn enkele metingen nodig om de warmtetoevoer van de warmtepomp en gascondensatieketel te kennen. Voor de warmtepomp is dit vrij eenvoudig. In de data wordt het vermogen van de compressor gemeten. Hieruit kan a.d.h.v. het carnotrendement een goede schatting gemaakt worden van de warmtetoevoer van de warmtepomp.

Voor de gascondensatieketel is de meting iets complexer. Deze methode is in de vorige paragraaf (3.1.1) besproken. Hierdoor is de meting niet van goede kwaliteit plus het gasverbruik voor warm water en koken zit hier ook bij. Daarom moet deze dataset gefilterd worden, zodat de gebruikte data nauwkeurig zijn voor het model.

3.1.2.1 Werkwijze

Zoals eerder aangegeven bestaat het gemeten gasvermogen niet enkel uit het vermogen van de gascondensatieketel maar ook uit het vermogen nodig voor het kookfornuis en het verwarmen van water. Er moet dus een methode gevonden worden om deze twee laatste uit de metingen te filteren. Een manier om dit te doen is om een gemiddelde te nemen over een periode. De meting wordt opgesplitst in blokken van 15 minuten waarna het gemiddelde in deze periode berekend wordt. Dit resulteert in een afgevlakte meting met nog steeds dezelfde integraal. Bijkomend moeten de grote korte pieken gefilterd worden (aangezien dit de grote vermogens zijn van het fornuis en/of warm water).

Hiervoor wordt een threshold gebruikt. Alle pieken boven de 20kW worden eruit gefilterd. Dit geeft als resultaat het volgende (de bovenste plot geeft de originele data weer, de onderste plot geeft de bijgewerkte data weer):

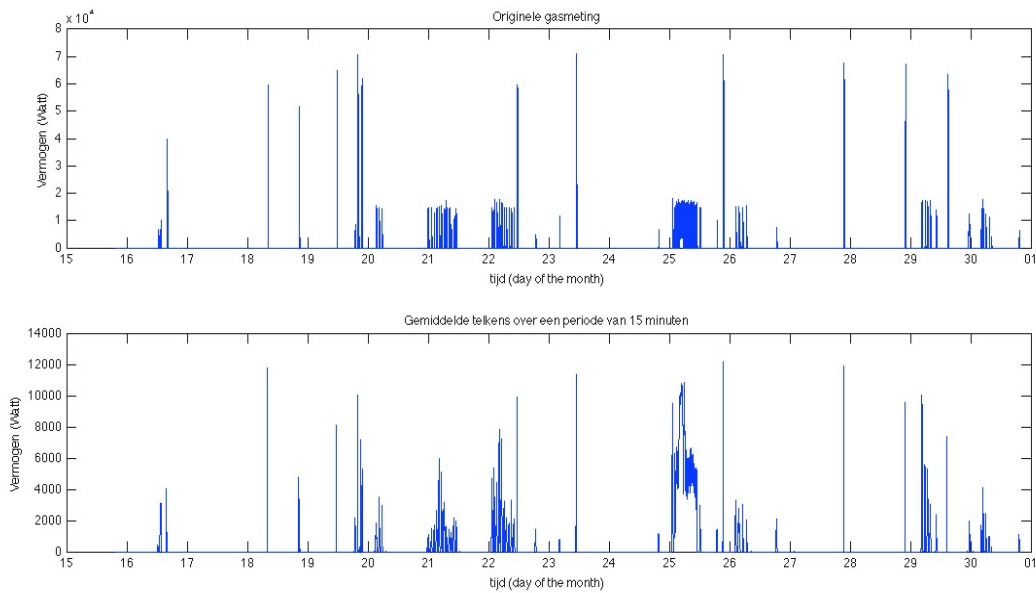


fig. 11: De originele gasmeting boven en onder de gefilterde gasmeting.

Met deze gecorrigeerde data (fig. 11) kan het model geïdentificeerd worden. In de volgende paragraaf wordt de gebruikte methode toegelicht.

3.2 Werkwijze

3.2.1 Model opstellen

De topologie van het netwerk (hoeveel R's en C's en hoe verbonden) en de parameters (waarde van R's en C's) zijn niet gekend. Er wordt dus een model verondersteld en de waarden van R en C worden bepaald door het model zo goed mogelijk te laten overeenkomen met de meetdata. Stap één is om een zeer eenvoudig model te veronderstellen en dit wordt dan telkens uitgebreid tot er een nauwkeurig model bekomen wordt.

Een RC-netwerk bestaat uit weerstanden, capaciteiten en knooppunten.

De weerstanden in het equivalente RC-netwerk staan voor thermische weerstand tussen de ruimtes. De capaciteiten staan voor de warmtecapaciteit van de ruimtes. En de knooppunten stellen dan de temperatuur voor in de desbetreffende ruimte [16], [17]. Om de vergelijking met de wet van Ohm te verduidelijken: de verschillende temperaturen tussen twee ruimtes stellen het spanningsverschil (temperatuursverschil) voor. De muur tussen de twee ruimtes stelt de (thermische) weerstand voor. Zoals de wet van Ohm dicteert: een spanning over een weerstand brengt een stroom voort, de warmtestroom.

Als laatste wordt de warmtetoevoer aangeduid als een stroombron.

Via de wet van Kirchoff kan men uit dit model een reeks differentiaalvergelijkingen afleiden, namelijk één differentiaalvergelijking per knooppunt.

Uit de logdata kan men enkele gegevens halen om deze vergelijkingen te kunnen oplossen. Ten eerste de temperaturen van de verschillende ruimtes, verder worden ook nog het gasverbruik en verbruik van de warmtepomp gemeten (hieruit kan men de warmtetoevoer berekenen). Uit de differentiaalvergelijking moet men dan nog de thermische weerstand en warmtecapaciteit halen.

3.2.2 COP modellering

Om de warmtetoever van de warmtepomp te kennen moet enerzijds het compressorvermogen gekend zijn maar ook de COP:

$$\dot{Q}_{warmtepomp} = \dot{W}_{compressor} * COP \quad (15)$$

De COP is niet gekend, maar deze kan wel bepaald worden a.d.h.v. het carnotrendement. Omdat het hier niet gaat om een carnotwarmtepomp moet deze vergelijking wel nog vermenigvuldigd worden met een correctiefactor:

$$COP = \frac{T_{cond}[K]}{T_{cond} - T_{evap}} cf_{COP} \quad (16)$$

De condensstemperatuur kan als constant beschouwd worden (nl. 35°C). De COP is dus enkel afhankelijk van de verdampingstemperatuur. De verliezen in de verdamper worden verwaarloosd en deze temperatuur kan dan dus gelijkgesteld worden aan de buitentemperatuur welke wordt gelogd.

De correctiefactor voor de COP (cf_{COP}) kunnen we samen met de modelparameters identificeren. Echter uit verder verloop blijkt dat dit COP-model bij lage temperaturen onnauwkeurig is. Een nieuw en meer nauwkeurig model is dus aan de orde, fig. 12:

$$COP = \frac{1}{A * (35 - T_{buiten}) + B} \quad (17)$$

Uit correlatie blijkt dat dit COP-model een betere nauwkeurigheid biedt. De parameters A en B worden ingeschat m.b.v. de optimalisatie die verder in tekst wordt toegelicht. Deze functie moet echter aangepast worden omdat de functie beschikt over een asymptoot:

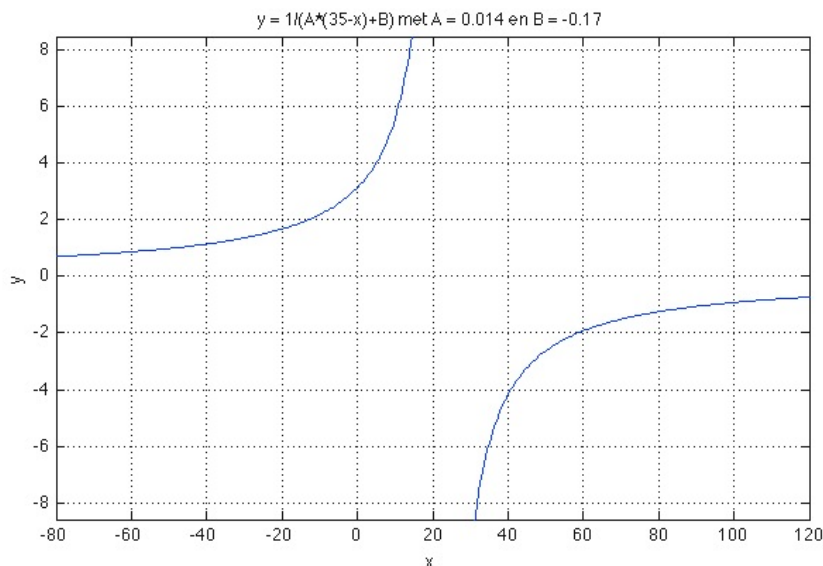


fig. 12: Onbewerkt COP-model.

Dit maakt echter niet uit mits toevoegen van een maximale waarde en het omkeren van het negatieve deel. Enkel het deel tussen -10 en 20 is interessant (realistische waarden voor de warmtepomp).

Dus door toevoegen van een maximale grens en de absolute waarden te kiezen is het een aanvaardbaar model, zie fig. 13.

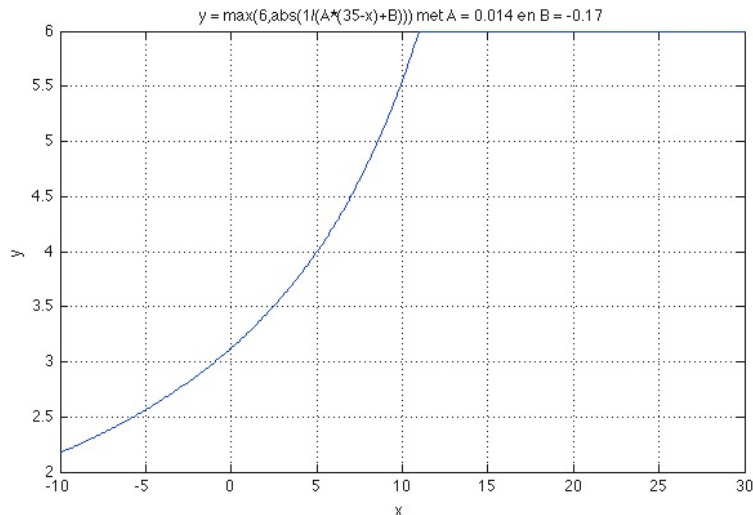


fig. 13: Bewerkt COP-model.

Dit geeft dus drie extra modelparameters om het COP-model te definiëren:

- A
- B
- COP_{\max}

3.2.3 Identificatie

Om de modelparameters (R's, C's, A, B,...) te identificeren wordt er gebruik gemaakt van het Nelder-Mead algoritme [18]. Dit is een algoritme dat zoekt naar het minimum van een opgegeven functie. Voor deze functie wordt gekozen voor de least squares:

$$\sum (T_{\text{zone}} - T_{\text{berekend}})^2 \quad (18)$$

Dit algoritme eist initiële waarden van de modelparameters (een initiële schatting). De differentiaalvergelijkingen worden dan numeriek uitgerekend en het algoritme gaat op zoek naar waarden voor de modelparameters waarvoor de fout (least squares) van het model minimaal is. De data worden over een periode van 14 dagen geïdentificeerd.

3.2.4 Grenzen van de modelparameters kiezen

De grenzen waar tussen de parameters moeten liggen worden ook gedefinieerd. Zo wordt het rekengebied verkleind. Dit algoritme werkt lokaal en zo wordt het algoritme geforceerd om in het gewenste gebied te zoeken.

3.2.5 Cross validatie

De identificatie van het model is dus één zaak maar wat men doet bij identificatie is eigenlijk om het model zo goed mogelijk “fitten” met de dataset door de parameters gaande weg te veranderen. Dit noemt men ook wel eens “fitting” van een model.

Om het model te testen moeten de geïdentificeerde parameters getest worden met een onafhankelijke dataset. Dit noemt men cross validatie [19]. De meest eenvoudige manier van cross validatie is de “hold out” methode [20]. Men heeft dus een dataset x waarmee het model wordt geïdentificeerd. Met de bekomen modelparameters gaat men vervolgens het model valideren met een dataset y .

De dataset waarmee men het model identificeert noemen ze ook wel de “training” dataset en de dataset waarmee men valideert de “testing” dataset [20].

3.3 Thermisch modelleren van een ééngezinswoning

3.3.1 Model met één enkele zone

Als eerste stap wordt er een vereenvoudigd model opgesteld van de woning waar het huis wordt voorgesteld als één ruimte met één operationele temperatuur.

Hiervoor kan men dan een equivalent RC model opstellen met één weerstand en één capaciteit (zie fig. 14) volgens de methode beschreven in 3.2.1. Zoals op deze figuur is te zien bestaat het netwerk uit één knooppunt waar men de wet van Kirchoff (specifiek de stroomwet) op kan toepassen, nl.: de som van de toekomstige (warmte)stromen is gelijk aan de som van de vertrekkende (warmte)stromen.

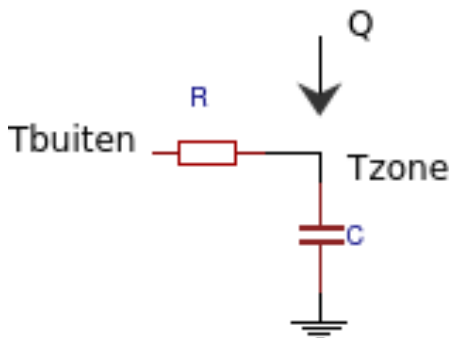


fig. 14: Model met één enkele zone.

Dit model bestaat uit één knooppunt (T_{zone}). Er kan dus één differentiaalvergelijking opgesteld worden voor dit model:

$$\dot{Q}_{verw} + \dot{Q}_{zon} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{verw} + \dot{Q}_{zon} = \frac{T_{zone} - T_{buiten}}{R} + C \frac{dT_{zone}}{dt} \quad (20)$$

De warmtetoevoer (Q_{zon} en Q_{verw}) zorgt ervoor dat T_{zone} stijgt en dat er een deel van die energie wordt opgeslagen in de ruimte (capaciteit C). Als gevolg van het temperatuursverschil tussen buiten en binnen zal er een warmtestroom naar buiten toe zijn die gedefinieerd wordt door de thermische weerstand R .

3.3.1.1 Identificatie

- Least squares = 1667.38 [K²]
- $R = 0.0023$ [K/W]
- $C = 3.3183 \times 10^8$ [J/K]
- $A = 0.0105$
- $B = -0.1981$
- $cf_{\text{sol}} = 0.6157$
- $\text{COP}_{\text{max}} = 6.7707$

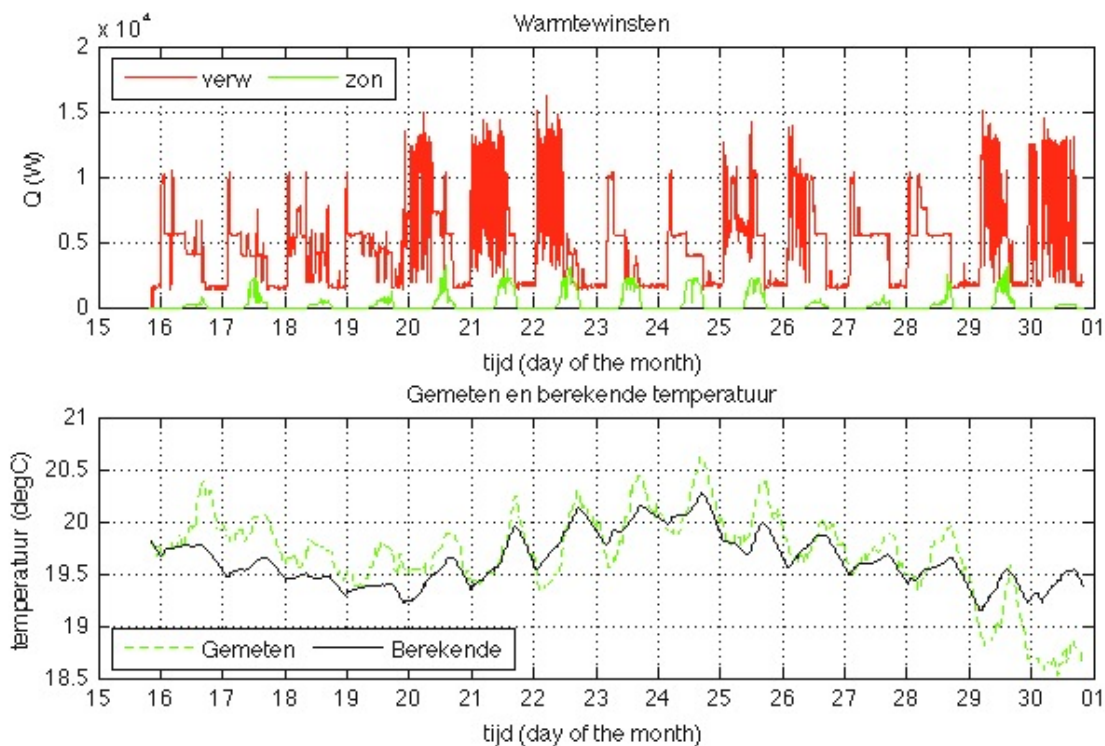


fig. 15: Identificatie van het model met één enkele zone.

Als eerste is de fout met dit model vrij groot (1667.38 K²), duidelijk te zien in fig. 15. Model parameter R komt wel overeen met een realistische thermische weerstand van een woning. De woning beschikt over vloerverwarming, welke een grote thermische traagheid heeft. Dit verklaart dus ook de grote waarde voor C maar deze is misschien wel wat aan de hoge kant. Het COP-model is duidelijk niet realistisch. Via de parameters A en B kan de COP bij A2/W35 berekend worden (Air 2°C/ Water 35°C). Dit komt neer op een COP van 6.7, wat véél te hoog is. Door de grote fout (least squares) en het onrealistische COP-model is een uitbreiding noodzakelijk. Cross validatie heeft dan ook geen zin.

3.3.2 Model met één enkele zone met vloerverwarming

Nog een stapje verder wordt de verwarming zelf in rekening gebracht. Zoals eerder al vermeld is de woning voorzien van vloerverwarming welke ook kan gezien worden als een RC-netwerk. De warmte opgeslagen in het vloercircuit kan men zien als een capaciteit C_{vloer} . De warmte die naar de ruimte toestroomt is dan weer gedefinieerd door een thermische weerstand R_{vloer} , zoals te zien is in fig. 16. Dit netwerk is iets complexer geworden t.o.v het vorige. Hier bestaat het netwerk uit twee knooppunten..

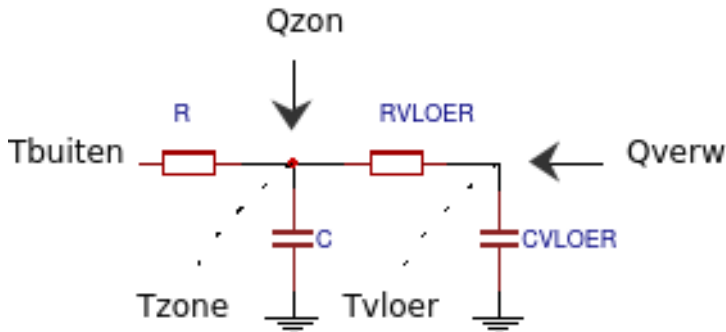


fig. 16: Model met één enkele zone met vloerverwarming.

Voor dit model kunnen dus twee differentiaalvergelijkingen opgesteld worden gebaseerd op de stroomwet van Kirchoff. De eerste differentiaalvergelijking is gelijkaardig aan de vorige op Q_{Rvloer} na:

$$\dot{Q}_{zon} + \dot{Q}_{Rvloer} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{zon} + \frac{T_{vloer} - T_{zone}}{R_{vloer}} = \frac{T_{zone} - T_{buiten}}{R} + C \frac{dT_{zone}}{dt} \quad (22)$$

De tweede differentiaalvergelijking wordt opgesteld via het knooppunt T_{vloer} :

$$\dot{Q}_{verw} = \dot{Q}_{Rvloer} + \dot{Q}_{Cvloer} \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{verw} = \frac{T_{vloer} - T_{zone}}{R_{vloer}} + C_{vloer} \frac{dT_{vloer}}{dt} \quad (24)$$

De warmtetoevoer Q_{verw} zorgt ervoor dat de temperatuur van de vloer zal stijgen. Een deel van deze energie wordt opgeslagen in de vloer en kan gedefinieerd worden via C_{vloer} . En het andere deel zal doorstromen naar de ruimte via R_{vloer} . Deze warmtestroom zorgt voor de stijging van T_{zone} .

3.3.2.1 Identificatie

- Least squares = 904.072 [K²]
- R = 0.0025 [K/W]
- C = 1.854e6 [J/K]
- R_{vloer} = 1.8272e-5 [K/W]
- C_{vloer} = 2.9425e8 [J/K]
- A = 0.0104
- B = -0.1636
- cf_{sol} = 1.0929
- COP_{max} = 5.7979

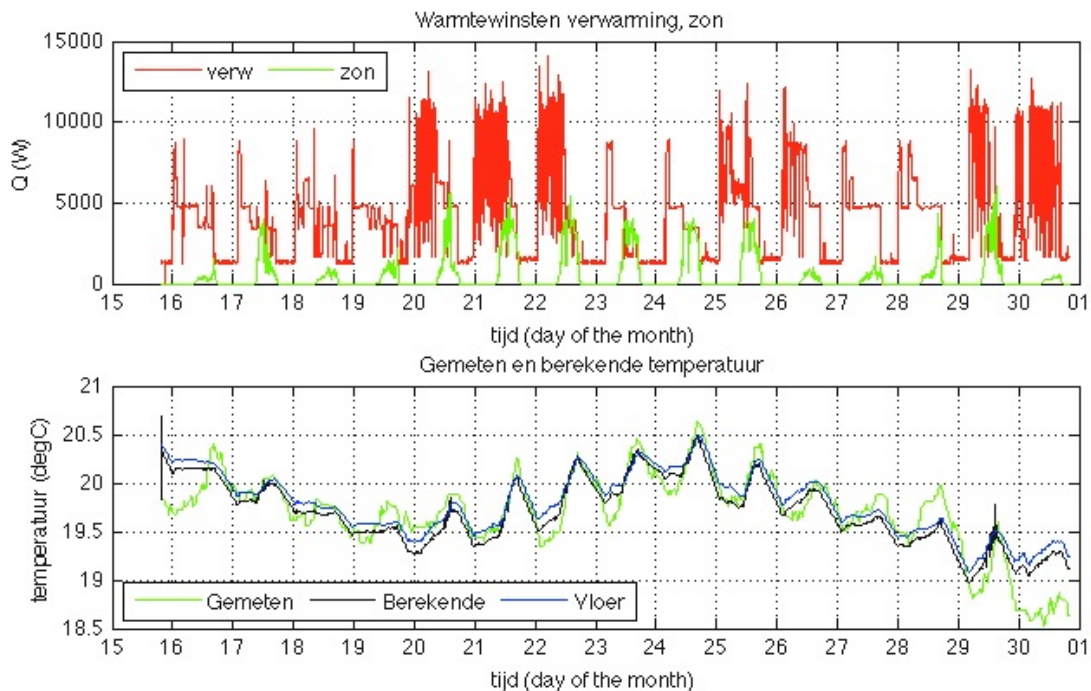


fig. 17: Identificatie van het model met één enkele zone met vloerverwarming.

De fout is al kleiner geworden (fig. 17). Er zijn echter enkele waarden die niet echt realistisch blijken te zijn. Ten eerste is de warmtecapaciteit C van de ruimte behoorlijk klein. 1.8×10^6 J/K voor een volledige woning (binnenlucht, interieur, ...) is behoorlijk weinig. In volgende literatuur, [21], spreekt men over een $100 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ tot $450 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, dit komt neer voor een gemiddelde woning (100 m^2) op een warmtecapaciteit van 1×10^7 J/K tot 4.5×10^7 J/K. Als tweede is het COP-model behoorlijk onrealistisch. Met de waarde $A=0.0104$ en $B=-0.1636$ zou de warmtepomp een COP hebben bij A2/W35 (Air 2°C/Water 35°C) van 5.6, wat twijfelachtig is. Cross validatie heeft dus ook hier geen zin. Verdere uitbreiding is aan de orde.

3.3.3 Model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern gesplitst

Zoals te zien is in het vorige model, zie 3.3.2, straalt de zon rechtstreeks op de zone. Echter in de realiteit straalt de zon eerder op het oppervlak van de vloer. Het is dus mogelijk om een model te veronderstellen waarbij het vloeroppervlak en de vloerkern gescheiden zijn (aparte R en C), verduidelijkt in fig. 18.

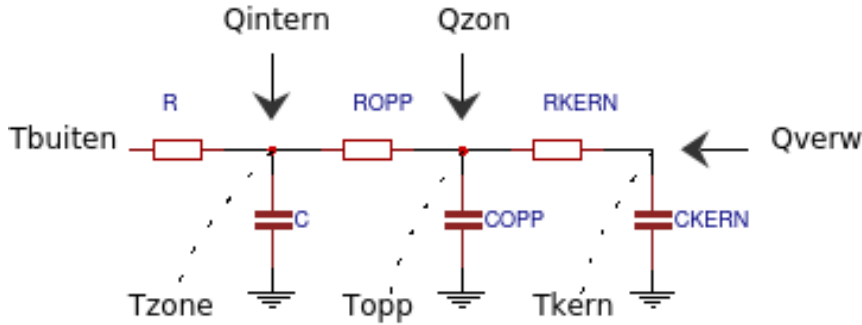


fig. 18: Model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern opgesplitst.

Zoals in fig. 18 te zien is, wordt er warmte toegevoerd via de vloerkern (vloerverwarming). Een deel van deze warmte gaat naar het vloeroppervlak, waar ook de zonnewinsten bijkomen. De warmte gaat dan van het oppervlak naar de zone. In de logdata wordt er ook een schatting gemaakt van de interne warmtewinsten (warmte in de ruimte: fornuis, lampen, ...). Deze worden toegevoerd rechtstreeks in de zone.

Uit dit model komen dan drie differentiaalvergelijkingen, waarvan de eerste opgesteld wordt via het knooppunt T_{zone} :

$$\dot{Q}_{intern} + \dot{Q}_{Ropp} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{intern} + \frac{T_{opp} - T_{zone}}{R_{opp}} = \frac{T_{zone} - T_{buiten}}{R} + C \frac{dT_{zone}}{dt} \quad (26)$$

De tweede differentiaalvergelijking wordt opgesteld via het knooppunt T_{opp} :

$$\dot{Q}_{zon} + Q_{Rkern} = \dot{Q}_{Ropp} + \dot{Q}_{Copp} \quad (27)$$

$$\dot{Q}_{zon} + \frac{T_{kern} - T_{opp}}{R_{kern}} = \frac{T_{opp} - T_{zone}}{R_{opp}} + C_{opp} \frac{dT_{opp}}{dt} \quad (28)$$

De derde differentiaalvergelijking wordt opgesteld via het knooppunt T_{kern} :

$$\dot{Q}_{verw} = Q_{Rkern} + \dot{Q}_{Ckern} \quad (29)$$

$$\dot{Q}_{verw} = \frac{T_{kern} - T_{opp}}{R_{kern}} + C_{kern} \frac{dT_{kern}}{dt} \quad (30)$$

De warmte wordt toegevoerd aan de vloerkern. Hierdoor gaat T_{kern} stijgen (stijging afhankelijk van C_{kern}). De vloerkern staat een deel van zijn warmte af aan de vloeroppervlakte. Deze warmtestroom wordt gedefinieerd door R_{kern} . Op de vloeroppervlakte straalt ook de zon in. Door deze twee warmtestromen stijgt T_{opp} (afhankelijk van C_{opp}). Op zijn beurt staat de vloeroppervlakte warmte af aan de zone (afhankelijk van R_{opp}) waardoor T_{zone} stijgt. Deze stijging is afhankelijk van C en de zone verliest zijn warmte naar buiten toe. Deze warmtestroom wordt gedefinieerd door R .

3.3.3.1 Identificatie

- Least squares = 484.509 [K²]
- $R = 0.003$ [K/W]
- $C = 1.0529 \times 10^7$ [J/K]
- $R_{\text{opp}} = 4.9568 \times 10^{-5}$ [K/W]
- $C_{\text{opp}} = 1.0747 \times 10^7$ [J/K]
- $R_{\text{kern}} = 9.479 \times 10^{-6}$ [K/W]
- $C_{\text{kern}} = 1.8882 \times 10^8$ [J/K]
- $A = 0.0135$
- $B = -0.172$
- $cf_{\text{sol}} = 0.5883$
- $\text{COP}_{\text{max}} = 6.3581$

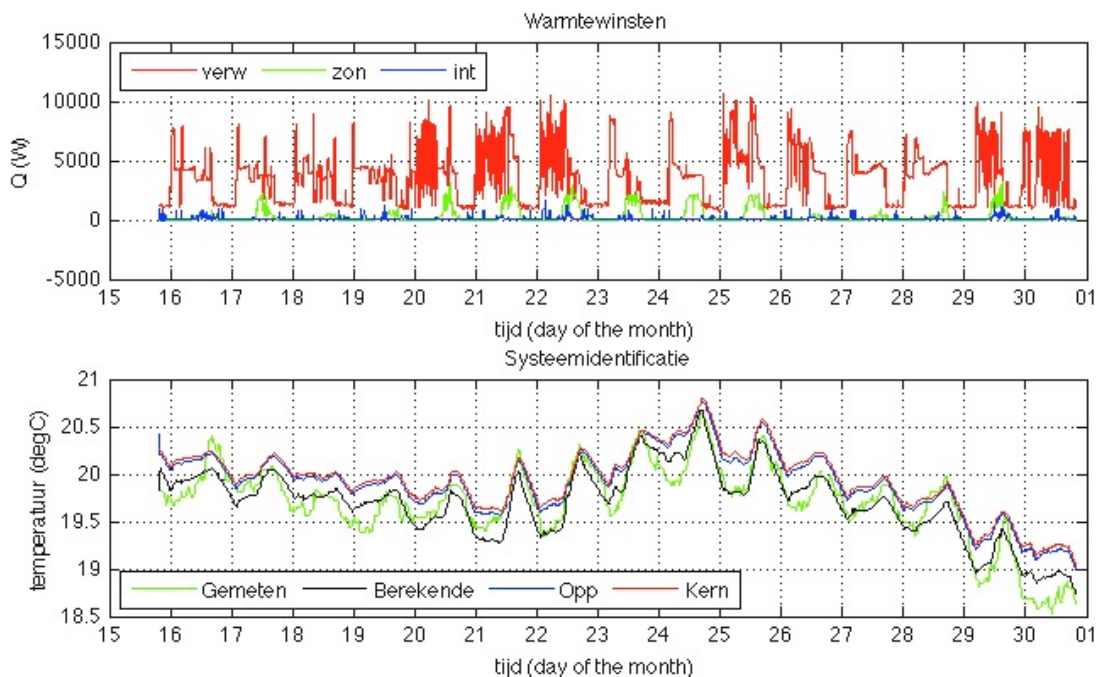


fig. 19: Identificatie van het model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern opgesplitst.

De fout is al een pak kleiner geworden. Uit fig. 19 blijkt ook dat het model goed past op de gemeten data.

De warmtecapaciteit van de ruimte (C) ziet er veel realistischer uit (Thermal Mass Parameter, [21]). De thermische weerstand R_{opp} en R_{kern} zijn zeer klein, wat ook moet. Deze twee behoren tot de vloerverwarming en moeten dus gemakkelijk hun warmte kunnen afgeven. Daarom dan ook de kleine waarden voor deze twee parameters.

Het COP-model (A, B en COP_{max}) is al veel realistischer dan in 3.3.2.1. De COP met dit model bij A2/W35 is 3.65. Deze komt al aardig in de buurt van de echte COP, [22].

Met cross validatie moet dit model eerst gevalideerd worden. De resultaten van de identificatie zijn alleszins voldoende.

3.3.3.2 Cross validatie

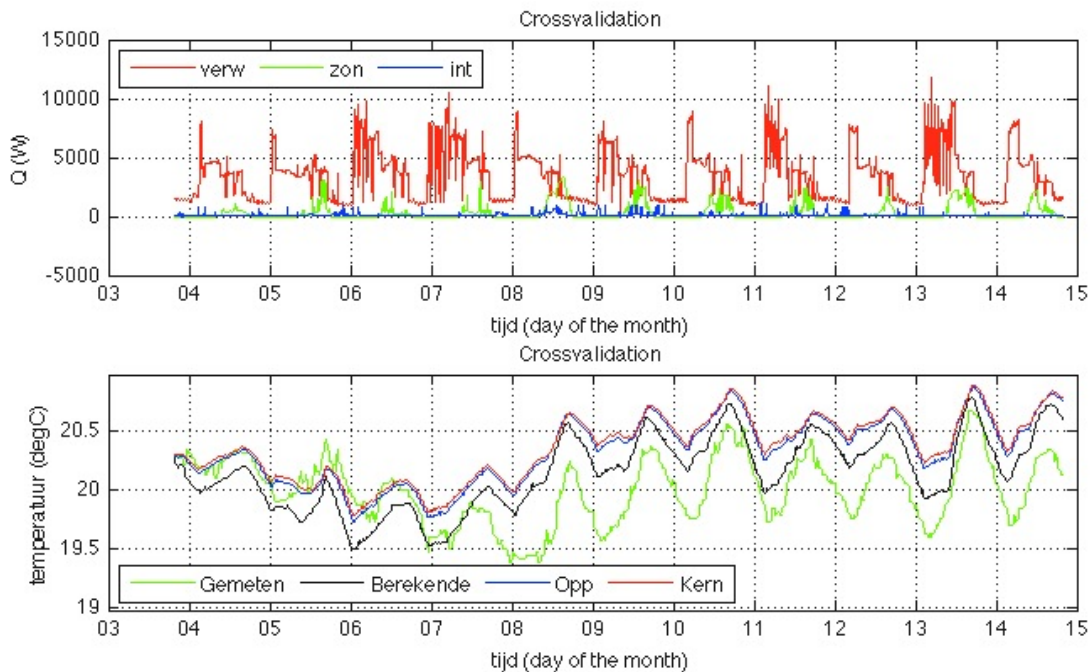


fig. 20: Cross validatie van het model met één enkele zone met vloerverwarming, oppervlakte en kern opgesplitst.

De fout (least squares) is duidelijk groter dan bij de identificatie. Dit komt omdat er een onafhankelijke dataset wordt gebruikt voor de validatie. Het doel van de identificatie is om het model zo goed mogelijk te “fitten” op de dataset. De cross validatie moet het model vervolgens checken. Ondanks deze fout wordt dit model geacht als voldoende. Verder zijn afwijkende factoren ook de verklaring voor de fout (dit geldt ook voor de identificatie). Dit zijn factoren die niet zijn opgenomen in de dataset (geopende deuren of ramen, verandering van interieur,...). Een duidelijk voorbeeld van dergelijke afwijkende factor is te zien in fig. 21, één dag eerder.

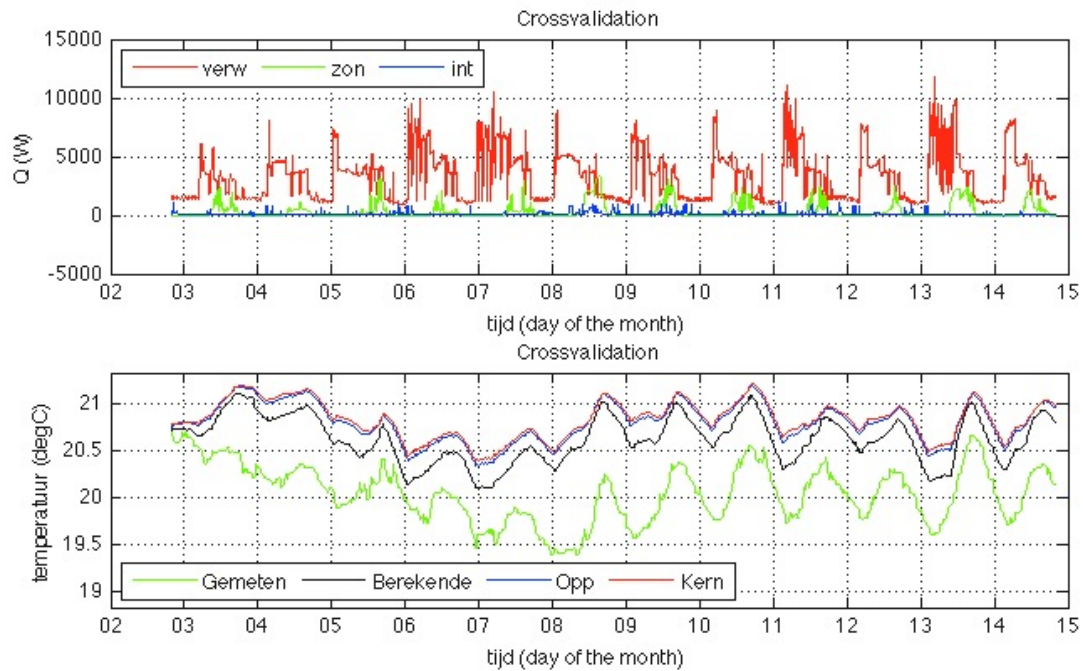


fig. 21: Cross validatie, voorbeeld afwijkende factoren (geopend deur of raam vermoedelijk).

In het begin van de cross validatie is te zien dat de temperatuur van het model stijgt terwijl de gemeten temperatuur daalt. Dit terwijl er wel warmte wordt toegevoerd aan het systeem. Hieruit kan niets anders geconcludeerd worden dan een geopend raam of deur. Een afwijkende factor dus.

3.3.4 Conclusie

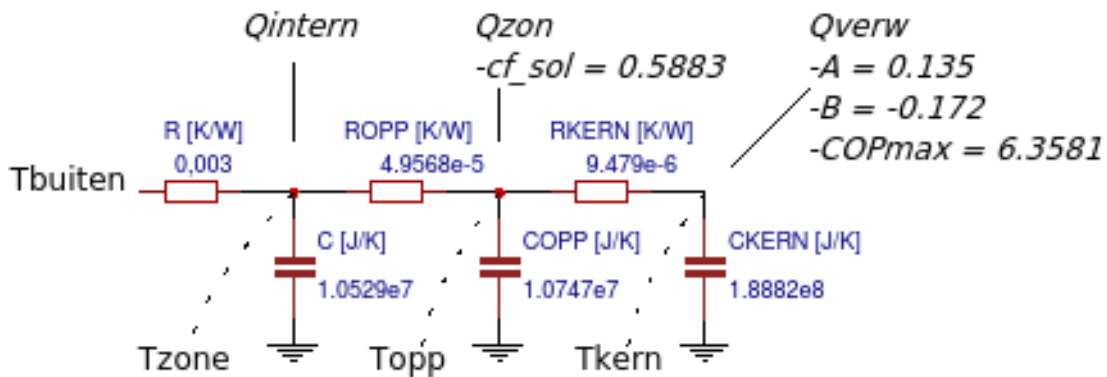


fig. 22: Gekozen model voor een eengezinswoning na identificatie en cross validatie.

Ondanks deze afwijkende factoren wordt er geconcludeerd dat dit model voldoende is voor het verdere verloop van de masterproef, zie fig. 22. Dit model zal dus gebruikt worden voor de simulaties.

De systeemidentificatie m.b.v. het Nelder-Mead algoritme blijkt dus sterk afhankelijk te zijn van de gekozen grenzen en beginwaarden. Kennis over courante waarden is dus absoluut nodig om een nauwkeurig model te identificeren.

4 Simulatie

4.1 Werkwijze

Het vorige hoofdstuk handelde over de methode hoe een thermisch model kan geïdentificeerd worden. Met dit model is het de bedoeling om simulaties uit te voeren om zo bepaalde situaties te kunnen voorspellen. In het vorige hoofdstuk zijn de modelparameters geïdentificeerd en gevalideerd. De differentiaalvergelijkingen worden voor de simulaties uitgerekend met de modelparameters. Enkel de warmtetoevoer moet worden berekend. Hiervoor maakt men in de praktijk gebruik van de zogeheten stooklijn.

4.1.1 Veronderstellingen

De verwarming regelt de binnentemperatuur tot een gewenste waarde. Er wordt van uit gegaan dat de verwarming enkel werkt vanaf zeven uur 's morgens tot 22 uur 's avonds. Overdag is de gewenste temperatuur 21 °C en 's nachts 16 °C dit om de temperatuur 's nachts niet te veel te doen zakken. Deze ondergrens zal echter nooit bereikt worden.

4.1.2 Regeling

4.1.2.1 Warmtevraag berekening

Verwarmingsregelaars werken meestal op het principe van de stooklijn [23]. Een stooklijn geeft de aanvoertemperatuur in functie van de buitentemperatuur. De verwarming is dus afhankelijk van de buitentemperatuur. De warmtevraag is gerelateerd met de aanvoertemperatuur. Daarom wordt de stooklijn aangepast zodanig dat de warmtevraag wordt gegeven i.f.v. de buitentemperatuur:

$$\dot{Q}_{verw} = \dot{Q}_{max} - \frac{\dot{Q}_{max}}{T_2 - T_1} (T_{buiten} - T_1) \quad (31)$$

Hierna wordt deze warmtevraag gecorrigeerd afhankelijk van het verschil tussen de gewenste temperatuur en de werkelijke binnentemperatuur (de offset):

$$\dot{Q}_{corr} = \dot{Q}_{verw} + \frac{d\dot{Q}}{dT} (T_{gewenst} - T_{binnen}) \quad (32)$$

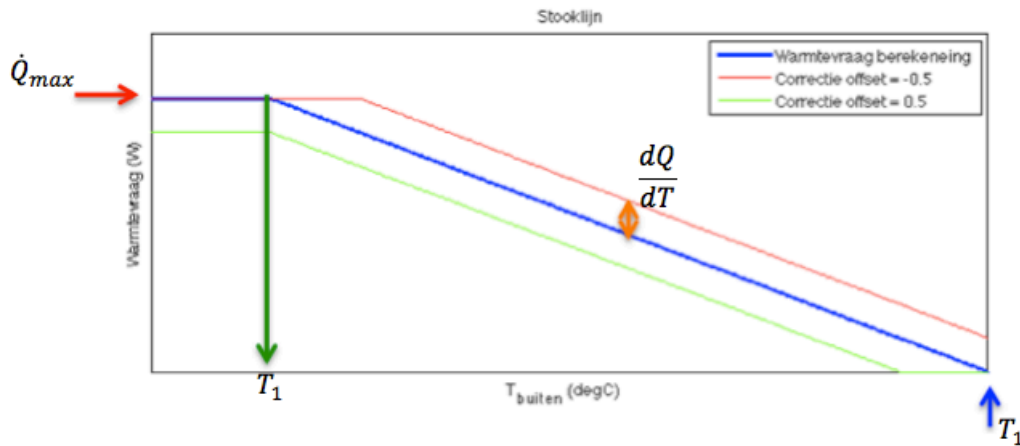


fig. 23: Stooklijn van een verwarmingsregeling mt de vier instelparameters.

In fig. 23 wordt de warmtevraagberekening geïllustreerd. Deze grafiek kan ontworpen worden (en dus ook de regeling) door vier parameters in te stellen. Zie de gekleurde pijlen op de grafiek:

- \dot{Q}_{max} : De maximale warmtevraag vòòr de correctie;
- T_1 : De temperatuur wanneer de warmtevraag begint te dalen (depreciatie);
- T_2 : De temperatuur waarvoor de warmtevraag nul is;
- $\frac{d\dot{Q}}{dT}$: In welke mate reageert de verwarming op het verschil tussen de gewenste temperatuur en de binnentemperatuur.

Deze parameters worden handmatig ingesteld. Rekening houdend met het thermisch comfort (wordt de gewenste temperatuur behaald?) en het verbruik.

Invloed van \dot{Q}_{max}

Hoe groter dit getal hoe beter het thermisch comfort. Meer warmte betekent dat de gewenste temperatuur gemakkelijker wordt bereikt. Echter deze waarde wordt gelimiteerd door het totale thermisch vermogen van het systeem (gascondensatieketel + warmtepomp). Deze waarde is dus afhankelijk van COP en dus ook de buitentemperatuur. Meer vermogen dan dit kan het systeem toch niet leveren. Door het COP-model is de COP op ieder moment gekend en dus ook het maximale thermisch vermogen:

- Warmtepomp (WP): $\dot{W}_{WPmax} \frac{1}{A*(35-T_{buiten})+B}$
- Gascondensatieketel (GK): \dot{Q}_{GKmax}
- Hybride warmtepompsysteem: $\dot{Q}_{GKmax} + \dot{W}_{WPmax} \frac{1}{A*(35-T_{buiten})+B}$

Invloed van T_1

De RC-300 regelaar (gebruikt in het hybride warmtepompsysteem) heeft hier een standaard waarde van $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Als deze vergroot wordt (bv. $-5\text{ }^\circ\text{C}$) dan is de binnentemperatuur bijna altijd groter dan de gewenste temperatuur. Een bijkomend gevolg hiervan is dat het verbruik te hoog ligt. Als deze waarde verkleind wordt ($-15\text{ }^\circ\text{C}$) dan wordt de gewenste temperatuur niet gehaald. Deze waarde wordt dus vastgelegd op $-10\text{ }^\circ\text{C}$.

Invloed van T_2

Deze waarde geeft zoals te zien in de figuur de temperatuur weer waarbij verwarming niet meer nodig is. Deze wordt ingesteld op $20\text{ }^\circ\text{C}$ en wordt nog aangepast zodanig dat de drie verwarmingssystemen éénzelfde thermisch comfort bekomen. Dit geeft voor de drie verwarmingssystemen volgende waarden:

- Warmtepomp: $T_2 = 15\text{ }^\circ\text{C}$
- Gascondensatieketel: $T_2 = 21.2\text{ }^\circ\text{C}$
- Hybride warmtepompsysteem: $T_2 = 17.5\text{ }^\circ\text{C}$

Deze instelparameter is getuned zodanig dat het thermisch comfort voor de drie systemen gelijk is. Het thermisch comfort is hier gedefinieerd als het aantal uren (over de oktober-mei) dat de werkelijke binnentemperatuur boven de gewenste temperatuur ligt, vermenigvuldigt met het verschil t.o.v. de gewenste temperatuur. Deze term is uitgedrukt in Kelvin*uur. De waarden voor de drie systemen zijn:

- Warmtepomp: 354.6 Kh
- Gascondensatieketel: 352.97 Kh
- Hybride warmtepompsysteem: 353.1 Kh

Invloed van $\frac{d\dot{Q}}{dT}$

Deze term geeft weer in welke mate de verwarming moet reageren op een afwijking van de gewenste temperatuur. Dit wil zeggen dat als de binnentemperatuur lager ligt dan de gewenste temperatuur dat de verwarming meer moet reageren (meer warmtevermogen). Maar ook dat de warmtevraag moet gereduceerd worden bij een binnentemperatuur die hoger ligt dan de gewenste temperatuur. Voor de Life Cycle Analysis in het volgende hoofdstuk is het belangrijk dat de drie systemen gelijkwaardig worden ingesteld:

$$\text{Warmtepomp: } \frac{1}{3} \left(\dot{W}_{WP_{max}} \frac{1}{A*(35-T_{buiten})+B} \right)$$

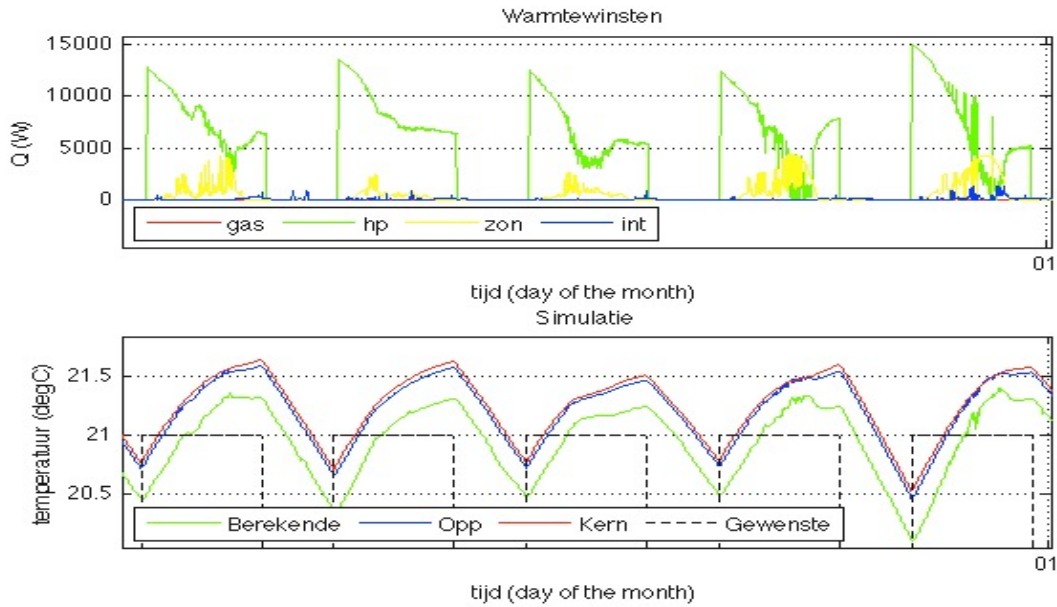


fig. 24: Simulatie van 5 dagen met $dQdT$ gelijk aan één derde van het maximale vermogen.

In fig. 24 is te zien dat de binnentemperatuur nagenoeg constant te hoog. Dit wil zeggen dat de warmtepomp niet genoeg reageert op het verschil tussen de gewenste waarde en de binnentemperatuur. Met andere woorden we moeten $\frac{d\dot{Q}}{dT}$ verhogen. Uit verder verloop blijkt het maximale thermisch vermogen een goede instelling te zijn, zie fig. 25. Deze waarde kiezen we ook voor de twee andere systemen:

- Warmtepomp: $\dot{W}_{WPmax} \frac{1}{A*(35-T_{buiten})+B} = (5000 * COP)W/K$

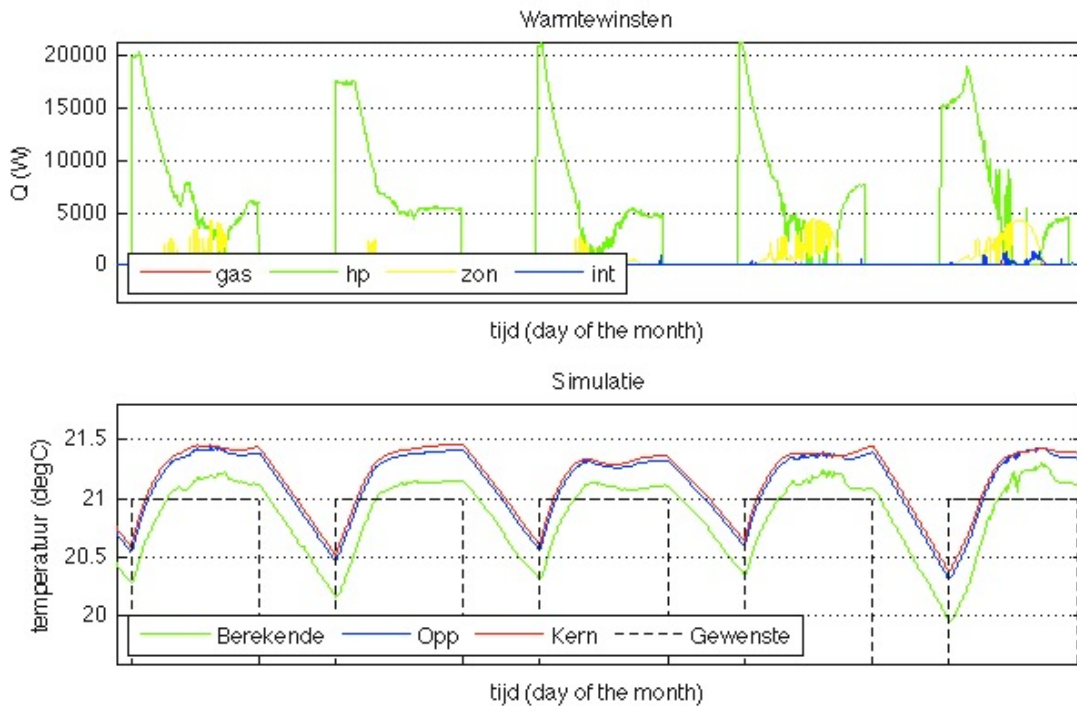


fig. 25: Simulatie van 5 dagen met $dQdT$ gelijk aan het maximale vermogen (warmtepomp).

- Gascondensatieketel: $\dot{Q}_{GK_{max}} = 15000 \text{ W/K}$

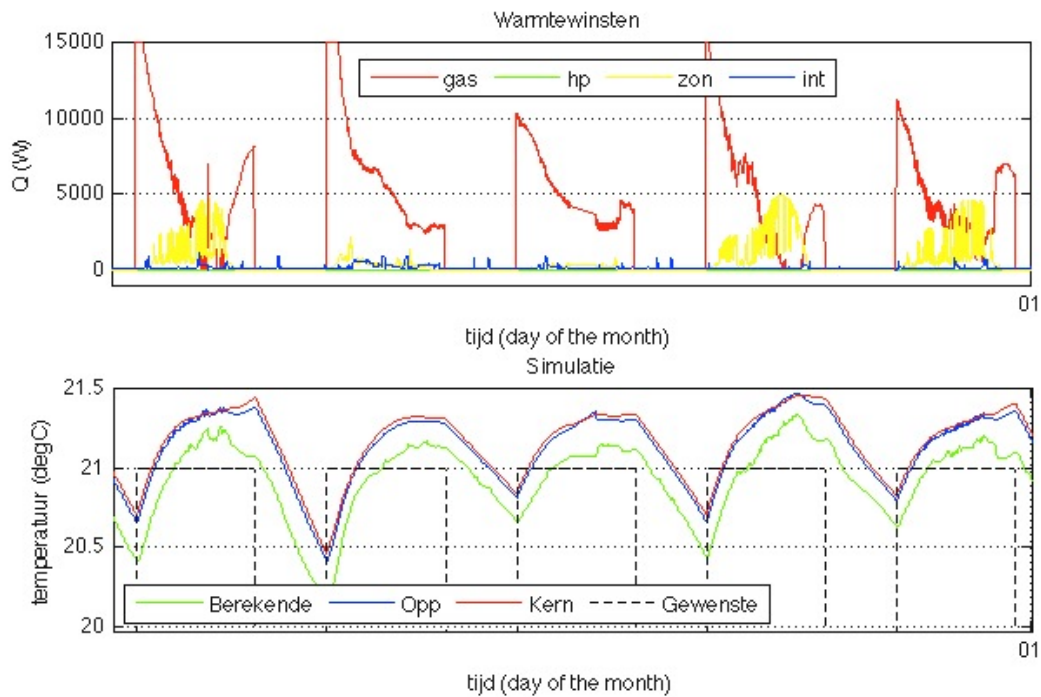


fig. 26: Simulatie van 5 dagen met dQdT gelijk aan het maximale vermogen (gascondensatieketel).

- Hybride warmtepompstelsel: $\dot{Q}_{GK_{max}} + \dot{W}_{WP_{max}} \frac{1}{A+(35-T_{huiten})+B} = (10000 + 1800 * COP) \text{ W/K}$

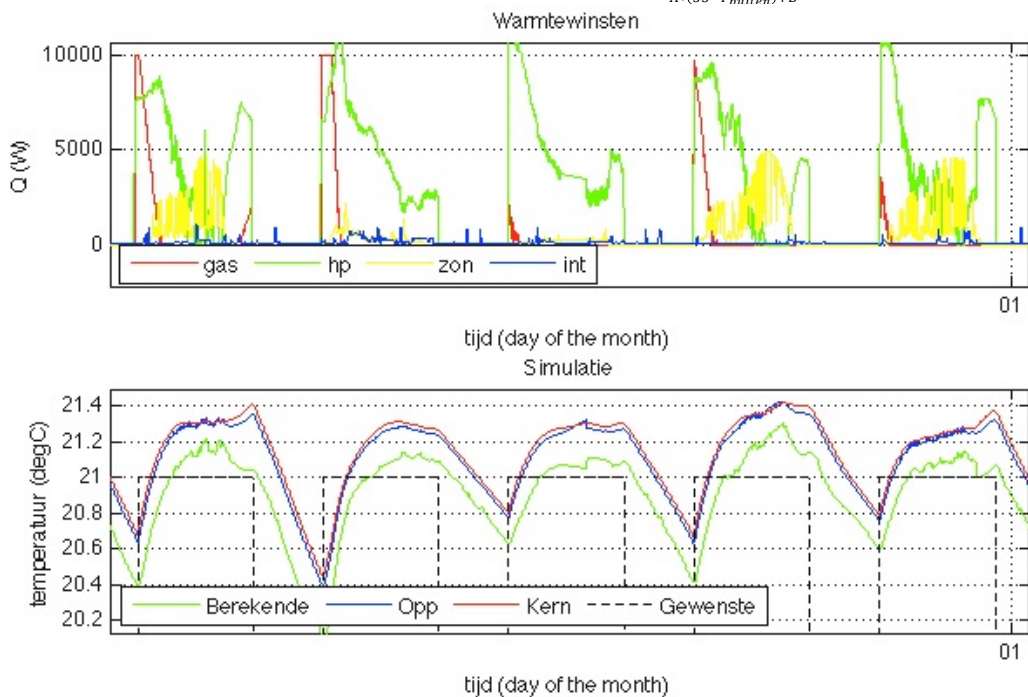


fig. 27: Simulatie van 5 dagen met dQdT gelijk aan het maximale vermogen (hybride).

Met de instelling van deze waarde zullen de systemen maximaal reageren op een verschil tussen de gewenste temperatuur en de werkelijke binnentemperatuur. Het verbruik zal dan ook aan de hoge kant liggen.

4.1.2.2 Warmtevraag verdeling

Zoals al eerder vermeld is deze woning aangesloten op een hybride warmtepompsysteem, een combinatie van een warmtepomp en gascondensatieketel. De regeling moet dus ook een keuze maken hoe de warmtevraag wordt verdeeld. Het nut van een hybride warmtepompsysteem is om de totale efficiëntie van het verwarmingssysteem te verhogen. Dit omdat een warmtepomp in de winter (dus bij koude temperaturen) een slechte COP heeft. De bedoeling van dergelijk systeem is dus om de warmtepomp zoveel mogelijk van het werk te laten doen en bij een te grote warmtevraag schiet de gascondensatieketel bij. Bij te lage temperaturen (als de marginale kost wordt overschreden) is dit omgekeerd, de gascondensatieketel doet het meeste werk en waar nodig springt de warmtepomp bij. Deze grens kunnen we eenvoudig bepalen. De gascondensatieketel heeft altijd een kost van € 0.06/kWh_{primair}, [24]:

$$\text{relatieve kost} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}_{\text{warmte}}} \right] = \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}} * \eta_{\text{GK}}} \quad (33)$$

De energie nodig om te verwarmen bij de warmtepomp is de elektrische energie verbruikt door de compressor vermenigvuldigd met de COP. De eenheidsprijs voor elektriciteit ligt op € 0.18/kWh_e, [24]:

$$\text{relatieve kost} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}_{\text{warmte}}} \right] = \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e * \text{COP}} \quad (34)$$

$$\text{relatieve kost} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}_{\text{warmte}}} \right] = \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e * \left(\frac{1}{0.0135 * (35 - T_{\text{buiten}}) - 0.172} \right)} \quad (35)$$

De relatieve kost van de warmtepomp snijdt op een bepaald punt de relatieve kost van de gascondensatieketel. De buitentemperatuur waarbij dit snijpunt voorkomt wordt de bivalente temperatuur genoemd en is in dit geval -3.4 °C, fig. 28.

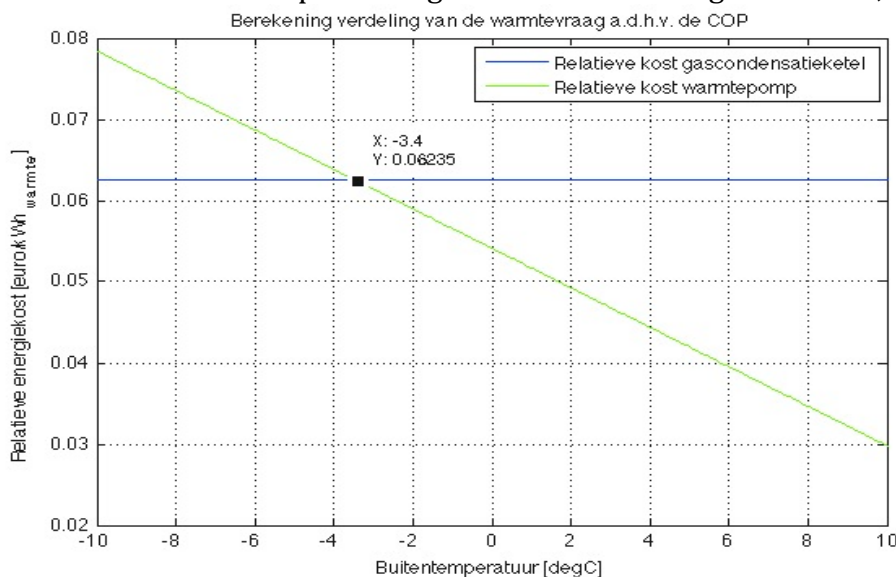


fig. 28: Relatieve kost functie met de bivalente temperatuur.

4.2 Resultaten

Vervolgens zullen het model en de verwarmingsregeling gebruikt worden voor simulaties (wat uiteindelijk de bedoeling is van het model). Het is interessant om het verbruik van de drie besproken systemen te vergelijken (hybride warmtepompsysteem, warmtepomp en gascondensatieketel). In de laatste fase van deze masterproef wordt het jaarverbruik gebruikt voor de Life Cycle Analysis (LCA). Een tweede interessante simulatie is de invloed van de gewenste temperatuur op het verbruik en dan vooral een verlaagde gewenste temperatuur.

4.2.1 Simulatie van een eengezinswoning met warmtepomp

Er wordt verondersteld dat de verwarming enkel nodig is van eind oktober tot begin mei. Vanaf oktober begint de temperatuur weer te dalen en vanaf mei bereikt de buitentemperatuur weer de 20 °C, zie fig. 29.

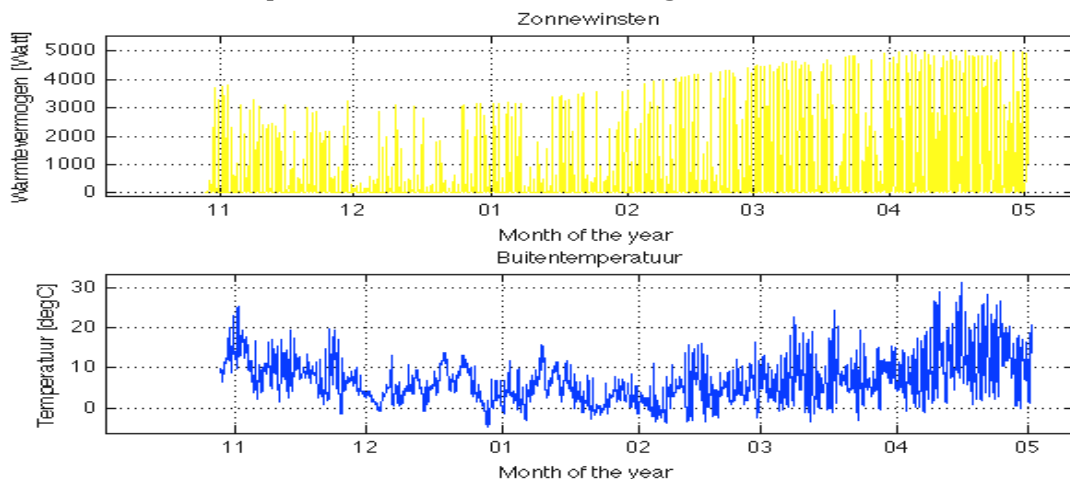


fig. 29: Buitentemperatuur en de zonnewinsten voor bepaling van de verwarmingsperiode.

De gewenste temperatuur is 21 °C (van 7u tot 22u) en 16 °C (van 22u tot 7u). Met deze voorwaarden wordt het jaarverbruik vervolgens gesimuleerd en dit voor de drie verwarmingssystemen. Als eerste wordt dat gedaan voor de warmtepomp. Het gesimuleerde jaarverbruik voor de warmtepomp bedraagt 4320.6 kWh_e. In fig. 30 is een maand van deze simulatie weergegeven.

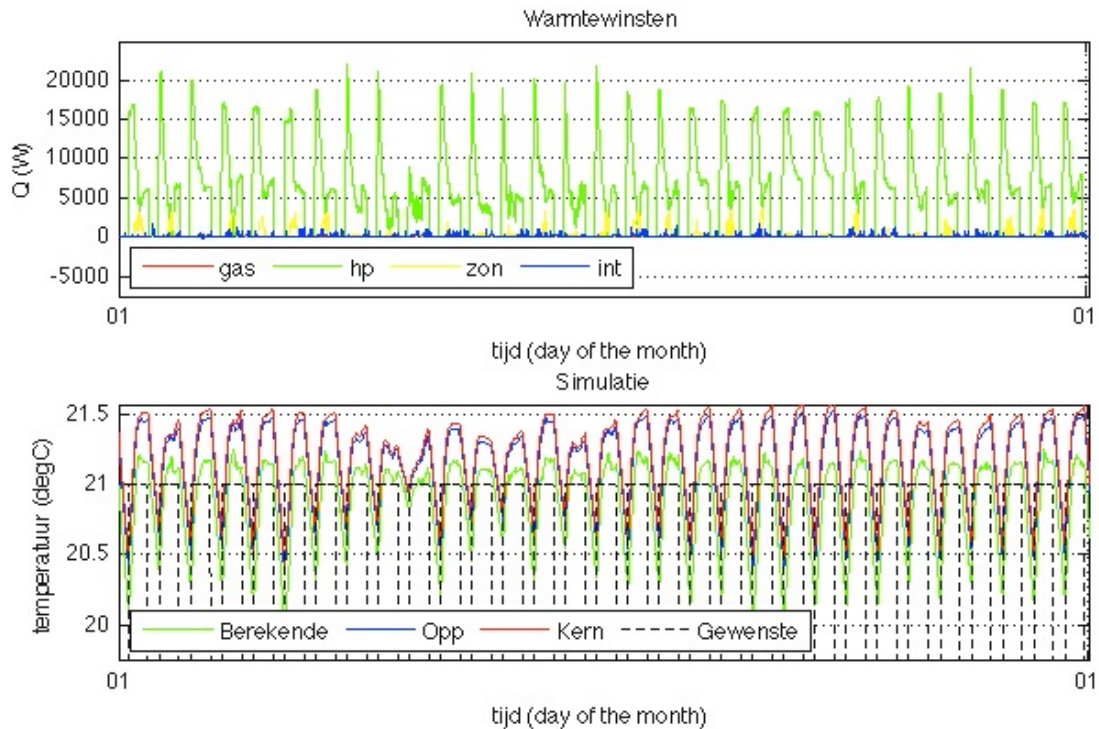


fig. 30: Simulatie met warmtepomp, $T_{\text{gewenst}} = 21^{\circ}\text{C}$ (maand maart weergegeven).

Rekening houdend met de prijs voor 1 kWh elektriciteit (0.18 eurocent per kWh_e, [24]) kan de energiefactuur dus ook berekend worden:

$$4320.6 \text{ kWh}_e * \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e} = \text{€ } 778 \quad (36)$$

4.2.2 Simulatie van een eengezinswoning met gascondensatieketel

Als tweede wordt de gascondensatieketel gebruikt als verwarmingssysteem voor de simulatie. Dit verwarmingssysteem verbruikt 17952 kWh per jaar. Dit is echter de nettowarmtevraag. Het rendement van de gascondensatieketel moet ook in rekening gebracht worden. Een rendement van 96% voor een gascondensatieketel is courant:

$$\frac{17952 \text{ kWh}_{\text{netto}}}{0.96} = 18700 \text{ kWh}_{\text{primair}} \quad (37)$$

Met een eenheidsprijs voor aardgas van 0.06 eurocent per kWh, [24], wordt dit:

$$18700 \text{ kWh}_{\text{primair}} * \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}}} = \text{€ } 1122 \quad (38)$$

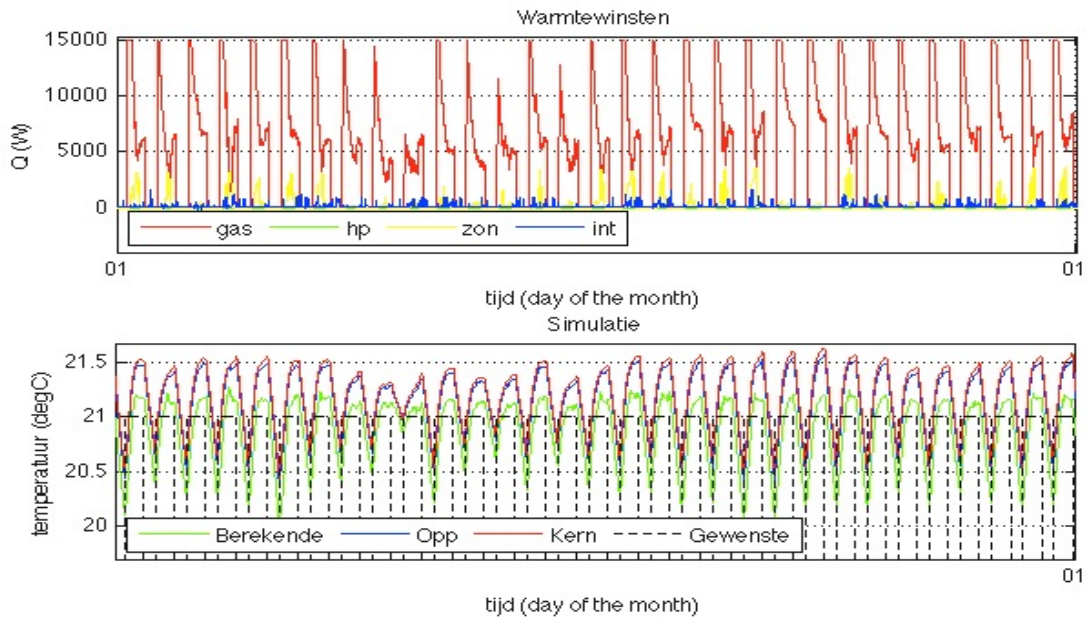


fig. 31: Simulatie met gascondensatieketel, $T_{\text{gewenst}} = 21^{\circ}\text{C}$ (maand maart weergegeven).

4.2.3 Simulatie van een eengezinswoning met hybride warmtepompsysteem

Als laatste wordt het jaarverbruik van een hybride warmtepompsysteem gesimuleerd. Uiteraard zorgt dit systeem voor een elektriciteitsverbruik én een gasverbruik. Dit systeem verbruikt per jaar zo'n 2950 kWh_e elektriciteit (warmtepomp) en 4976.1 kWh_{netto} aan gas, met een rendement van 96% komt dit neer op een gasverbruik van 5183.4 kWh_{primair}.

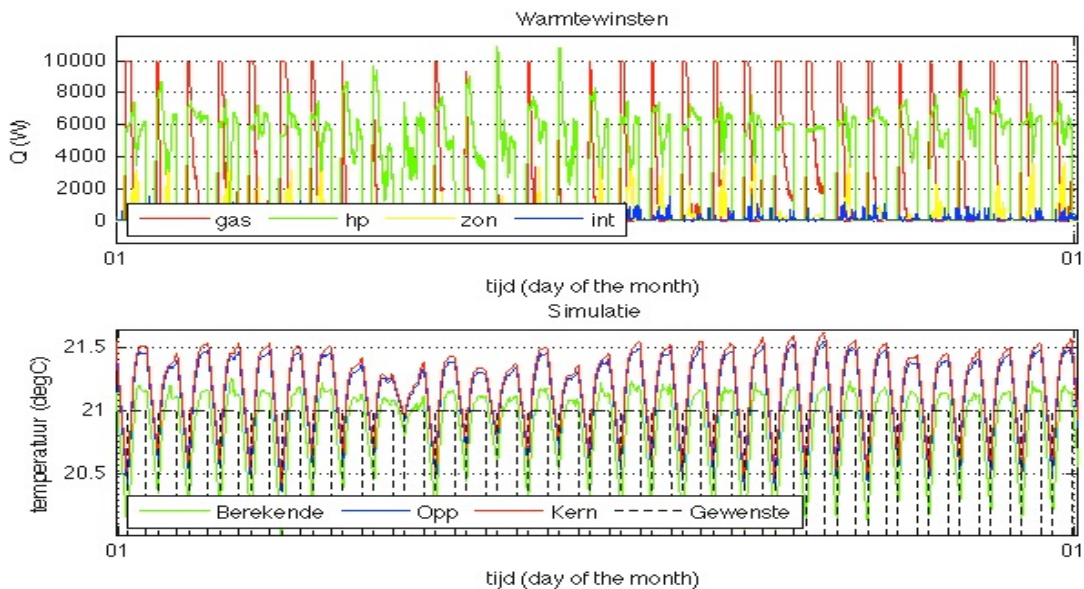


fig. 32: Simulatie met hybride warmtepompsysteem, $T_{\text{gewenst}} = 21^{\circ}\text{C}$ (maand maart weergegeven).

Met de eenheidsprijzen voor aardgas en elektriciteit wordt de energiefactuur:

$$2950 \text{ kWh}_e * \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e} + 5183.4 \text{ kWh}_{\text{primair}} * \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}}} = \text{€ } 842 \quad (39)$$

4.2.4 Simulatie met een lagere gewenste temperatuur

Een interessante simulatie is om eens na te gaan hoeveel energie men kan besparen als de gewenste temperatuur lager wordt gekozen. Het is zoals men zegt “energie besparen? - Begin bij jezelf!”.

4.2.4.1 Gewenste temperatuur gelijk aan 20 °C

- Warmtepomp: 4013.8 kWh_e

$$4013.8 \text{ kWh}_e * \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e} = \text{€ } 722 \quad (40)$$

Vergeleken met een gewenste temperatuur van 21 °C levert dit een besparing op van 7.1%.

- Gascondensatieketel: 17221 kWh_{primair}

$$17221 \text{ kWh}_{\text{primair}} * \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}}} = \text{€ } 1033 \quad (41)$$

De relatieve besparing is 7.9%. De financiële besparing is wel groter.

- Hybride warmtepompsysteem: 2784.7 kWh_e + 4601.5 kWh_{primair}

$$2784.7 \text{ kWh}_e * \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e} + 4601.5 \text{ kWh}_{\text{primair}} * \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}}} = \text{€ } 777 \quad (42)$$

Voor het elektriciteitsverbruik komt dit neer op een besparing van 5.6% en voor het gasverbruik zelfs 11.2%. In totaal is het dan een besparing van 9%.

4.2.4.2 Gewenste temperatuur gelijk aan 19 °C

- Warmtepomp: 3706.3 kWh_e

$$3706.3 \text{ kWh}_e * \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e} = \text{€ } 667 \quad (43)$$

- Gascondensatieketel: 15757 kWh_{primair}

$$15757 \text{ kWh}_{\text{primair}} * \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}}} = \text{€ } 945 \quad (44)$$

- Hybride warmtepompsysteem: 2614.1 kWh_e + 4048.1 kWh_{primair}

$$2614.1 \text{ kWh}_e * \frac{\text{€ } 0.18}{\text{kWh}_e} + 4048.1 \text{ kWh}_{\text{primair}} * \frac{\text{€ } 0.06}{\text{kWh}_{\text{primair}}} = \text{€ } 713 \quad (45)$$

Bij deze drie systemen is de relatieve besparing weer hetzelfde. Dit wil dus zeggen dat het energieverbruik i.f.v. de gewenste temperatuur lineair verloopt, zie fig. 33. Bij het hybride warmtepompsysteem zal voornamelijk het gasverbruik dalen. Dit omdat de gascondensatieketel de extra warmtevraag op zich neemt (het verschil tussen de warmtevraag en het maximale thermisch vermogen van de warmtepomp). Een lagere gewenste temperatuur betekent dus ook minder extra warmtevraag.

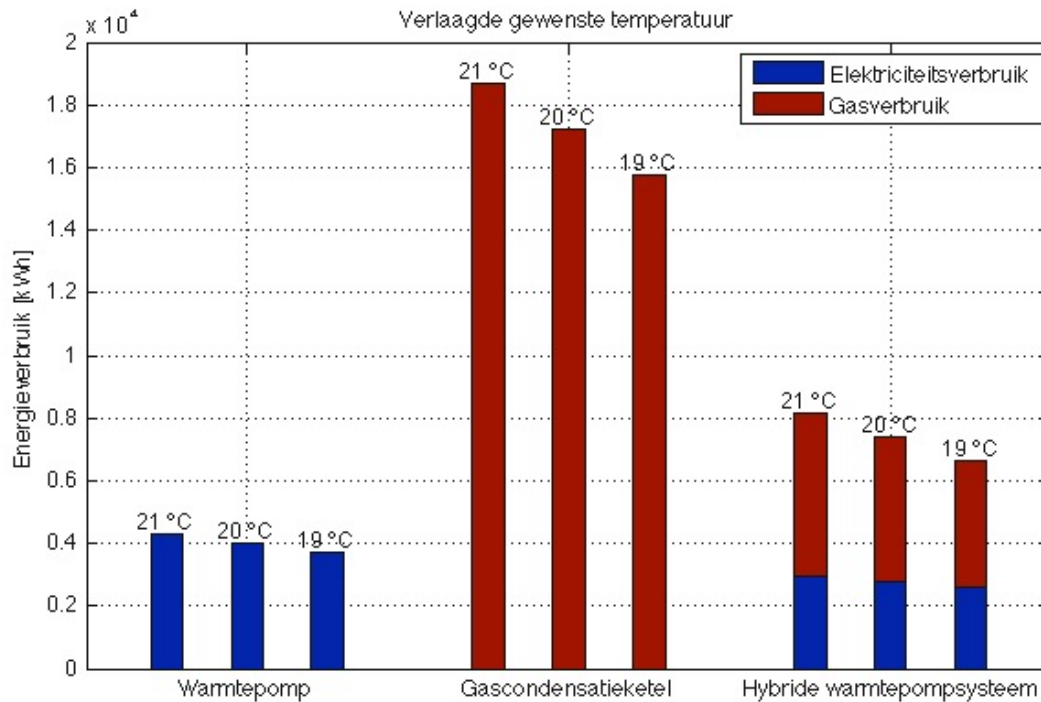


fig. 33: Verloop van het gasverbruik i.f.v. de gewenste temperatuur voor de drie besproken systemen.

4.2.5 Conclusie

Uit de simulaties blijkt dus dat een warmtepomp nog steeds goedkoper is dan een hybride warmtepompsysteem. Echter moet men wel rekening houden met het feit dat de winter van 2014-2015 relatief warm is geweest, zo is in fig. 34 te zien dat de temperatuur amper een paar momenten onder de bivalente temperatuur is gezakt:

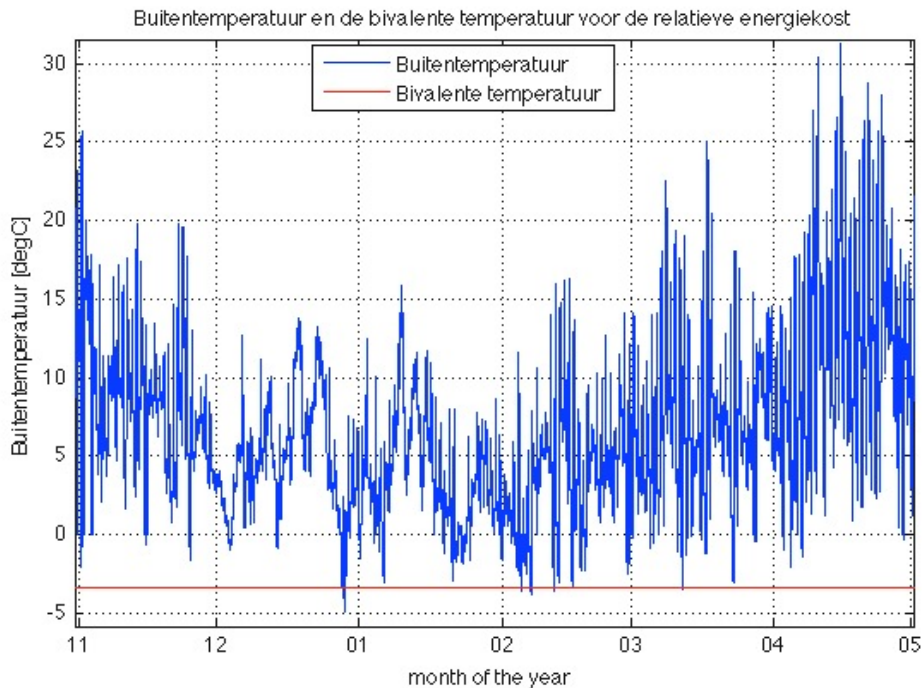


fig. 34: De buitentemperatuur over een heel jaar met de bivalente temperatuur.

In koudere klimaten is de extra aanschafkost van een hybride warmtepomp misschien wel te verantwoorden want het jaarverbruik van dit (warme) jaar lag niet veel hoger in vergelijking met de warmtepomp, het hybride warmtepompsysteem is ongeveer 7% duurder in verbruik. Ter vergelijking, de gascondensatieketel is ongeveer 30% duurder dan de warmtepomp in verbruik.

De instelparameters van de verwarmingsregeling (stooklijn) zijn echter wel handmatig gekozen. Deze parameters kunnen m.b.v. het Nelder-Mead algoritme worden geoptimaliseerd met als doel om het thermisch comfort en energieverbruik te optimaliseren.

5 Life Cycle Analysis (LCA)

Een Life Cycle Analysis (LCA) of Life Cycle Assessment is een methode om de ecologische impact van een product (of dienst) te bepalen, over de gehele levensperiode. Zo krijgt men een duidelijk overzicht van de duurzaamheid van een product of dienst. De methode voor het maken van een LCA is neergeschreven in de NBN EN ISO 14044 norm welke bestaat uit vier opeenvolgende fases:

- Doel en definitie
- Inventarisatie van de levenscyclus
- Impact analyse
- Interpretatie

5.1 LCA vergelijking warmtepomp, gascondensatieketel en hybride warmtepompsysteem

5.1.1 Doel en scope

De bedoeling van deze LCA is om een vergelijking te maken tussen de milieu-impact van een warmtepomp en deze van een gascondensatieketel. Er wordt dus uitgegaan van een duurzaam verwarmingssysteem, namelijk een warmtepomp, welke wordt vergeleken met de meest gebruikte verwarmingstechnologie zijnde een gascondensatieketel. Als derde wordt ook het hybride warmtepompsysteem geanalyseerd en vergeleken met de andere twee. De functional unit in deze analyse omvat enkel het verwarmingssysteem, dus geen distributiesysteem (vloerverwarming). Het nominaal thermisch vermogen van de besproken systemen is 15 kW.

Zoveel mogelijk processen zijn in rekening gebracht (in zo verre de data het toelaten). Als eerste wordt de productie van de producten geanalyseerd, daarna de levenscyclus en als laatste de afbraak van de producten. Deze worden beperkt tot de kunststoffen, de andere materialen worden gerecycleerd. Het onderhoud en het verlies van koelmiddel tijdens de levensloop worden niet meegerekend bij gebrek aan correcte data.

De studie wordt uitgevoerd m.b.v. openLCA, een open source LCA programma [25]. In dit programma wordt gebruik gemaakt van de ELCD database. En de gebruikte LCIA (life cycle impact assessment) methode is eco-indicator 99 [26].

5.1.2 Inventarisatie van de levenscyclus

5.1.2.1 Warmtepomp

Basismateriaal

Voor de data van de warmtepomp wordt gebruik gemaakt van volgende literatuur, [27]. De warmtepomp in deze literatuur heeft een vermogen van 10 kW. De gebruikte materialen moeten dus vermenigvuldigd worden met een omrekeningsfactor. Er wordt uitgegaan van dezelfde vermogen/gewichts verhouding. De omrekeningsfactor bedraagt dus 1.5. Voor de thermische isolatie van de koperbuizen wordt armaflex (elastomeer [28]) gebruikt. Deze wordt vervangen door polyethyleen (wat ook gebruikt wordt als isolatiemateriaal, [29]). In de literatuur maakt men onderscheid tussen staal en staallegering. De database maakt hier echter geen onderscheid tussen en gebruikt dus enkel staal (staal + staallegering samengeteld). Het gebruikte koelmiddel is R410a, wat een samenstelling is van 50% R125 (pentafluorethaan) en 50% R32 (difluormethaan). In de brochure van de gebruikte warmtepomp staat dat er 2,5 kg koelmiddel wordt gebruikt [30]. De olie wordt niet meegerekend door gebrek aan juiste data. En als isolatiemateriaal voor de elektrische bekabeling wordt er gebruik gemaakt van PVC.

Middelen

Verder spreekt men in de literatuur ook nog van het gebruik van water voor de productie van een warmtepomp. Er wordt rekening gehouden met 5.4 kg water/kg product. Voor een warmtepomp van 194.5 kg komt dit dus neer op 1050 kg of 1.05 m³.

Transport

De warmtepomp is van het merk Buderus, wat een onderdeel uitmaakt van Bosch Thermotechnology. Op de website van Bosch staat dat de elektrische warmtepompen worden geproduceerd in Tranas, Zweden [31]. Er wordt vanuit gegaan dat het transport enkel met de vrachtwagen gebeurt. Dit komt neer op ongeveer 1300 km. Vermenigvuldigd met het gewicht van het product (194.5kg) is dit 252.85 ton*km.

Energie

Volgens de gebruikte literatuur is er 777.78 kWh energie nodig om een warmtepomp te maken en installeren. De helft komende van warmte (gas) en de helft van elektriciteit [27]. Het elektriciteitsverbruik over de gehele levenscyclus kan bepaald worden m.b.v. het thermisch model, simulatie van het jaarverbruik. De studie wordt gedaan met drie verschillende elektriciteitconfiguraties:

- Elektriciteitspark 1: nucleair

Wind	0.0758%
Bruinkool	0.2259%
Zon	0.364%
Water	1.129%
Steenkool	12.8%
Nucleair	67.56%
Aardgas	16.09%
Stookolie	1.67%
Andere	0.0802%

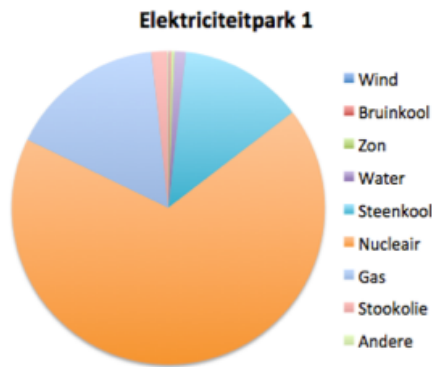


fig. 35: Elektriciteitspark 1.

- Elektriciteitspark 2: voornamelijk fossiele brandstoffen

Wind	2.43%
Bruinkool	25%
Zon	0.2136%
Water	2.1359%
Steenkool	22.06%
Nucleair	37.5%
Aardgas	9.1179%
Stookolie	1.479%
Andere	0.0628%

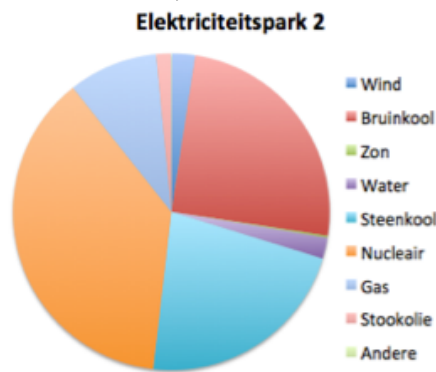


fig. 36: Elektriciteitspark 2.

- Elektriciteitspark 3: 100% hernieuwbare energie

Een derde vergelijking is het gebruik van de warmtepomp en hybride warmtepompsysteem in combinatie met hernieuwbare energie, in dit geval 100% windenergie.

De gebruikte database beschikt niet over het correcte elektriciteitspark van België. Als alternatief is het dus eens interessant om verschillende elektriciteitsparken te bekijken en hun impact op de duurzaamheid van een warmtepomp (en hybride warmtepompsysteem). In fig. 37 is de werkelijke elektriciteitsproductie van België in 2013 te zien.

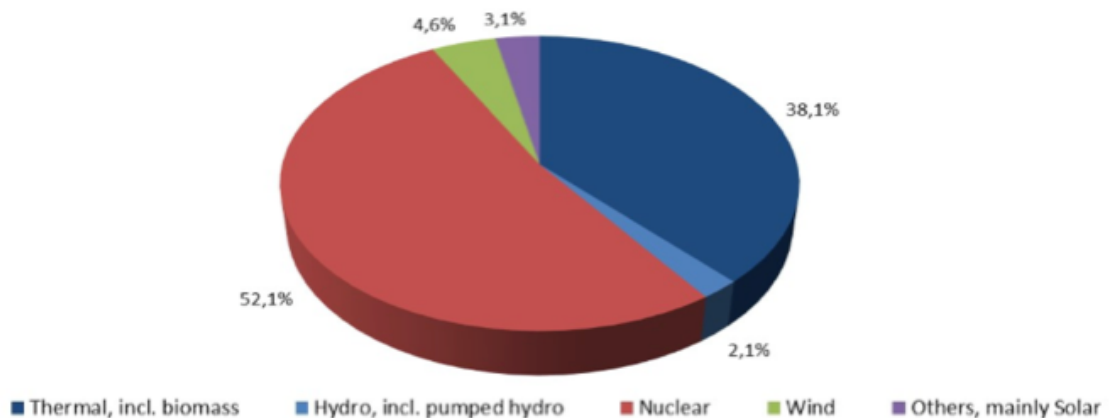


fig. 37: Elektriciteitsproductie in België 2013 [32].

Afval en emissies

Er wordt vanuit gegaan dat al het materiaal wordt gerecycleerd, buiten polyethyleen en PVC. De energie nodig voor recyclage komt echter niet voor in de database (gebrek aan correcte data). Hier wordt dus geen rekening mee gehouden. De kunststoffen worden gebruikt als brandstof in een afvalverwerkingsbedrijf (elektriciteitsproductie).

In de literatuur gaat men uit van 3% koelmiddel dat ontsnapt tijdens de productie. Bij het ontmantelen is dit een verlies van 20%. Over heel de levenscyclus gaat er dus 23% van het koelmiddel verloren, door emissie. Op 2.5 kg koelmiddel is dit 0.575 kg. Tabel 1 geeft een overzicht van de LCI.

Tabel 1: Life Cycle Inventory (LCI) van een warmtepomp 15 kW.

Input	Omschrijving	Hoeveelheid	Eenheid
Basismateriaal			
	Staal	142.5	kg
	Koper	33	kg
	Polyethyleen	15	kg
	PVC	1.5	kg
	R410a	2.5	kg
Middelen			
	Water	1.05	m ³
Transport			
	Transport, vrachtwagen	252.85	t*km
Energie			
	Productie, gas	388.9	kWh
	Productie, elektriciteit	388.9	kWh
	Elektriciteitsverbruik, 20j	80410	kWh
Output	Omschrijving	Hoeveelheid	Eenheid
Afval			
	Polyethyleen	15	kg
	PVC	1.5	kg
Emissies			
	R410a	0.575	kg

5.1.2.2 Gascondensatieketel

Basismateriaal

Voor de gascondensatieketel zijn de gegevens gebaseerd op volgende paper, [33]. In de paper wordt er gebruik gemaakt van gascondensatieketel van 10 kW (omrekeningsfactor is gelijk aan 1.5), hier wordt er echter wel rekening gehouden met het distributiesysteem (pompen, leidingen en radiatoren). In deze LCA beperkt zich tot de gascondensatieketel zelf.

Net als bij de warmtepomp wordt geen onderscheid gemaakt tussen staal en staallegering.

Transport

De gascondensatieketel is, net als de warmtepomp, van het merk Buderus, op de site van Bosch Thermotechnology kan de mogelijke locatie van de productie worden afgeleid. Hieruit blijkt dat de fabriek in Wernau, Duitsland het meest waarschijnlijk is [31]. Dit komt neer op ongeveer 580 km, met het gewicht in rekening gebracht (189 kg) komt dit neer op 109.62 ton*km.

Energie

Bij gebrek aan de juiste gegevens wordt er vanuit gegaan dat er evenveel energie nodig is voor een gascondensatieketel als voor een warmtepomp (777.78 kWh). 50% uit de verbranding van gas en 50% elektriciteit. Het gasverbruik wordt ook gehaald uit de simulaties.

Afval

Net als bij de warmtepomp wordt het meeste gerecycleerd. De polystyreen wordt gebruikt als brandstof in een afvalverwerkingsbedrijf. Tabel 2 geeft een overzicht van alle in- en outputs.

Tabel 2: Life Cycle inventory (LCI) van een gascondensatieketel 15 kW.

Input	Omschrijving	Hoeveelheid	Eenheid
Basismateriaal			
	Staal	172.5	kg
	Koper	4.5	kg
	Aluminium	11.25	kg
	Polystyreen	0.75	kg
Transport			
	Transport, vrachtwagen	109.62	t*km
Energie			
	Productie, gas	388.9	kWh
	Productie, elektriciteit	388.9	kWh
	Warmtevraag gas, 20j	434280	kWh
Output	Omschrijving	Hoeveelheid	Eenheid
Afval			
	Polystyreen	0.75	kg

5.1.2.3 Hybride warmtepompsysteem

Bij het hybride warmtepompsysteem heeft de warmtepomp een thermisch vermogen (nominaal) van 5 kW en de gascondensatieketel 10 kW. De LCI is geïllustreerd in Tabel 3.

Tabel 3: Life Cycle inventory (LCI) van een hybride warmtepompsysteem 15 kW.

Input	Omschrijving	Hoeveelheid	Eenheid
Basismateriaal			
	Staal	162.5	kg
	Koper	14	kg
	Aluminium	7.5	kg
	Polyethyleen	5	kg
	Polystyreen	0.5	kg
	PVC	0.5	kg
	R410a	2.5	kg
Transport			
	Transport, vrachtwagen	155	t*km
Energie			
	Productie, gas	777.8	kWh
	Productie, elektriciteit	777.8	kWh
	Elektriciteitsverbruik, 20j	63426	kWh
	Warmtevraag gas, 20j	65982	kWh
Output	Omschrijving	Hoeveelheid	Eenheid
Afval			
	Polyethyleen	5	kg
	Polystyreen	0.5	kg
	PVC	0.5	kg
Emissies			
	R410a	0.575	kg

5.1.3 Impact analyse (LCIA)

Om de impact van de producten te analyseren wordt de “life cycle inventory” (LCI) gebruikt als input voor de eco-indicator 99 methode [26]. Een overzicht van deze methode vind je in fig. 38. In een eerste stap worden de gebruikte middelen (brandstoffen, metalen, etcetera) verzameld alsook de uitstoten van schadelijke stoffen (Resource, land use en fate analysis). Vervolgens wordt gekeken in welke mate dit effect heeft op mens en milieu (exposure en effect analysis). Als derde stap wordt dit omgerekend naar een schade, volgens drie categorieën:

- Schade aan het ecosysteem (Ecosystems)
- Schade aan de menselijke gezondheid (Human Health)
- Schade aan minerale en fossiele bronnen (Resources)

In de laatste stap worden de drie categorieën verzameld en wordt er een dimensieloze single score indicator berekend (normalization and weighting).

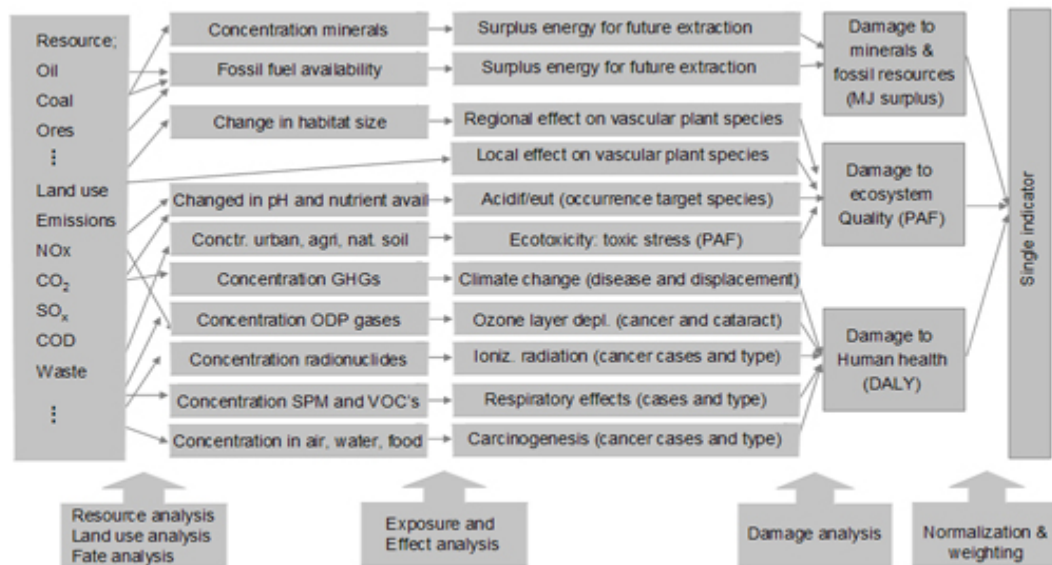


fig. 38: Overzichtsschema van de LCIA-methode "eco-indicator 99" [34].

De categorie Human health heeft als eenheid 'DALY', Disabled Adjusted Life Years, en houdt rekening met het aantal levensjaren dat men minder zal leven dan de levensverwachting. Dit wordt vervolgens uitgedrukt in een cijfer tussen 0 en 1 (met 1 gelijk aan de dood).

De categorie Ecosystems heeft als eenheid 'PDF*m²*year', Potentially Disappeared Fraction per m² per jaar.

En voor de categorie Resources is de eenheid 'MJ surplus energy'. Dit geeft weer hoeveel extra energie men nodig zal hebben in de toekomst om minerale of fossiele stoffen te ontginnen. Dit omdat deze bronnen natuurlijk uitputten.

5.1.3.1 Warmtepomp

In openLCA zijn de productie en de levensloop van de warmtepomp nu gedefinieerd. fig. 39 geeft een overzicht van de processen betrokken bij dit model.

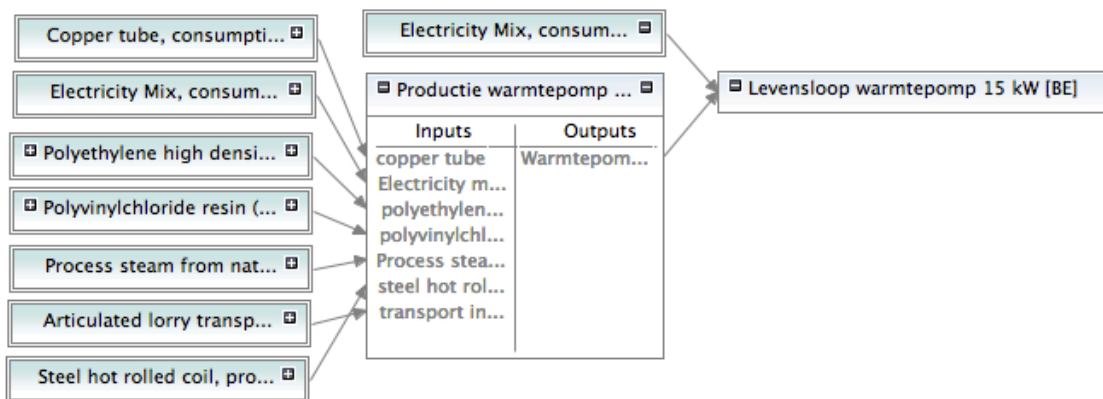


fig. 39: Overzicht van alle processen tijdens de levensloop van een warmtepomp.

De materialen gebruikt voor de productie van de warmtepomp moeten uiteraard ook geproduceerd worden, of verwerkt. Dit schema geeft een overzicht van de betrokken productieprocessen. De calculatie met de eco-indicator 99 methode geeft volgende resultaten:

- Elektriciteitspark 1: nucleaire energie (zie fig. 35)

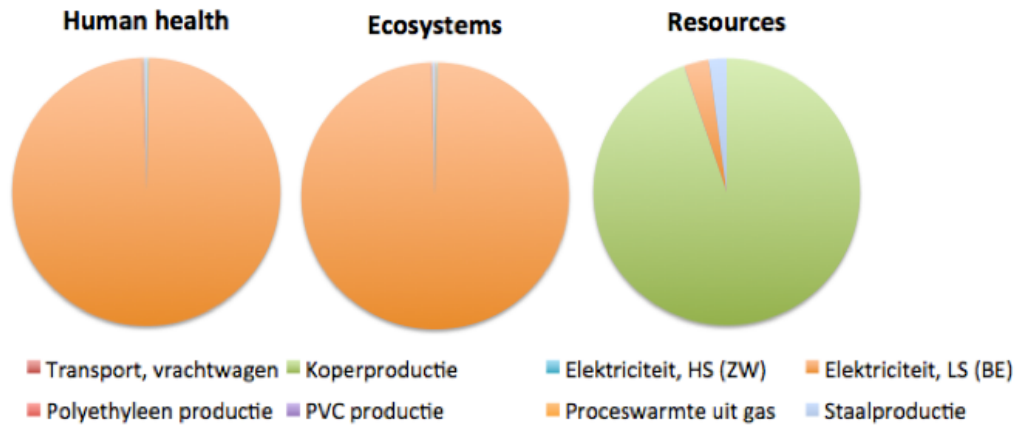


fig. 40: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een warmtepomp (elektriciteitspark 1).

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [M] surplus energy]
Transport	3,860E-06	0,563	0,0009
Koperproductie	1,120E-05	0,645	54,346
Elektriciteit, HS (ZW)	1,080E-05	0,333	0,021
Elektriciteit, LS (BE)	0,011	425,000	1,747
Polyethyleen productie	1,081E-05	0,341	0,00066
PVC productie	8,545E-07	0,037	0,009
Proceswarmte, aardgas	2,030E-05	0,403	0,0027
Staalproductie	3,270E-05	1,265	1,243

Tabel 4: LCIA resultaten voor de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 1.

Tabel 4 geeft een overzicht van de impact van alle processen op de drie categorieën.

Het elektriciteitsverbruik heeft logischer wijze de grootste impact. De productie van elektriciteit gebeurt met verschillende technologieën, die per land verschillen. Vaak gebeurt dit ook nog met fossiele brandstoffen. Dat verklaart dan ook de schade aan het ecosysteem (vervuiling van rivieren) en de menselijke gezondheid (koolstofdioxiden, stikstofdioxiden,...). In de categorie Resources is duidelijk te zien dat de koperproductie de grootste impact heeft, zie fig. 40. De toenemende koperproductie sinds enkele decennia heeft een grote invloed op de voorraad van koperertsen [35], [36]. Dit zorgt voor een daling van de koperinhoud van deze ertsen waardoor men steeds meer energie nodig heeft om koper te ontginnen [37].

- Elektriciteitspark 2: fossiele brandstoffen (zie fig. 36)

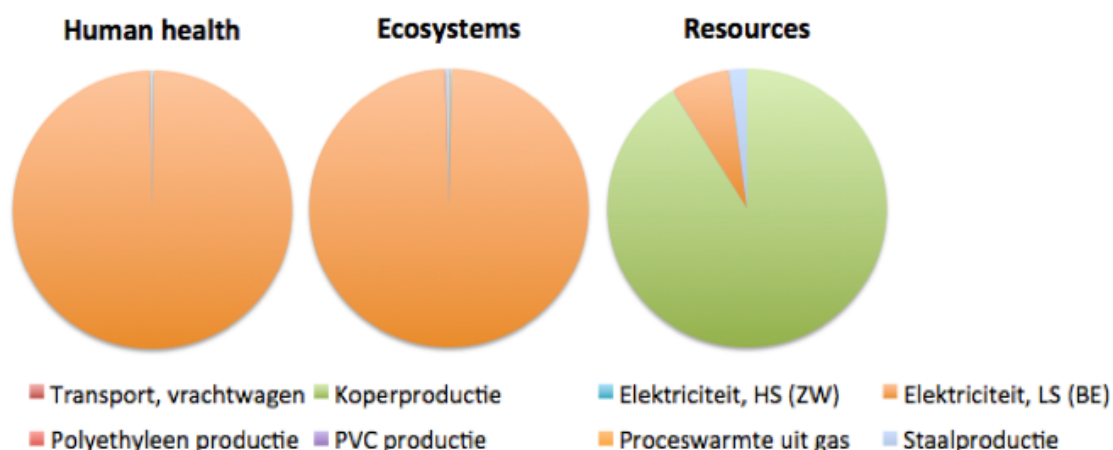


fig. 41: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een warmtepomp (elektriciteitspark 2).

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [M] surplus energy]
Transport	3,860E-06	0,563	0,00086
Koperproductie	1,120E-05	0,645	54,35
Elektriciteit, HS (ZW)	1,080E-05	0,333	0,021
Elektriciteit, LS (BE)	0,016	386,000	4,083
Polyethyleen productie	1,081E-05	0,341	0,00066
PVC productie	8,545E-07	0,037	0,009
Proceswarmte, aardgas	2,030E-05	0,403	0,0027
Staalproductie	3,265E-05	1,265	1,243

Tabel 5: LCIA resultaten voor de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 2.

In Tabel 5 zijn de impacten van alle processen op elke categorie weergegeven. Het effect van het elektriciteitsverbruik (van de warmtepomp) op de menselijke gezondheid is ongeveer gestegen met 30%. Het gebruik van fossiele brandstoffen heeft dus duidelijk een effect op de menselijke gezondheid. De invloed van het elektriciteitsverbruik op het ecosysteem is echter gedaald. Dit valt misschien te verklaren doordat kerncentrales meer plaats in beslag nemen (land use). Ook de opslag van radioactief afval kan hier een invloed op hebben. Bij de ontginning van uranium wordt er een deel opgenomen door het ecosysteem. De uranium-concentratie stijgt dus, dit noemt men uranium bioaccumulatie [38].

- Elektriciteitspark 3: windenergie

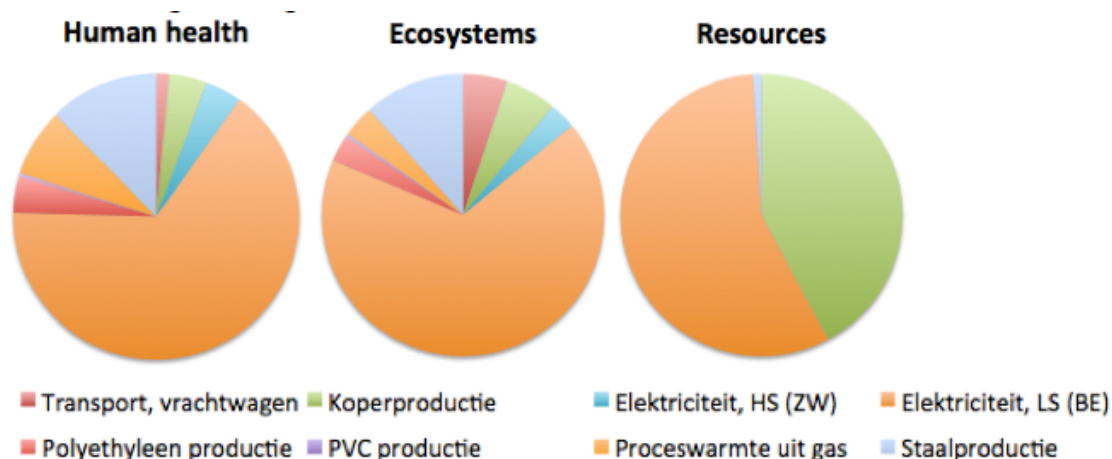


fig. 42: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een warmtepomp (elektriciteitspark 3).

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [MJ surplus energy]
Transport	3,860E-06	0,563	0,00086
Koperproductie	1,120E-05	0,645	54,346
Elektriciteit, HS (ZW)	1,080E-05	0,333	0,021
Elektriciteit, LS (BE)	0,00017	7,400	73,390
Polyethyleen productie	1,081E-05	0,341	0,00066
PVC productie	8,545E-07	0,037	0,009
Proceswarmte, aardgas	2,030E-05	0,403	0,0027
Staalproductie	3,270E-05	1,265	1,243

Tabel 6: LCIA resultaten voor de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 3.

Het is algemeen geweten dat hernieuwbare energiebronnen beter zijn voor het milieu. Deze analyse bevestigt dit ook, Tabel 6 geeft een overzicht van alle impacten.

De impact op de menselijke gezondheid is ongeveer afgenomen met 98% (t.o.v. elektriciteitspark 2). Deze daling geldt ook voor het ecosysteem (98%). De impact op de categorie Resources is echter wel drastisch toegenomen (fig. 42). Deze is 18 keer groter geworden dan bij elektriciteitspark 2. Uit verdere analyse van het openLCA-rapport blijkt dat dit te wijten is aan het gebruik van koper. Volgens deze studie, [39], heeft het gebruik van hernieuwbare energie (zoals windenergie en zonne-energie) een toename van de koperproductie tot gevolg. Dit heeft dan weer een invloed op de kopervoorraad [35], [36].

5.1.3.2 Gascondensatieketel

Net hetzelfde als bij de warmtepomp zijn de productie en levensloop van de gascondensatieketel eerst gedefinieerd. In fig. 43 zie je de processen die bij de productie en levensloop van een gascondensatieketel betrokken zijn.

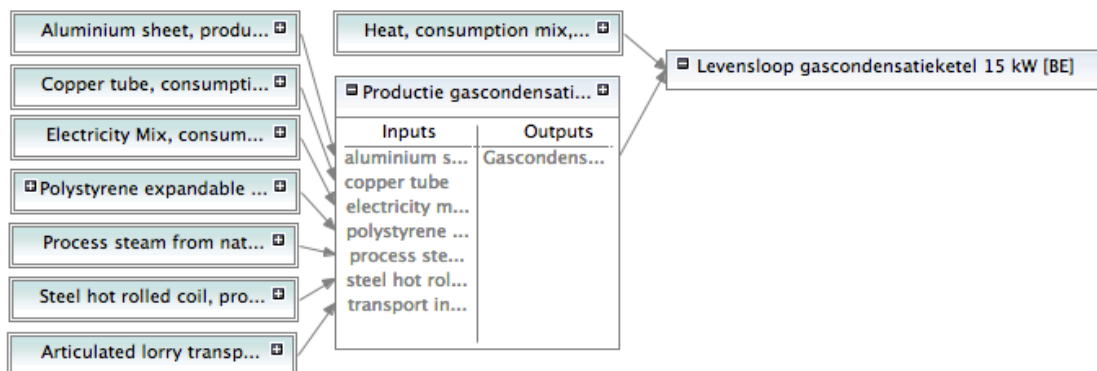


fig. 43: Overzicht van alle processen tijdens de levensloop van een gascondensatieketel.

Met dit LCA-model wordt de milieu-impact van de gascondensatieketel geanalyseerd. De impact op de drie categorieën is weergegeven in fig. 44 en Tabel 7.

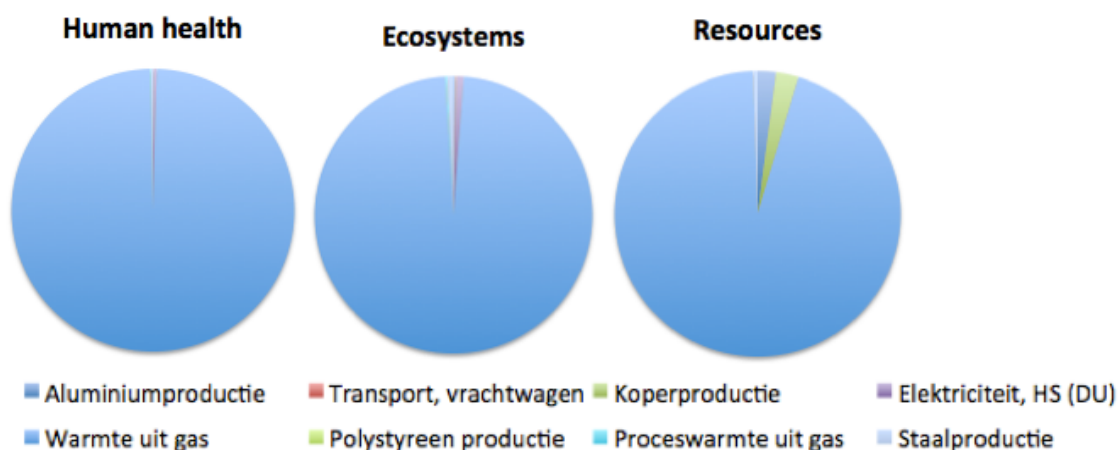


fig. 44: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een gascondensatieketel.

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [M] surplus energy]
Aluminiumproductie	1,410E-05	0,4189	6,006
Transport	1,673E-06	0,244	0,00037
Koperproductie	1,531E-06	0,088	7,411
Elektriciteit, HS (DU)	6,878E-05	1,680	0,0178
Warmte uit aardgas	0,019	198,425	273,225
Polystyreen productie	9,001E-07	0,027	0,006
Proceswarmte, aardgas	2,184E-05	0,464	0,023
Staalproductie	3,953E-05	1,532	1,504

Tabel 7: LCIA resultaten voor de gascondensatieketel.

De verbranding van aardgas heeft hier duidelijk een grote impact op het milieu. Hetzelfde als bij de warmtepomp heeft het energieverbruik tijdens de levensloop van het systeem de grootste invloed op het milieu. De verbranding van aardgas heeft een grote impact op de menselijke gezondheid. Vergeleken met de warmtepomp in combinatie met elektriciteitspark 2 stijgt de impact op de menselijke gezondheid met 17%.

Verder is te zien dat het effect op het ecosysteem behoorlijk groot is door het gebruik van aardgas. Verbranding van aardgas zorgt voor een CO₂-uistoot. De CO₂-concentratie in de lucht stijgt dus en wordt uiteindelijk voor een groot deel opgenomen door de oceaan. Dit zorgt voor een afname van de pH-waarde (oceanverzuring) [40]. De ontginning van aardgas voor de gascondensatieketel heeft ook een grote invloed op de toekomstige ontginning van aardgas aangezien de voorraad langzaam uitdunt. Dit verklaart dan ook de grote waarde in de categorie Resources.

5.1.3.3 Hybride warmtepompsysteem

Een hybride warmtepompsysteem combineert een warmtepomp en gascondensatieketel en de productie van deze beide producten worden dus in rekening gebracht. Enkel bij de levensloop verandert de verdeling tussen de energievoorziening (gas en elektriciteit). Het gas- en elektriciteitsverbruik wordt gehaald uit de simulatie met het thermisch model over een periode van een jaar. Zo is het jaarverbruik van dit systeem gekend. Er wordt weer uitgegaan van een levensduur van 20 jaar.

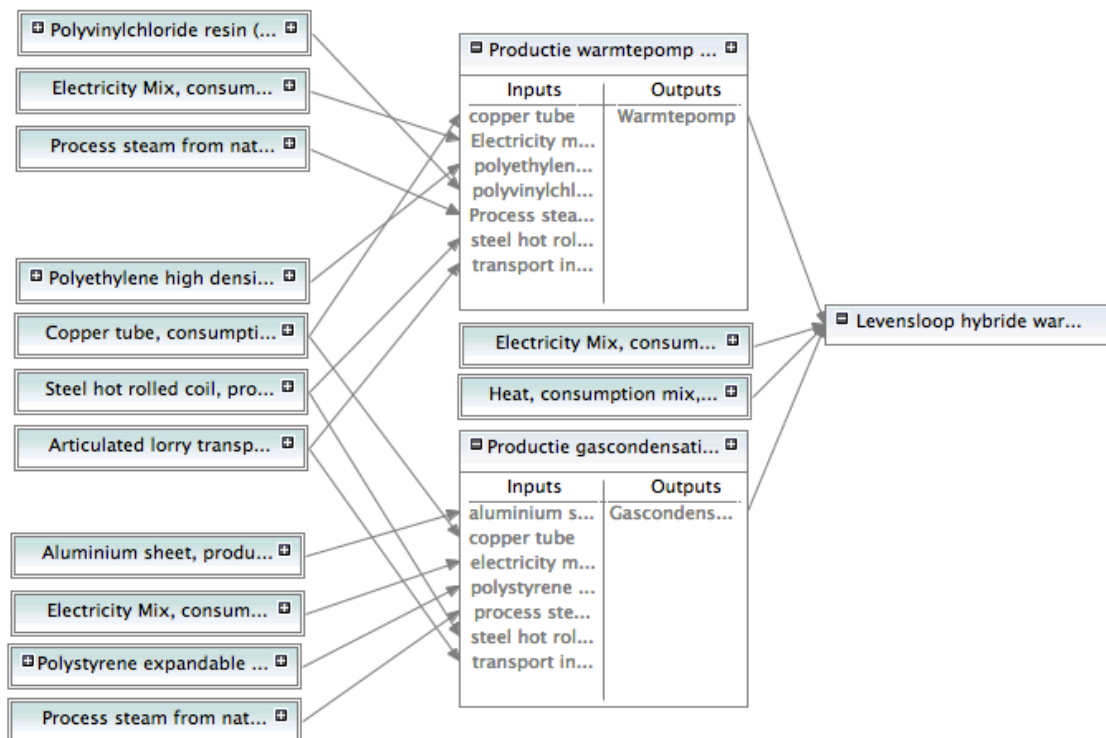


fig. 45: Overzicht van alle processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem.

Net als bij de warmtepomp worden er drie vergelijkingen gedaan, telkens met een ander elektriciteitspark:

- Elektriciteitspark 1: nucleaire energie (zie fig. 35)

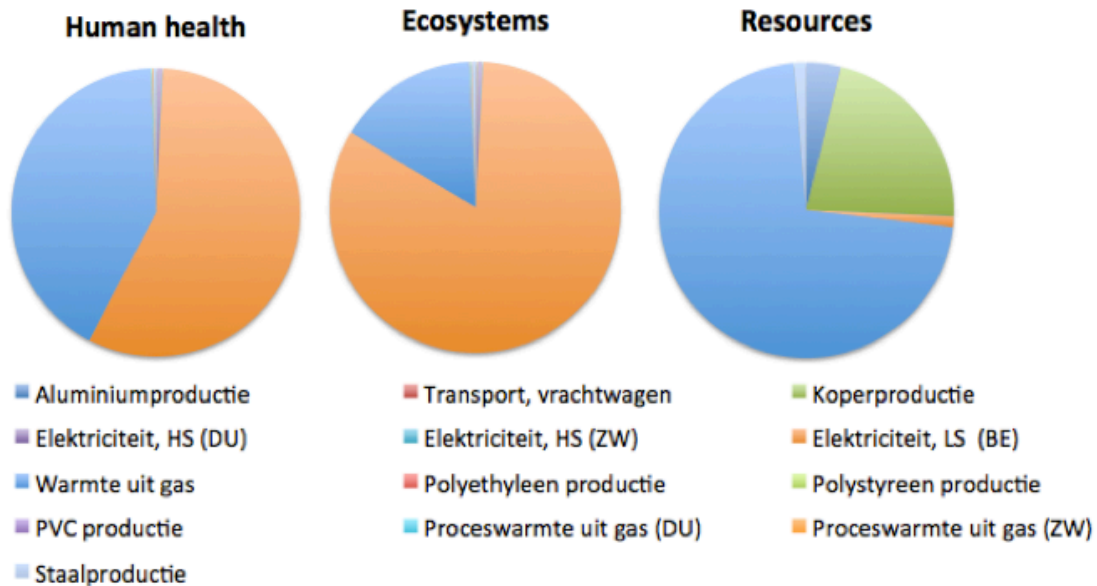


fig. 46: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem (elektriciteitspark 1).

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [M] surplus energy]
Aluminiumproductie	9,395E-06	0,279	4,004
Transport	2,365E-06	0,345	0,00053
Koperproductie	4,764E-06	0,274	23,056
Elektriciteit, HS (DU)	6,878E-05	1,680	0,018
Elektriciteit, HS (ZW)	1,083E-05	0,333	0,021
Elektriciteit, LS (BE)	0,0072	290,176	1,193
Warmte uit aardgas	0,0053	55,011	75,748
Polyethyleen productie	3,603E-06	0,114	0,00022
Polystyreen productie	6,000E-07	0,018	0,0039
PVC productie	2,848E-07	0,012	0,003
Proceswarmte, aardgas	2,184E-05	0,464	0,023
Proceswarmte, aardgas	2,030E-05	0,403	0,0027
Staalproductie	3,723E-05	1,443	1,417

Tabel 8: LCIA resultaten voor het hybride warmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 1.

Tabel 8 geeft een overzicht van de impact van alle processen op de drie categorieën. Als er gekeken wordt naar de impact op de menselijke gezondheid dan is duidelijk dat het hybride warmtepompsysteem minder impact heeft dan de gascondensatieketel (34% minder). Maar het hybride warmtepompsysteem is nog altijd schadelijker voor de gezondheid dan de warmtepomp (18% schadelijker). Het elektriciteitsverbruik heeft ook een grote invloed op het ecosysteem. Elektriciteitscentrales zijn vaak gelegen naast een rivier (voor koelwater).

De verhoogde concentratie van deze schadelijke stoffen in het water is slecht voor de biodiversiteit in het water als gevolg van oceaanzuring en eutrofiëring (verhoging van de voedselwaarden) [41].

- Elektriciteitspark 2: fossiele brandstoffen (zie fig. 36)

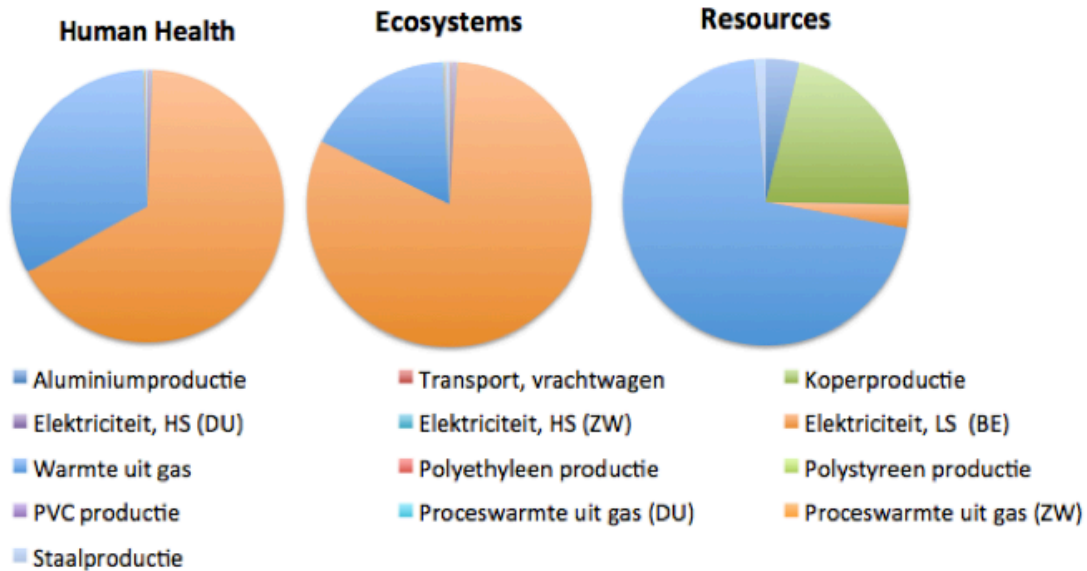


fig. 47: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem (elektriciteitspark 2).

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [M] surplus energy]
Aluminiumproductie	9,395E-06	0,279	4,004
Transport	2,365E-06	0,345	0,00053
Koperproductie	4,764E-06	0,274	23,056
Elektriciteit, HS (DU)	6,878E-05	1,680	0,018
Elektriciteit, HS (ZW)	1,083E-05	0,333	0,021
Elektriciteit, LS (BE)	0,011	263,554	2,788
Warmte uit aardgas	0,0053	55,011	75,748
Polyethyleen productie	3,603E-06	0,114	0,00022
Polystyreen productie	6,000E-07	0,018	0,0039
PVC productie	2,848E-07	0,012	0,003
Proceswarmte, aardgas	2,184E-05	0,464	0,023
Proceswarmte, aardgas	2,030E-05	0,403	0,0027
Staalproductie	3,723E-05	1,443	1,417

Tabel 9: LCIA resultaten voor het hybride warmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 2.

In Tabel 9 zijn de impacten van alle processen op de drie categorieën te zien. Het gebruik van fossiele brandstoffen voor de productie van elektriciteit zorgt ervoor dat de impact op de menselijke gezondheid stijgt, 28% t.o.v. hybride warmtepompsysteem met elektriciteitspark 1, wat ook het geval is bij de warmtepomp.

- Elektriciteitspark 3: windenergie

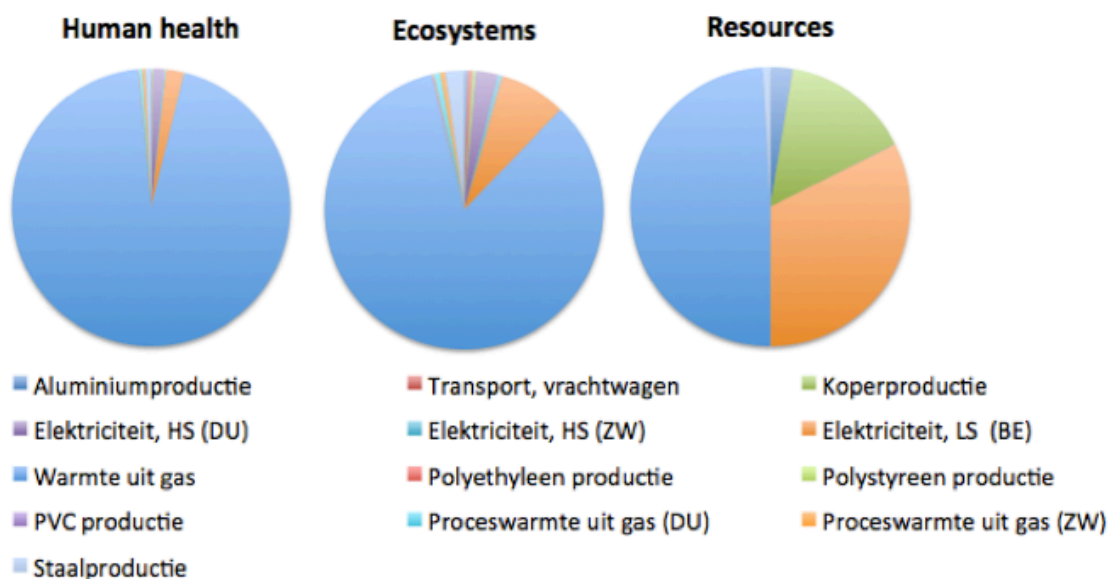


fig. 48: Impact op de drie categorieën van de betrokken processen tijdens de levensloop van een hybride warmtepompsysteem (elektriciteitspark 3).

Proces	Human health [DALY]	Ecosystems [PDF.m ² .year]	Resources [M surplus energy]
Aluminiumproductie	9,395E-06	0,279	4,004
Transport	2,365E-06	0,345	0,00053
Koperproductie	4,764E-06	0,274	23,056
Elektriciteit, HS (DU)	6,878E-05	1,680	0,0178
Elektriciteit, HS (ZW)	1,083E-05	0,333	0,021
Elektriciteit, LS (BE)	0,00012	5,051	50,108
Warmte uit aardgas	0,0053	55,011	75,748
Polyethyleen productie	3,603E-06	0,114	0,00022
Polystyreen productie	6,000E-07	0,018	0,0039
PVC productie	2,848E-07	0,012	0,003
Proceswarmte, aardgas	2,184E-05	0,464	0,023
Proceswarmte, aardgas	2,030E-05	0,403	0,0027

Tabel 10: LCIA resultaten voor het hybride warmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 3.

Door gebruik te maken van hernieuwbare energie daalt de impact van het elektriciteitsverbruik. De verbranding van aardgas is echter wel nog steeds aanwezig en zorgt dus nog voor een impact op de menselijke gezondheid als gevolg van CO₂-uistoot.

5.1.4 Interpretatie

In 5.1.3 zijn de drie systemen telkens apart geanalyseerd. Het is echter interessant om deze drie systemen naast elkaar te vergelijken. Met de single score indicator kunnen de drie systemen op eenvoudige wijzen vergeleken worden met elkaar. De eco-indicator 99 methode rekent een single score uit, uitgedrukt in punten. Het is ook eens interessant om de milieu-impact van productie en levensloop te bekijken.

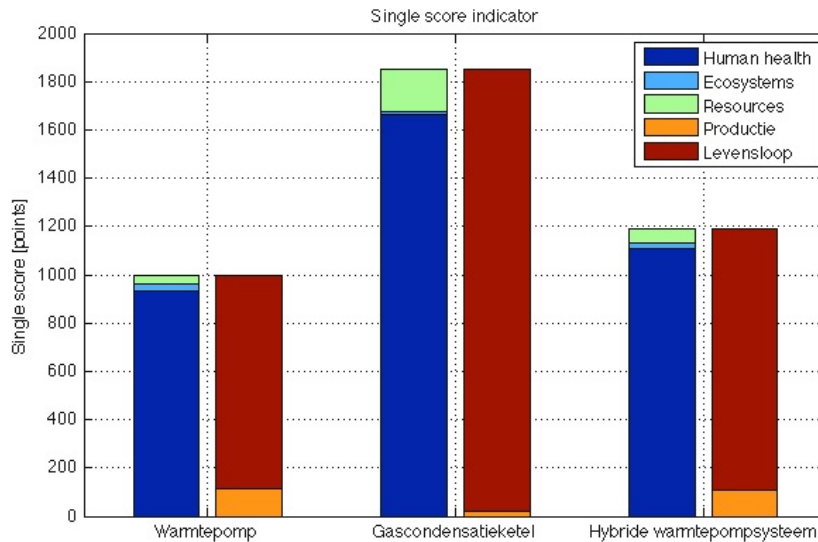


fig. 49: Single score indicator met elektriciteitspark 1.

In fig. 49 is te zien dat de productie van de wärmtepomp een grotere impact heeft dan de productie van de gascondensatieketel of zelfs het hybride wärmtepompsysteem. De wärmtepomp heeft ook de meeste materialen nodig (kunststoffen, koper, staal, koelmiddel,...). De productie van de gascondensatieketel heeft heel weinig impact. Dit verklaart dan ook waarom de productie van het hybride wärmtepompsysteem minder impact heeft op het milieu dan de wärmtepomp. De resultaten van de wärmtepomp en het hybride wärmtepompsysteem in combinatie met elektriciteitspark 2 zijn terug te vinden in fig. 50:

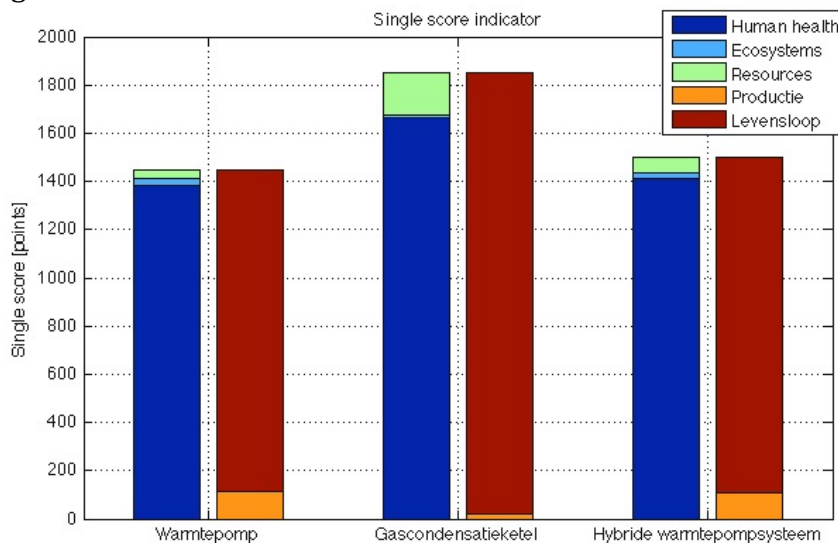


fig. 50: Single score indicator met elektriciteitspark 2.

Zowel de single score indicator van de warmtepomp als het hybride warmtepompsysteem stijgt en het verschil tussen beide daalt. De duurzaamheid hangt dus sterk af van de elektriciteitsproductie. Dit is ook duidelijk te merken bij voorbeeld 3 (elektriciteitspark 3) waarbij windenergie wordt gebruikt, zie fig. 51.

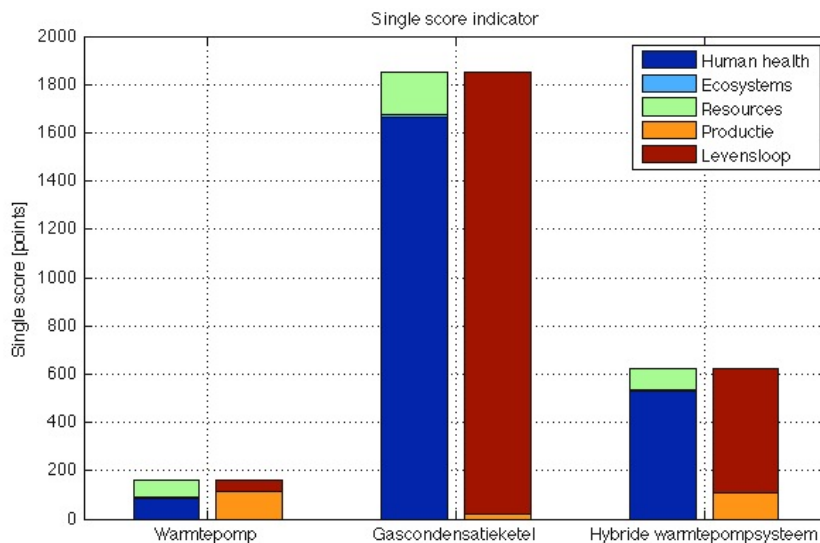


fig. 51: Single score indicator met elektriciteitspark 3.

De indicator van de warmtepomp is drastisch gedaald. De impact op de menselijke gezondheid is drastisch gedaald. Oorspronkelijk was deze zelfs negatief. Met negatieve schade kan men grote milieu-impacten gaan “compenseren”. Hernieuwbare energie kan echter geen uitstoot gaan compenseren. Het heeft gewoon een hele lage milieu-impact. Hier wordt dus geen rekening gehouden met compensaties. In fig. 52 is de vergelijking nog eens te zien tussen de drie verschillende gebruikte elektriciteitsparken bij de warmtepomp en hybride warmtepompsysteem.

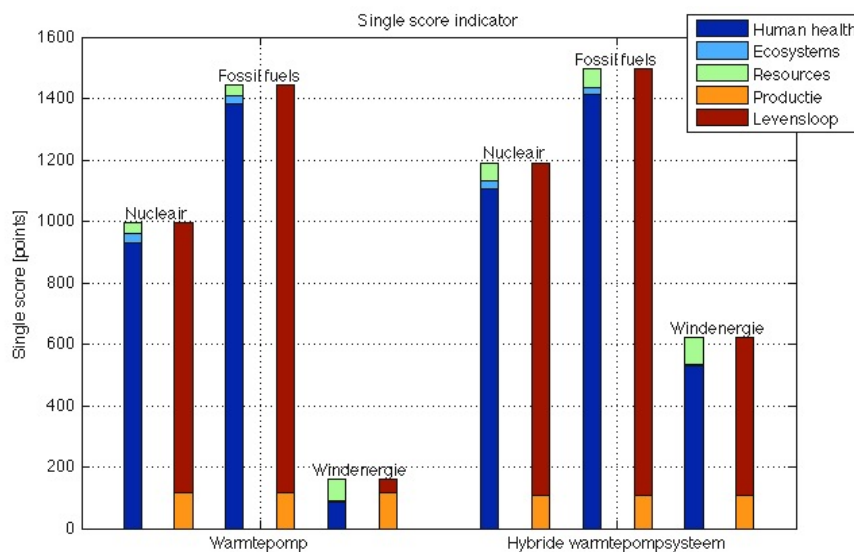


fig. 52: Single score indicator, vergelijking tussen de drie elektriciteitsparken.

5.1.4.1 Human health

Het is algemeen geweten dat de toename van broeikasgassen in de atmosfeer de opwarming van de aarde veroorzaakt. De gevolgen hiervan op de menselijke gezondheid zijn echter minder bekend. De toename van de temperatuur zorgt voor meer hittegolven met dodelijke gevolgen [42]. Dit zorgt echter ook voor droogtes, met ernstige gevolgen voor de landbouw en dus ook de hongersnood in bepaalde regio's. Verder bestaan er ook studies die aantonen dat de toename van de CO₂-concentratie in de lucht een verzuring van het bloed veroorzaakt, met ernstige gezondheidsproblemen als gevolg [43]. De toename van CO₂-concentraties heeft ook grote gevolgen voor voedingswaarden in bepaalde voeding en kan gevolgen hebben op de menselijke gezondheid [44]. Ook andere schadelijke stoffen als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen hebben een negatief effect op de menselijke gezondheid (stikstofdioxiden en zwaveloxiden, fijn stof, ...) met voornamelijk ademhalingsproblemen en cardiovasculaire (hart- en bloedvaten) problemen als gevolg [45].

5.1.4.2 Ecosystems

De productie van elektriciteit en verbranding van aardgas hebben ook een effect op het ecosysteem. Enerzijds hebben elektriciteitscentrales plaats nodig (land use). Het is echter voornamelijk de uitstoot van schadelijke stoffen die invloed heeft op het ecosysteem. De toename van de CO₂-concentratie in de lucht zorgt ook voor een toename van de CO₂-concentratie in de oceaan. Dit zorgt voor de verzuring van de oceaan [40]. De gevolgen hiervan op het ecosysteem zijn echter nog niet gekend, [46]. Een tweede gevolg van schadelijke stoffen op de oceaan is eutrofiëring. Dit houdt in dat er een overmaat is aan voedingsstoffen in het water. Met als gevolg dat één soort drastisch toeneemt in populatie met verandering van biodiversiteit en hypoxie (afname van zuurstofconcentratie) als gevolg [41].

5.1.4.3 Resources

Het gebruik van aardgas voor de verwarming van woningen zorgt er natuurlijk voor dat de voorraad aardgas daalt. In de toekomst zal dus steeds meer energie nodig zijn voor de winning van aardgas [47].

De toename van koperproductie gedurende de afgelopen decennia zorgt ervoor dat de voorraad koperertsen daalt [35], [36]. Door daling van de koperconcentratie in de ertsen [37]. Er is dus meer energie nodig om koper te ontginnen.

5.2 Conclusie

Een hybride warmtepompsysteem is dus zeker een duurzame manier van verwarmen. Echter de duurzaamheid van dergelijk systeem is sterk afhankelijk van de elektriciteitsproductie. Als men in een land leeft waar voornamelijk steenkool wordt gebruikt voor de productie van elektriciteit, dan zal de duurzaamheid van het hybride warmtepompsysteem sterk dalen.

6 Conclusies

Met behulp van de gemeten data in de desbetreffende eengezinswoning zijn de thermisch model parameters van deze woning geïdentificeerd met als doel om de mogelijkheden van een hybride warmtepompsysteem te analyseren. Het thermisch model van de woning werd gebruikt als input voor de simulaties. Dit in combinatie met één van de drie volgende verwarmingssystemen:

- Warmtepomp
- Gascondensatieketel
- Hybride warmtepompsysteem

M.b.v. deze simulaties kan het jaarverbruik voor elk verwarmingssysteem bepaald worden. De prestaties van het hybride warmtepompsysteem werden dus vergeleken met de prestaties van een duurzaam alternatief (warmtepomp) en een courant verwarmingssysteem (gascondensatieketel).

Bij de systeemidentificatie is het als eerste zeer belangrijk om goede beginwaarden te kiezen. Het gebruikte algoritme werkt zeer lokaal. Het rekengebied beperken door goede beginwaardes te kiezen in combinatie met goede grenzen is dus een must. Een goede kennis van courante waarden voor de parameters is dan ook belangrijk. De beperkte informatie over de desbetreffende woning bemoeilijkte deze opgave wel.

Het doel van een hybride warmtepompsysteem is om de financiële kost van het energieverbruik te minimaliseren. Uit de simulaties blijkt echter dat de bivalente temperatuur (grens waar de relatieve kost van de gascondensatieketel en warmtepomp elkaar snijden) relatief laag ligt en dat de warmtepomp dus nog steeds goedkoper is. Dit jaar is echter wel een relatief warme winter geweest.

Voor goede simulaties is het echter wel belangrijk om een goede verwarmingsregeling te ontwerpen. Door gebrek aan tijd zijn de instelparameters van deze regeling dus handmatig ingesteld met enkel oog op het thermisch comfort van de simulaties. Het energieverbruik ligt dus wat aan de hoge kant.

Door de instelparameters m.b.v. een optimalisatie-tool (bv. Nelder-Mead algoritme) te optimaliseren kan zo een optimaal thermisch comfort bekomen worden met een geminimaliseerd energieverbruik.

Als laatste is er ook nog een Life Cycle Analysis uitgevoerd. Dit om de duurzaamheid van een hybride warmtepompsysteem te bepalen vergeleken met een warmtepomp en gascondensatieketel. Uit de analyse blijkt dat een hybride warmtepompsysteem schadelijker is dan een warmtepomp maar wel duurzamer dan een gascondensatieketel. De duurzaamheid hangt echter sterk af van de gebruikte technologieën voor de elektriciteitsproductie. Elektriciteit geproduceerd met veel fossiele brandstoffen zorgt voor een verhoging van de milieu-impact (echter wel nog steeds kleiner dan de gascondensatieketel). De invloed van de gebruikte elektriciteitsmix is nog sterker bij de warmtepomp. Een warmtepomp of hybride warmtepompsysteem in combinatie hernieuwbare energiebronnen (bv. windenergie) geeft de kleinste milieu-impact en dus ook de hoogste duurzaamheid.

Literatuurlijst

- [1] International Energy Agency, "Technology Roadmap," 2011. [Online]. Available: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/buildings_roadmap.pdf. [Accessed: 07-May-2015].
- [2] a. Arteconi, N. J. Hewitt, and F. Polonara, "Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage (TES) systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 51, no. 1–2, pp. 155–165, Mar. 2013.
- [3] K. Klein, K. Huchtemann, and D. Müller, "Numerical study on hybrid heat pump systems in existing buildings," *Energy Build.*, vol. 69, pp. 193–201, Feb. 2014.
- [4] R. De Coninck and L. Helsen, "Quantification of Flexibility in Buildings by Cost Curves - Methodology and Application," 2015.
- [5] G. Reynders, J. Diriken, and D. Saelens, "Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals," *Energy Build.*, vol. 82, pp. 263–274, 2014.
- [6] D. Willem, "Thermodynamica, schakelprogramma industriële ingenieurswetenschappen," 2012.
- [7] "Refrigeration cycle." [Online]. Available: <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2013/08/BolesLectureNotesThermodynamicsChapter10.pdf>. [Accessed: 01-Apr-2015].
- [8] "Warmtepomp, haal uw gratis energie uit de omgeving om te verwarmen en te koelen." [Online]. Available: <http://www.simonbv.nl/luchtwater/warmtepomp.htm>. [Accessed: 02-Apr-2015].
- [9] "Heat Pumps Water Heating System Air Source." [Online]. Available: <http://www.abbey-solar.com/heat-pumps.html#!prettyPhoto>. [Accessed: 02-Apr-2015].
- [10] Viessmann Werke GmbH, "Heating with Gas," 2014. [Online]. Available: http://www.viessmann.com/com/content/dam/internet-global/pdf_documents/com/brochures_englisch/pr-heating_with_gas.pdf. [Accessed: 07-May-2015].
- [11] "What Is A Condensing Boiler? - Go Greena Blog." [Online]. Available: <http://gogreena.co.uk/what-is-a-condensing-boiler/>. [Accessed: 14-Apr-2015].

- [12] "Chemical Composition of Natural Gas - Union Gas." [Online]. Available: <http://www.uniongas.com/about-us/about-natural-gas/Chemical-Composition-of-Natural-Gas>. [Accessed: 18-Apr-2015].
- [13] "Aardgas: omrekening van m3 naar kWh | VREG." [Online]. Available: <http://www.vreg.be/nl/aardgas-omrekening-van-m3-naar-kwh>. [Accessed: 28-May-2015].
- [14] "Boiler systems: Economics and efficiencies | Consulting-Specifying Engineer." [Online]. Available: <http://www.csemag.com/single-article/boiler-systems-economics-and-efficiencies/882702317f45aa774eb70b797efe75bd.html>. [Accessed: 12-May-2015].
- [15] Y. Nam, R. Ooka, and Y. Shiba, "Development of dual-source hybrid heat pump system using groundwater and air," *Energy Build.*, vol. 42, no. 6, pp. 909–916, 2010.
- [16] J. Široký, F. Oldewurtel, J. Cigler, and S. Prívará, "Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 3079–3087, Sep. 2011.
- [17] J. H. Kämpf and D. Robinson, "A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows," *Energy Build.*, vol. 39, no. 4, pp. 445–453, Apr. 2007.
- [18] "Find minimum of unconstrained multivariable function using derivative-free method - MATLAB fminsearch - MathWorks Benelux." [Online]. Available: <http://nl.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>. [Accessed: 28-May-2015].
- [19] S. Arlot and A. Celisse, "A survey of cross-validation procedures for model selection," vol. 4, pp. 40–79, 2010.
- [20] "Cross Validation." [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/~schneide/tut5/node42.html>. [Accessed: 10-May-2015].
- [21] "Thermal Performance : Part L1 A 2013," 2013. [Online]. Available: http://www.futuresgroup.net/Thermal_Performance_Part_L1A-1428.pdf. [Accessed: 26-May-2015].
- [22] "Logatherm WPLSH - Buderus," 2015. [Online]. Available: https://www.buderus.be/buderus/buderus.be/documents/pricelist/batibouw/bb_tarif_2015_nl_dig.pdf. [Accessed: 26-May-2015].
- [23] "EMS plus Installatiehandleiding voor de installateur Logamatic RC300." [Online]. Available:

- <http://de.documents.buderus.com/download/pdf/file/6720804905.pdf>. [Accessed: 26-May-2015].
- [24] Vreg, "Evolutie elektriciteits-en aardgasrijzen (incl. btw) voor huishoudelijke afnemers," vol. 1, p. 3, 2013.
- [25] S. Winter, Y. Emara, A. Citroth, C. Su, and M. Srocka, "openLCA 1.4," no. March, pp. 1–81, 2015.
- [26] M. Goedkoop and R. Spriensma, "The Eco-indicator99: a damage oriented method for life cycle impact assessment: methodology report," pp. 1–144, 2001.
- [27] T. Heck and P. S. Institut, "LCI Analysis of Heat Pumps," vol. 0, no. June, pp. 0–13, 2012.
- [28] "Armacell - Productinformatie HT/Armaflex." [Online]. Available: <http://www.armacell.com/WWW/armacell/INETArmacell.nsf/standard/9F7F32B517083120C1257727004AE3CA>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [29] "Armacell - Productinformatie Tubolit." [Online]. Available: <http://www.armacell.com/WWW/armacell/INETArmacell.nsf/standard/E1DE3D6C0AC5F843C1257830004FED61>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [30] "Hybride : dubbel zo interessant ! Warmte is ons element Een stap in de goede richting," 2013. [Online]. Available: http://www.be-sanitair.be/folders/F_Info_WPLSH_NL_2013.pdf. [Accessed: 27-May-2015].
- [31] "Plants." [Online]. Available: http://www.bosch-thermotechnology.com/en/tt_com/ueber_uns/standorte/standorte_2.html. [Accessed: 24-Apr-2015].
- [32] "Statistiek elektriciteit | FEBEG Federatie van de Belgische Elektriciteits- en Gasbedrijven." [Online]. Available: <https://www.febeg.be/statistiek-elektriciteit>. [Accessed: 28-May-2015].
- [33] A. Abusoglu and M. S. Sedeeq, "Comparative exergoenvironmental analysis and assessment of various residential heating systems," *Energy Build.*, vol. 62, pp. 268–277, 2013.
- [34] "Your Building - Library - Performance setting and measurement for sustainable commercial buildings." [Online]. Available: <http://www.yourbuilding.org/Article/NewsDetail.aspx?p=83&id=1583>. [Accessed: 02-May-2015].
- [35] S. Northey, S. Mohr, G. M. Mudd, Z. Weng, and D. Giurco, "Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 83, pp. 190–201, 2014.

- [36] Rosa, "Copper depletion in the Iberian Pyrite Belt: another indicator of global scarcity," *Appl. Earth Sci. IMM Trans. Sect. B*, vol. 120, no. 1, pp. 39–43, 2011.
- [37] P. Crowson, "Some observations on copper yields and ore grades," *Resour. Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 59–72, 2012.
- [38] L. D. Kraemer and D. Evans, "Uranium bioaccumulation in a freshwater ecosystem: Impact of feeding ecology," *Aquat. Toxicol.*, vol. 124–125, pp. 163–170, 2012.
- [39] A. Elshkaki and T. E. Graedel, "Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 59, pp. 260–273, 2013.
- [40] K. Caldeira and M. E. Wickett, "Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH," *Nature*, vol. 425, no. 6956, p. 365, 2003.
- [41] W. G. Sunda and W. Cai, "Eutrophication Induced CO₂ - Acidification of Subsurface Coastal Waters: Interactive Effects of Temperature, Salinity, and Atmospheric P," 2012.
- [42] S. Hales and A. Woodward, *Global climate change and malaria.*, vol. 5, no. 5. 2005.
- [43] D. S. Robertson, "The rise in the atmospheric concentration of carbon dioxide and the effects on human health.," *Med. Hypotheses*, vol. 56, no. 4, pp. 513–518, 2001.
- [44] S. S. Myers, A. Zanobetti, I. Kloog, P. Huybers, A. D. B. Leakey, A. J. Bloom, E. Carlisle, L. H. Dietterich, G. Fitzgerald, T. Hasegawa, N. M. Holbrook, R. L. Nelson, M. J. Ottman, V. Raboy, H. Sakai, K. a Sartor, J. Schwartz, S. Seneweera, M. Tausz, and Y. Usui, "Increasing CO₂ threatens human nutrition.," *Nature*, vol. 510, no. 7503, pp. 139–42, 2014.
- [45] T. Hussein and M. Kulmala, *Human Exposure to Pollutants via Dermal Absorption and Inhalation*, vol. 17. 2010.
- [46] J. a Godbold and M. Solan, "Long-term effects of warming and ocean acidification are modified by seasonal variation in species responses and environmental conditions," *Philos. Trans. R. Soc.*, vol. 368(1627), p. 20130186, 2013.
- [47] R. W. Bentley, "Global oil and gas depletion: an overview," *Energy Policy*, vol. 30, no. 3, pp. 189–205, 2002.

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Analyse en optimalisatie van een hybride warmtepompsysteem

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-elektrotechniek**
Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Nackaerts, Dries

Datum: **1/06/2015**