Ontwikkeling magnetocalorische warmtepomp, R&D roadmap

Datum 11 maart 2016

Auteur(s) Prof. dr. E.H. Brück - TU Delft
Prof.dr.ir. T.H. van der Meer - TU Twente
Ing. L. van Bohemen – Itho Daalderop B.V.
ing. H. Oversloot - TNO
ir. A. J. Kalkman – TNO
MJP CCO, WP 3.4

Versie 2 (definitief) van deze roadmap bedoeld als input voor de werkgroep 'Roadmap' (werkpakket 1) van het Meerjarenprogramma Compacte Conversie en Opslag.

In opdracht van:

TKI URBAN ENERGY
Topsector Energie

Inhoudsopgave

1 Inleiding ... 3
1.1 Visualisatie R&D roadmap ... 4
1.2 Andere roadmaps ... 5

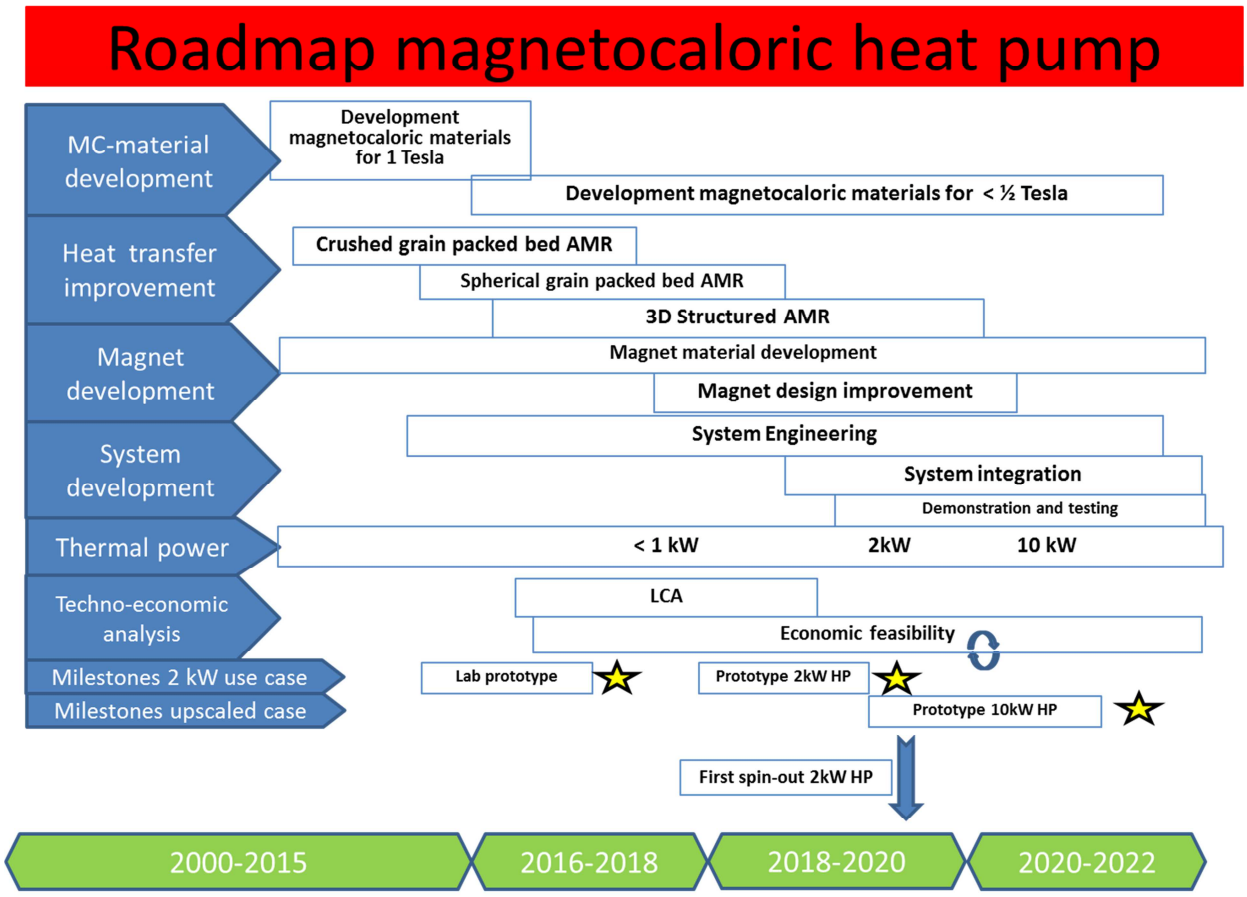
2 Uitwerking roadmap ... 6
2.1 Materiaalontwikkeling ... 6
2.2 Subsysteem warmtewisselaar (AMR) ... 6
2.2.1 Packed bed van ongestructureerde korrels ... 6
2.2.2 Packed bed van spherical grains ... 6
2.2.3 Structured material design ... 7
2.2.4 Structured material production ... 7
2.3 Subsysteem permanente magneet ... 7
2.3.1 Ontwerp magneetconfiguratie ... 7
2.3.2 Materiaalontwikkeling magneet ... 8
2.4 Prototype ontwikkeling ... 8
2.5 System engineering ... 9
2.6 System integration ... 9
2.7 Laboratorium testen ... 10
2.8 Field test en demo ... 10
2.9 Opschaling thermisch vermogen ... 10
2.10 LCA en economische haalbaarheid ... 10

3 Beschrijving use-case ... 11

1 Inleiding

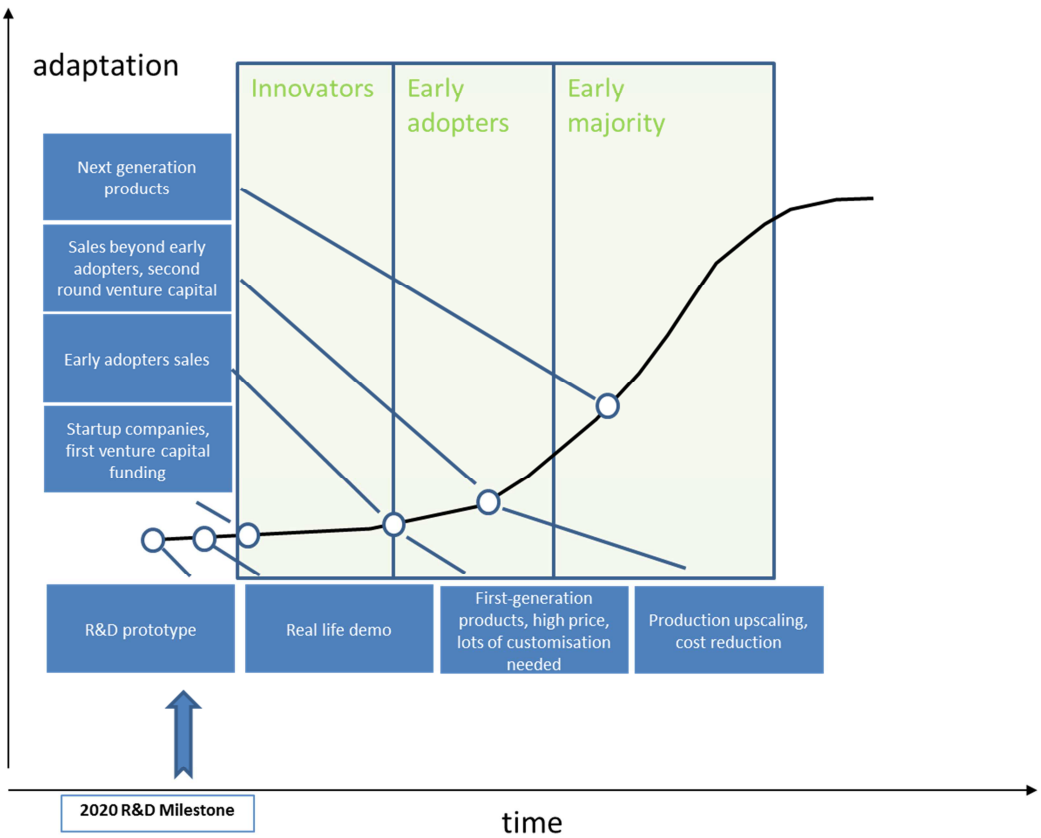
Onderdeel van het TKI Meerjarenprogramma Compacte Conversie en Opslag is het werkpakket 3.4 ‘Magnetocalorische warmtepomp’. Voorliggend document is de bijdrage van de partners actief op dit werkpakket aan de technologie roadmap voor de ontwikkeling van een magnetocalorische warmtepomp.
Dit document is tot stand gekomen in een samenwerking tussen TU Delft (WP leider), Universiteit Twente, Itho Daalderop en TNO.
De use case voor de magnetocalorische warmtepomp betreft een eengezinswoning anno 2020, en is separaat gedocumenteerd binnen werkpakket 1 van het programma.
In paragraaf 1.1 geven we een visuele weergave van de roadmap zoals die is opgesteld in een brainstormsessie met de betrokken partners van werkpakket 3.4. Deze visuele weergave geeft de voorziene onderzoeks- en ontwikkelactiviteiten in de loop van de tijd, en vormt tevens de inhoudsopgave van het vervolg van dit document.

1.1 Visualisatie R&D roadmap



Figuur 1: R&D roadmap voor een magnetocalorische warmtepomp. De pijl geeft de spin-out naar de technology diffusion map van Figuur 2 aan.

In de figuur is de R&D roadmap geschetst zoals die door de betrokken partijen in WP 3.4 is voorzien. De belangrijkste ontwikkelingsvragen worden in het navolgende hoofdstuk verder uitgewerkt. De Roadmap richt zich op een use-case van een 2 kW warmtepomp als eerste product, waarvan een verwachte technology diffusion map is gegeven in figuur 2. Opschaling naar grotere vermogens volgt na de spin-out van de 2 kW warmtepomp.



Figuur 2: Technology diffusion map met koppeling met milestone van figuur 1.

1.2 Andere roadmaps

Andere roadmaps met betrekking tot magnetocalorische warmtepompen of koelkasten zijn beschikbaar en geraadpleegd:

- Strategic Research Priorities for Renewable Heating & Cooling, Cross-Cutting Technology, European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, april 2012

- Research & Development Roadmap for Next-Generation Appliances, W. Goetzler, T. Sutherland, K. Foley October 2014

2 Uitwerking roadmap

2.1 Materiaalontwikkeling

Magnetocalorische warmtepompen zijn intrinsiek zeer efficiënt omdat gebruik wordt gemaakt van een kwantummechanisch fenomeen. De efficiëntie van de magnetocalorische energieconversie is echter erg afhankelijk van het magnetocalorisch materiaal en het aangelegd magneetveld. Bij kamertemperatuur is in veel prototypes het metaal Gd gebruikt. Dit metaal is goed beschikbaar en het is ook makkelijk bewerkbaar. Echter is er voor een 60% Carnot efficiëntie een magneetveld van 10 Tesla nodig.
In de laatste 15 jaar zijn nieuwe materialen ontwikkeld die eenzelfde efficiëntie bereiken in een magneetveld van 1 Tesla. Er is dus een verbeterslag van een factor 10 bereikt. Dit is bijzonder relevant omdat een verlaging van het veld naar velden beneden 2 Tesla de inzet van permanent magneten mogelijk maakt.
Daarmee komen compacte designs in het beeld, en een eerste wijnkoeler prototype is recentelijk op de CES in Las Vegas getoond, die in hetzelfde compartiment dat normaal wordt gebruikt voor de compressor, een magnetocalorische warmtepomp bevat. Deze warmtepomp gebruikt water met antvries als warmtemedium, is veel stiller dan huidige compressoren en energie-efficiënt.
Magneten met een veld ≥ 1 Tesla, vereisen de toepassing van dure NdFeB materialen (zie beneden). Voor brede toepassing van deze technologie zal nu nog een verdere verbetering van de materialen naar 60% Carnot bij 0.5 Tesla wenselijk zijn. Dit is onderwerp van een onderzoeksproject van TUD, FOM en BASF.

2.2 Subsysteem warmtewisselaar (AMR)

De in- en uitvoer van warmte is het langzaamste proces in de gehele thermodynamische cyclus van een magneto-calorische warmtepomp. Verbetering van de warmteoverdracht zal betekenen dat de cyclus met een hogere frequentie kan worden doorlopen en leidt dus direct tot een hogere vermogensdichtheid van het systeem.

2.2.1 Packed bed van ongestructureerde korrels

De eerste actieve magnetocalorische regeneratoren (AMR) zijn in de meerderheid gebaseerd op packed beds van ongestructureerde korrels. Omdat de fluïde stroom bidirectionaal is moeten de korrels gefixeerd worden met bvb epoxide. Deze vorm van warmtewisselaar zorgt wel voor een goede warmteoverdracht, echter is de stromingsweerstand zo hoog dat een goed rendement bij redelijk vermogen onbereikbaar lijkt.

2.2.2 Packed bed van spherical grains

Momenteel lijkt een regenerator bestaand uit een gepakt bed van bolvormige korrels van magnetisch materiaal de beste oplossing. Optimalisatie van een dergelijke regenerator is mogelijk, met de diameter van de korrels en de maximaal toelaatbare spreiding in diameter parameters zijn. Een nadeel van een regeneratorbed bestaande uit losse deeltjes is dat de deeltjes kunnen bewegen onder invloed van de krachten die de magneten op het materiaal uitoefenen. Dit kan leiden tot het “vermalen” van deeltjes tot kleinere deeltjes en tot lokale verdichtingen van het bedmateriaal. Dit heeft

directe gevolgen voor het warmteoverdrachtsproces en in de regenerator en de drukval over de regenerator.

2.2.3 Structured material design

Een regenerator berstaand uit een goed gestroomlijnde structuur met de juiste dimensies kan tot een regenerator leiden met een optimale warmteoverdracht en minimale drukval. Een dergelijke structuur kan ontworpen worden, waarbij de dimensies afgestemd worden op de frequentie waarmee de thermodynamische cyclus doorlopen wordt. Vraag blijkt nog of deze structuur ook geproduceerd kan worden.

2.2.4 Structured material production

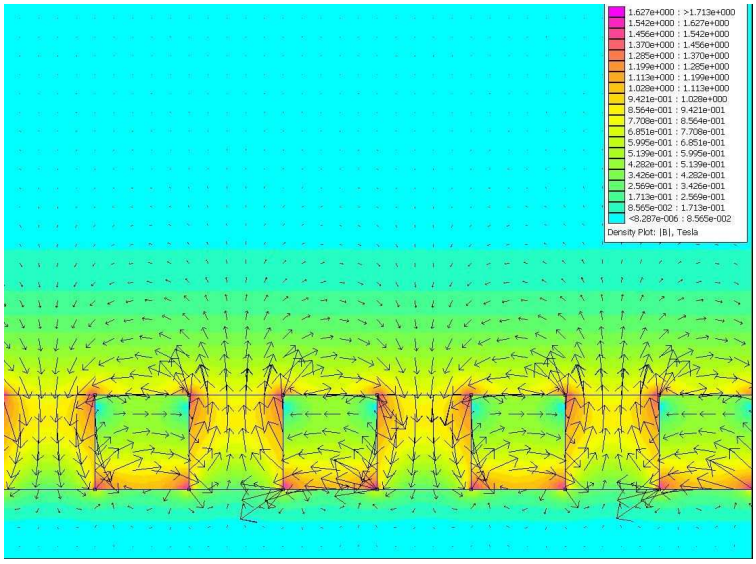
Vraag is of de onder 2.2.3 ontworpen structuur ook geproduceerd kan worden. Voor het Bruck materiaal wordt er bij BASF onderzoek gedaan naar productietechnieken voor de productie van dergelijk materiaal.

2.3 Subsysteem permanente magneet

Binnen het huidige werkpakket wordt dit onderdeel niet expliciet geadresseerd.
Hier zou wellicht een aanvullende marktpartij bij betrokken kunnen worden.

2.3.1 Ontwerp magneetconfiguratie

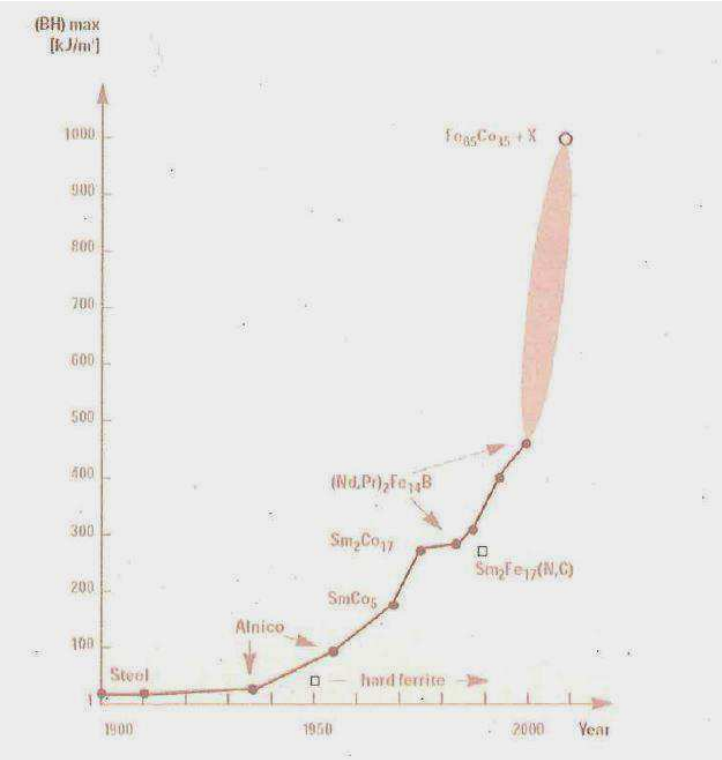
Doel van het ontwerp van de permanente magneetconfiguratie is enerzijds het maximaliseren van het magnetische veld ter plaatse van het magnetocalorische materiaal, anderzijds het minimaliseren van strooivelden die buiten het toestel nog merkbaar zijn (fig. 2). Daarnaast speelt minimalisatie van het gewicht van het toestel een rol. Afhankelijk van de geometrie van de AMR is een geoptimaliseerd ontwerp van de permantente magneetconfiguratie mogelijk op basis van het Halbach principe.



Figuur 2: Voorbeeld magneetveld van een Halbach-magneet array bestaande uit kubische magneten, waarbij het veld aan de onderzijde sterk wordt gereduceerd en aan de bovenzijde versterkt als gevolg van de toegepaste configuratie.

2.3.2 Materiaalontwikkeling magneet

Ten behoeve van de toe te passen magneetmaterialen staan een aantal basiskeuzes ter beschikking zoals AlNiCo, Sm_xCo_y en Nd- based materialen in verschillende productiecategorieen. De ontwikkeling van magnetische materialen heeft de laatste jaren een sterke ontwikkeling doorgemaakt, zie ook figuur 3. Een keuze voor het meest geschikte magneetmateriaal zal naast technische ook economische afwegingen kennen.



Figuur 3: ontwikkelingscurve materialen voor permanente magneten.

2.4 Prototype ontwikkeling

Bij de TU Delft wordt op dit moment een magnetocalorische warmtepomp gebouwd. Echter is dit apparaat geenzins bedoeld als echte prototype maar vooral om verschillende designs van AMR's te testen en te verifiëren. Dit apparaat kan worden beschouwd als een laboratoriummodel of laboratoriumprototype.
Doel is om met de kennis die kan worden opgedaan met het laboratoriumprototype ontwerprandvoorwaarden voor verdere system engineering en system integration te ontwikkelen en op basis hiervan een eerste industrieel prototype te ontwikkelen.
Milestones voor de ontwikkeling van een laag-vermogen (enkele honderden Watts) koelkast worden in de Research & Development Roadmap for Next-Generation Appliances als volgt genoemd (jaar 0 is 2014):

Near-Term R&D Milestones [Years 0-2]:

- Demonstration of cooling capacity of typical residential refrigerator

Medium-Term R&D Milestones [Years 2-5]:

- Demonstration of prototype residential-sized magnetic refrigerator

Long-Term R&D Milestones [Years 5-10]:

- Development of full-size magnetic refrigerator that can be brought to market
- Testing of full-sized magnetic refrigerator in residential settings

Hierbij wordt gesignaleerd dat veel toepassingen focussen op residentiële koelkasten, vanwege het temperatuurtraject en de lage vermogensvraag. Toepassing als residentiële warmtepomp kan worden gezien als een parallele ontwikkeling, en vraagt iets andere temperatuurtrajecten en hogere vermogens.
Het streven binnen het MJP CCO is om voor de ontwikkeling van de magnetocalorische warmtepomp dezelfde milestones aan te houden als voor de magnetocalorische koelkast. Dit vormt gezien bovenstaande afweging een extra uitdaging ten opzichte van de ontwikkeling van de magnetocalorische koelkast.

Dit leidt tot de volgende R&D Milestones in de tijd:

Near-Term R&D Milestone [2016-2018]:

- Demonstratie van een labmodel magnetocalorische warmtepomp (TRL 3)

Medium-Term R&D Milestones [2020]:

- Demonstratie van een prototype 2 kW magnetocalorische warmtepomp (TRL 5-6).

Long-Term R&D Milestones [2021-2026]:

- Opschaling naar grotere vermogens en toepassing in koelbedrijf.

2.5 System engineering

Doel van de systems engineering is om, uitgaande van de technologische KPI's van de gedefinieerde use-case (1.1.2) de systeemdoelstellingen te indentificeren en te kwantificeren, alternatieve design concepten te ontwikkelen en de verschillende mogelijke concepten tegen elkaar af te wegen op basis van performance, initiele kosten en operationele kosten, materiaalgebruik etc.
Nadat op basis hiervan een eerste prototype is gerealiseerd zal op basis van een post-implementatie assessment dienen te worden nagegaan in welke mate het eerste industriele prototype voldoet aan de gestelde KPI's, en of een verdere doorontwikkeling nodig is voordat dit prototype geschikt is voor een eerste kleinschalige pre-productie serie.

Ontwerptools
Voor verschillende deelaspecten van ontwerp en engineering wordt gebruik gemaakt van uiteenlopende specialistische software.
Voor een systematische ontwerpaanpak is behoefte aan geïntegreerde ontwerptools waarin de verschillende componenten van de warmtepomp integraal kunnen worden ontworpen en gedimensioneerd.

2.6 System integration

De te ontwikkelen warmtepomp dient te worden geintegreerd in de woning zoals beschreven in de use-case (1.1.2).
Dit betekent enerzijds integratie met de warmtebron, anderzijds integratie met het afgiftesysteem in de woning, zowel ten aanzien van temperatuurniveau's als watervolumestromen. Daarnaast is een regelsysteem nodig, dat geavanceerder kan zijn dan huidige thermostaten gezien het feit dat de magnetocalorische warmtepomp inherent traploos regelbaar is via het toerental.

2.7 Laboratorium testen

Om een goede vergelijking te krijgen van de prestaties van de magnetocalorische warmtepomp zijn laboratoriumtesten toepasbaar zoals ook toegepast bij compressie warmtepompen, cnf. EN 14511 en EN14825.

2.8 Field test en demo

Naast objectieve laboratoriumtesten kunnen veldtesten informatie geven over met name het dynamische gedrag van de warmtepomp in de praktijk, gegeven de wisselende situaties die in verschillende woningtypes bij verschillend gebruikersgedrag voorkomen.

2.9 Opschaling thermisch vermogen

De use case en het warmtepompvermogen van ca. 2 kW zijn gekozen met het oog op de thermische vermogens die haalbaar worden geacht met de huidige stand van de ontwikkeling. Uiteraard zijn er veel toepassingen waarin hogere vermogens worden gevraagd. Op dit moment is er geen beeld bij de opschalingsmogelijkheden van de huidige concepten, dan wel concepten voor hogere vermogens. Dit wordt daarom als aparte onderzoeksvraag neergezet. Zowel de toepassing als warmtepomp als de toepassing voor koeling zal hierbij worden meegenomen.

2.10 LCA en economische haalbaarheid

Bij de realisatie van een magnetocalorische warmtepomp worden een aantal minder gangbare materialen toegepast, waarbij met name voor de permanente magneten de verkrijgbaarheid op de langere termijn een aandachtspunt is, zoals in het geval van Sm en Nd. Ten behoeve van de ontwikkeling van meer industriële prototypes is het noodzakelijk dat de consequenties van materialisatiekeuzes inzichtelijk worden gemaakt over de hele levenscyclus van het product, van de winning van grondstoffen via productie en (her)gebruik tot en met afvalverwerking. Onderdeel van de haalbaarheid betreft het uitwerken van de Unique Selling Points van de technologie:

- het energiebesparingspotentieel
- de reductie van emissies (CO_2, geen koudemiddelemissies, geen ODP, geen GWP)

3 Beschrijving use-case

3.1 Use case template

Een use case is een beschrijving van de interacties tussen een actor (de user) en een systeem (in dit geval een warmtepompinstallatie voor de verwarming van een woning), met het oog op het bereiken van een bepaald doel (in dit geval een duurzame en comfortabele woning).

Voor de beschrijving van de use case is gebruik gemaakt van een bestaande template, zie Bijlage 1.

3.2 Use case voor de magnetocalorische warmtepomp

1. **Title:** "Als bewoner/eigenaar van een eengezins-nieuwbouwwoning in Nederland wil ik mijn woning op een comfortabele, geluidloze, compacte, klimaat neutrale en zeer energie-efficiënte manier verwarmen door op een efficiënte manier gebruik te maken van bodemwarmte".

2. **Scope:** We beschouwen een SenterNovem referentie EGW van 123 m2, gebouwd na 1-1-2015, met een zeer goede isolatiewaarde (Rc façade, dak en vloer 5,0; 6,5 en 3,5 m2K/W respectievelijk, U waarde beglazing 1,0 W/m2K, energie efficiënte ventilatie met HR-warmte terugwinning en een specifiek luchtdichtheid < 0,6 dm3/sm2), resulterend in een aansluitvermogen van 2 kWth voor ruimteverwarming.
De referentiesituatie is een gasketel, die in dit specifieke geval een rendement van 75% heeft.
Het doel van de huiseigenaar is om af te sluiten van de gasaansluiting. Het doel is tevens om als verwarmingstoestel een geothermische warmtepomp toe te passen.

3. **A description of the primary actor (the user)**: De huiseigenaar is van plan een nieuw huis te bouwen en daar tenminste 15 jaar te blijven wonen. Hij/zij is een 'early adopter' en wil een duurzaam verwarmingssysteem installeren en onafhankelijk zijn van aardgas. De huiseigenaar heeft het kapitaal voor de warmtepomp beschikbaar zonder kosten. De ruimte voor de warmtepomp is beschikbaar, maar moet niet groter zijn dan van de huidige warmtepompen.
Het is mogelijk om een verticale bodemwarmtewisselaar te realiseren in de nabijheid van het huis.

4. **The goal of the user**
Het doel van de huiseigenaar is om af te sluiten van het gasnet. Het doel is tevens om als verwarmingstoestel een geothermische warmtepomp toe te passen met de volgende eigenschappen:
<u>Comfortabel:</u> geen consessies aan gangbare binnentemperaturen in een woning
<u>Geluidloos:</u> niet hoorbaar
<u>Compact:</u> ruimtegebruik kleiner of gelijk aan dat van bestaande warmtepompen
<u>Klimaatneutraal</u>
<u>Veilig</u>
<u>Zeer energie-efficiënt</u>

5. **A translation of the goal of the primary actor into relevant system level key performance indicators (KPI).**
<u>Comfortabel:</u> 21 ºC in de verblijfsruimten bij een buitentemperatuur van - 10 ºC.
<u>Geluidloos:</u> geluidsniveau < 28 dB(A) in de verblijfsruimtes van de woning
<u>Compact:</u> afmeting 0,6 x 0,6 meter, maximaal verdiepinghoogte
<u>Klimaatneutraal:</u> de warmtepomp maakt geen gebruik van koudemiddelen die een ODP of GWP hebben.
<u>Veilig:</u> geen toepassing van brandbare koudemiddelen of hoge systeemdrukken

zeer energie-efficiënt: Een COP die duidelijk beter is dan de best beschikbare technologie van dit moment

6. A translation of the system level KPI's into technological KPI's

Comfortabel: een thermisch vermogen van 2 kWth bij B(5) / W(35).
Klimaatneutraal: de warmtepomp maakt geen gebruik van koudemiddelen die een ODP of GWP hebben.
Veilig: geen toepassing van brandbare koudemiddelen of hoge systeemdrukken
zeer energie-efficiënt: Een COP die 60% bedraagt van het Carnot-rendement.

BIJLAGE 1: USE CASE TEMPLATE

Bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Use_case: Alistair Cockburn, Writing Effective Use Cases. Category: fully dressed use case.

A use case is a description typically defining the interactions between an actor (the user) and a system (in this case a heat pump for space heating of a building), to achieve a goal (in this case a comfortable and energy-efficient building).

Use cases give a description at a higher level than the engineering level, often representing missions or stakeholder goals. The detailed requirements may then be captured in lower level technical descriptions.

Use case analysis is an important requirement analysis technique that is used to translate expected user- and product requirements to currently required research and development activities.

For a full description of a use case, the following aspects are necessary:

1. Title: "an active-verb goal phrase that names the primary actor and the goal of the primary actor".

2. The scope, background, stakeholders and other relevant information necessary to understand the use case

3. A description of the primary actor (the user) that is sufficiently complete

4. The goal of the user, defined from the perspective of the user and as a value proposition to the user.

5. A translation of the goal of the primary actor into at least one relevant system level key performance indicator (KPI).

(example: goal of the user: energy cost savings; relevant KPI: higher efficiency of the heater).

6. A translation of the system level KPI’s into technological KPI’s