

# **CoolBoost**

Nieuw Energie Onderzoek – eindrapportage  
openbaar

Hoffmann RD  
Dr.ir. M.R. Hoffmann  
[coolboost@h-rd.org](mailto:coolboost@h-rd.org)

november 2008

Dit haalbaarheidsproject is uitgevoerd onder het Besluit EOS: lange termijn; regeling Nieuw Energie Onderzoek (NEO) en via SenterNovem gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken.

Project nummer: NEOH02002

Penvoerder: Hoffmann RD

Bij het tot stand komen van deze haalbaarheidsstudie waren vanuit SenterNovem dhr. ir. P.J. Poolman en dhr. A. de Boer betrokken.

Dr.ir. M.R. Hoffmann

Hoffmann RD

email: [coolboost@h-rd.org](mailto:coolboost@h-rd.org)

<http://www.h-rd.org>

© Hoffmann RD

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1 Aanleiding . . . . .	6
1.2 Probleemstelling . . . . .	7
1.3 Doelstelling . . . . .	7
1.4 Doel van het Onderzoek . . . . .	8
1.5 Bereik van het Onderzoek en Werkwijze . . . . .	9
<b>2 Magnetocalorisch Koelen</b>	<b>10</b>
2.1 Achtergrondinformatie . . . . .	10
2.1.1 Werkingsprincipe . . . . .	11
2.1.2 Thermodynamische Kringlopen . . . . .	13
2.1.3 Entropie . . . . .	15
2.2 Resultaten van eerder Onderzoek . . . . .	16
2.3 Onderzoeksgroepen . . . . .	18
2.3.1 Risø National Laboratory, Denemarken . . . . .	18
2.3.2 Cooltech Applications in Strasbourg, Frankrijk . . . . .	19

2.3.3	University of Aveiro, Portugal . . . . .	19
2.3.4	Ensys, Canada . . . . .	19
2.3.5	University of Applied Sciences of Western Switzerland, Zwitserland	20
2.3.6	Astronautics, University of Illionois en NASA, VS . . . . .	21
2.3.7	Toshiba, Japan . . . . .	21
2.3.8	University of Cambridge en Camfridge, UK . . . . .	21
2.3.9	University of Wisconsin, VS . . . . .	21
2.4	Magnetocalorische Materiaaleigenschappen . . . . .	22
2.5	Magneetveld . . . . .	23
2.5.1	Permanente Magnetten . . . . .	24
2.6	Gebruik van Magnetocalorisch Koelen . . . . .	25
2.7	Toekomstige Toepassingsgebieden/Markt . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Systeemontwikkeling CoolBoost</b>	<b>29</b>
3.1	Inleiding . . . . .	29
3.2	Beschrijving CoolBoost . . . . .	31
3.2.1	Draagvloeistoffen . . . . .	33
3.2.2	Warmtewisselaars . . . . .	34
3.2.3	Magnetisch Veld . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Modelbeschrijving</b>	<b>36</b>
4.1	Modelvergelijkingen . . . . .	37
4.1.1	Berekening Magneetveld . . . . .	38
4.1.2	Thermodynamische Vergelijkingen . . . . .	38
4.1.3	Materiaal Parameters . . . . .	39

4.1.4	Berekening Magnetocalorische Temperatuurverandering . . .	40
4.1.5	Warmteuitwisseling . . . . .	41
4.1.6	Modelsynthese . . . . .	41
4.1.7	Dimensieloze Grootheden . . . . .	43
4.2	Simulatiemethode . . . . .	44
4.2.1	Gevoeligheidsanalyse Simulaties . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Simulatie Resultaten en Discussie</b>	<b>45</b>
5.1	Beschrijving Resultaten . . . . .	45
5.2	Analyse Resultaten . . . . .	50
5.3	Onzekerheden . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>54</b>
6.1	Samenvatting Resultaten . . . . .	54
6.2	Conclusies Simulaties . . . . .	55
6.3	Conclusies Toepassingen . . . . .	55
6.4	Haalbaarheidsanalyse . . . . .	55
6.4.1	Technische Haalbaarheid . . . . .	55
6.4.2	Economische Haalbaarheid . . . . .	56
6.5	Geïntegreerde Analyse en Beoordeling Haalbaarheid . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>58</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Symbolen</b>	<b>59</b>
	<b>Referenties</b>	<b>60</b>

## Samenvatting

Deze rapportage bevat een haalbaarheidsstudie naar een mogelijke toepassing van magnetocalorisch koelen. Met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken is via SenterNovem onder de regeling Nieuw Energie Onderzoek (NEO) onderzoek gedaan naar koelen door middel van een suspensie van magnetocalorisch actieve deeltjes in een draagvloeistof.

Magnetocalorisch koelen is gebaseerd op het veranderen van de entropie en daarmee de temperatuur van een materiaal. Binnen dit haalbaarheidsproject is ten eerste een uitgebreid literatuuronderzoek verricht naar de mogelijkheden en toepassingen van magnetocalorisch koelen. Daarbij zijn ook de ontwikkelingen bij onderzoeksinstituten buiten Nederland in beschouwing genomen.

Om de haalbaarheid van magnetocalorisch koelen met een suspensie van magnetocalorisch actieve deeltjes te kunnen beoordelen zijn simulaties met een groot aantal verschillende parameters gedaan. Uit deze simulaties komt naar voren dat de relatieve efficiëntie van magnetocalorisch koelen met een suspensie relatief laag is ten opzichte van conventionele koelsystemen. Dat betekent dat in de huidige situatie magnetocalorisch koelen geen volwaardig alternatief is voor het conventionele compressiekoelen.

Uit de simulaties blijkt dat het op dit moment nog niet nodig is te beoordelen hoe de voorgestelde concepten zich daadwerkelijk in een installatie gedragen. Pas als een hogere relatieve efficiëntie kan worden bereikt is deze vraagstelling van belang.

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

Magnetocalorisch koelen is een technologie met een grote potentie. Door de toepassing van magnetocalorisch koelen kan het energiegebruik voor koelen worden verlaagd (Russek and Zimm, 2006). Doordat geen of minder broeikasgassen (CFK's of HFK's) gebruikt worden dan bij conventioneel compressiekoelen, kan magnetocalorisch koelen bijdragen aan een duurzamer energiegebruik (Krosse et al., 2004).

In Nederland wordt magnetocalorisch koelen (nog) niet toegepast in de praktijk. Dit heeft enerzijds te maken met het prille stadium van de ontwikkelde toepassingen, en anderzijds met de zeer beperkte commerciële beschikbaarheid en economische haalbaarheid. Eerder onderzoek naar bestaande octrooien (Hordijk, 2006) toonde dat er relatief weinig octrooien op dit gebied zijn. Deze octrooien zijn vooral gericht op losse componenten van een magnetocalorisch koelsysteem. Onderzoek door TNO (Krosse et al., 2004) leidde tot aanbevelingen voor toekomstig onderzoek naar magnetocalorisch koelen. Belangrijke aanbevelingen van dit onderzoek waren onder andere:

- Het experimenteel aantonen van de haalbaarheid van concepten voor magnetocalorisch koelen.
- Het volgen van ontwikkelingen van materiaalonderzoek naar magnetocalorische materialen, omdat daardoor betere systemen onder handbereik komen.

De onderliggende haalbaarheidsstudie CoolBoost richt zich op een nieuw concept voor magnetocalorisch koelen: Het gebruik van een magnetocalorisch materiaal in

een suspensie in een vloeistof. Doordat er weinig tot geen kennis aanwezig was over het gedrag van zo'n systeem, is in eerste instantie gekozen voor een theoretische haalbaarheidsstudie, in combinatie met simulaties.

## 1.1 Aanleiding

De directe aanleiding voor CoolBoost is enerzijds de doelstelling efficiënter om te gaan met energie en anderzijds de doelstelling het gebruik van koelvloeistoffen te minimaliseren.

Efficiënter omgaan met energie voor koeling zal het energieverbruik in Nederland reduceren. Daardoor kan CoolBoost een bijdrage leveren aan het reduceren van de CO<sub>2</sub> emissie en de doelstellingen van het Kyoto protocol.

De beperking van het gebruik van schadelijke koelvloeistoffen is een belangrijke beleidsdoelstelling in Nederland en wereldwijd. Daarvoor is het zogenoemde Montreal protocol in werking getreden. Dit protocol stelt strenge eisen aan het gebruik van koelvloeistoffen vanwege hun impact op de warmtehuishouding van de atmosfeer en daarmee het effect op de opwarming van de aarde. De introductie van magnetocalorisch koelen kan het gebruik van koelvloeistoffen significant verlagen en daardoor een grote bijdrage leveren aan de doelstellingen van de Nederlandse overheid.

De potentie van magnetocalorisch koelen is in theorie groot. Een obstakel voor de toepassing tot nu toe is dat magnetocalorisch actieve materialen niet het vereiste (specifieke) koelvermogen hebben om als primair koelsysteem toegepast te worden. Het idee achter CoolBoost is dat magnetocalorisch koelen als additioneel effect in een koelmachine wordt gebruikt. Dit kan indien een secundair (of ook additioneel) koelcircuit, gebaseerd op magnetocalorisch koelen, wordt toegevoegd aan een conventioneel koelcircuit. Dit maakt het in principe mogelijk de efficiëntie van de koelmachine in zijn geheel te verhogen, en daardoor het gebruik van energie te verlagen. In het bijzonder draait het voorgestelde haalbaarheidsonderzoek om het effect van het toevoegen van kleine deeltjes magnetocalorisch materiaal in suspensie aan een koelcircuit en het effect daarvan op de prestatie van een koelmachine. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een dergelijke koelmachine (nog) niet bestaat.



## 1.2 Probleemstelling

De probleemstelling van CoolBoost wordt gevormd door de uitdaging op een efficiënte manier magnetocalorisch koelen toe te passen in koelinstallaties.

Het probleem bij de toepassing van magnetocalorisch koelen in het algemeen en CoolBoost in het bijzonder is dat er onvoldoende kennis is om magnetocalorisch koelen technisch te kunnen toepassen in “normale” omstandigheden. Met “normale” omstandigheden worden omstandigheden bedoeld buiten de ruimtevaart en “ultra-low temperature cooling”. In deze twee vakgebieden wordt magnetocalorisch koelen al succesvol toegepast, maar de gebruikte materialen en technieken laten zich niet direct vertalen naar toepassing in de industriële en/of huishoudelijke praktijk. Om deze vertaalslag mogelijk te maken wordt er binnen dit haalbaarheidsonderzoek naar gestreefd een kader voor (fundamenteel) vervolgonderzoek op te stellen.

Uiteraard zal de economische haalbaarheid en mogelijke toepassing van CoolBoost gevoelig zijn voor differentiële prijsverschillen met bestaande koeltechnieken.

## 1.3 Doelstelling

*Het uitwerken en evalueren van de haalbaarheid van het toepassen van het magnetocalorisch effect als secundair koeleffect en/of in een additioneel koelcircuit door middel van een suspensie van een magnetocalorisch materiaal in een vloeistof, met als doel het energieverbruik te minimaliseren en het gebruik van koelvloeistoffen te minimaliseren.*

De bovenstaande doelstelling kan verder puntsgewijs worden uitgewerkt als volgt:

- *Het uitwerken en evalueren van de haalbaarheid van het toepassen van het magnetocalorisch effect als secundair koeleffect ...* Hiermee wordt bedoeld dat binnen deze haalbaarheidsstudie onderzoek wordt gedaan naar materialen en mogelijkheden om het magnetocalorisch effect als additioneel koeleffect toe te kunnen passen. Dat betekent dat het mogelijk (zelfs zeer waarschijnlijk) is dat andere technische eisen aan een magnetocalorisch materiaal worden gesteld

dan als het materiaal in een primair koelcircuit wordt toegepast. Daardoor kan de toepassing van magnetocalorisch koelen eerder haalbaar zijn, zowel technologisch als ook economisch.

- ... *het magnetocalorisch effect als secundair koeffect en/of in een additioneel koelcircuit* ... Het voorgaande betekent dat het magnetocalorisch effect in samenhang met (bestaande) koeltechnieken moet worden bekeken. Over dit onderwerp is tot nu toe zeer weinig (tot vrijwel niets) bekend.
- ... *door middel van een suspensie van een magnetocalorisch materiaal in een vloeistof*, ... Het in een suspensie toepassen van een magnetocalorisch materiaal is het primair nieuwe effect wat wordt onderzocht binnen de voorgestelde haalbaarheidsstudie. Deze toepassing is zeer veelbelovend, omdat de overdracht van warmte vanuit een omringend vloeistof naar deeltjes in suspensie veel efficiënter kan verlopen dan warmte overdracht tussen bulk materialen. Dit komt door het veel grotere oppervlak van kleine deeltjes in vergelijking met bulk materialen.
- ... , *met als doel het energieverbruik te minimaliseren en het gebruik van koelvloeistoffen te minimaliseren*. Deze doelstellingen manifesteren zich als gevolg van het succesvol toepassen van het bovenstaande.

## 1.4 Doel van het Onderzoek

Het doel van dit onderzoek is het beoordelen van de haalbaarheid van het toepassen van magnetocalorisch koelen door middel van een suspensie van een magnetocalorisch actief materiaal in een vloeistof.

Binnen dit kader is gekozen voor een eerste theoretische studie om zo het gedrag van het systeem te kunnen beoordelen

De vraag is of deze nieuwe methode het energiegebruik van een koelsysteem significant kan reduceren en of deze reductie technisch en economisch haalbaar is. Technische haalbaarheid houdt in dat het praktisch mogelijk is deze methode binnen enkele jaren toe te passen. Economische haalbaarheid houdt in dat de toepassing van deze methode niet (of niet aanzienlijk) duurder is dan alternatieven. Daarnaast speelt

het aspect van het verminderen van broeikasgassen in koelsystemen een belangrijke rol

Een ander aspect is dat in de toekomst airconditioning tot een steeds grotere vraag naar koeling zal leiden. In deze studie is daarom ook gekeken naar potentiële toepassingen van magnetocalorisch koelen in airconditioning.

## 1.5 Bereik van het Onderzoek en Werkwijze

Het bereik van dit onderzoek bestrijkt een analyse van de haalbaarheid van het idee CoolBoost. Dit houdt onder andere de volgende deelonderzoeken in:

- Literatuurstudie.
- Inventarisatie van (bestaande) technieken voor magnetocalorisch koelen.
- Simulaties om de haalbaarheid van CoolBoost in te schatten.
- Een gevoeligheidsanalyse voor het schatten van de invloed van verschillende parameters.
- Conclusies.
- Aanbevelingen.

Het resultaat van dit rapport is een analyse van de haalbaarheid van magnetocalorisch koelen en in het bijzonder CoolBoost. Een experimentele verificatie van CoolBoost wordt binnen deze haalbaarheidsstudie niet gedaan. Daarvoor zou een veel uitgebreider onderzoekspzet nodig zijn.

## Hoofdstuk 2

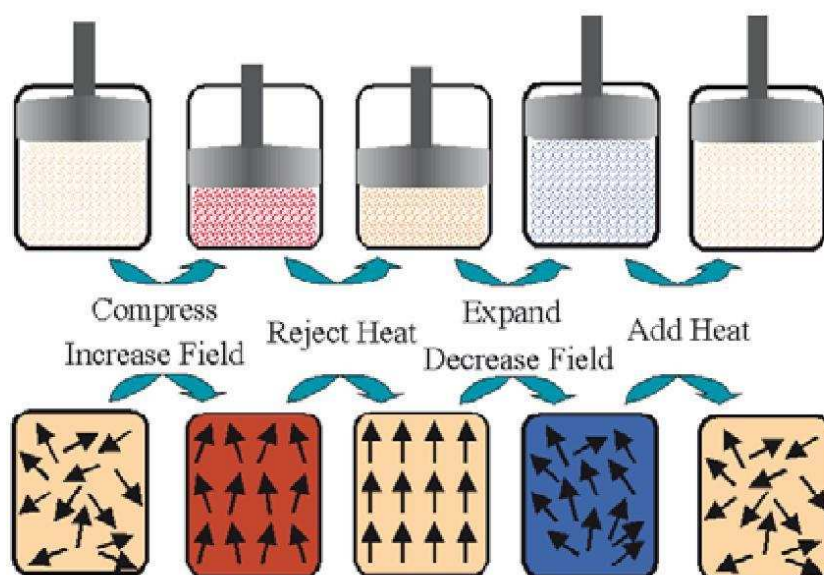
# Magnetocalorisch Koelen

Dit hoofdstuk bevat bronnenonderzoek naar technologieën en toepassingen van magnetocalorisch koelen. Daarbij is primair gebruik gemaakt van uitgebreid literatuuronderzoek, onderzoek met behulp van internet, en octrooionderzoek.

### 2.1 Achtergrondinformatie

Het magnetocalorisch effect is een natuurkundig verschijnsel dat het mogelijk maakt bepaalde materialen af te laten koelen door middel van een magnetisch veld. Het koelen met behulp van het magnetocalorisch effect is gebaseerd op het natuurkundige verschijnsel dat sommige materialen een verandering in entropie ondergaan als er een externe verandering van het magneetveld plaatsvindt. De verandering in entropie heeft als gevolg dat de temperatuur van het materiaal verandert (Warburg, 1881).

Als een magnetocalorisch materiaal in een magneetveld wordt geplaatst, wordt de magnetische spin geordend. Hierdoor wordt de entropie verlaagd en komt warmte vrij. Deze warmte kan dan naar de omgeving worden afgevoerd. Als daarna het externe magneetveld wordt opgeheven, gaat de ordening van de magnetische spin verloren. Daardoor zal het materiaal vanuit de omgeving warmte opnemen. In figuur 2.1 is de thermodynamische kringloop van magnetocalorisch koelen weergegeven in



Figuur 2.1: Thermodynamische kringloop van magnetocalorisch koelen in analogie aan kompressie-kringloop (naar Russek and Zimm (2006)).

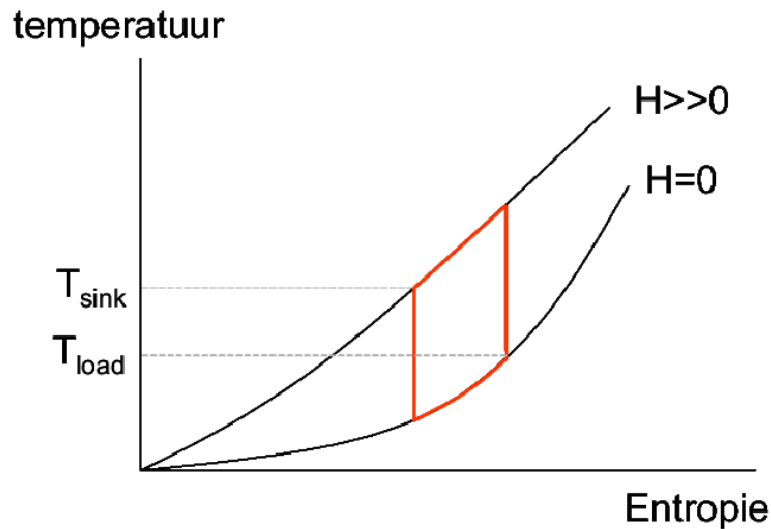
analogie aan de gas kompressie-kringloop. Daarbij zijn ook de veranderingen in magnetische spin schematisch weergegeven.

Afhankelijk van het gekozen regime van verandering van het magnetisch veld en de warmteuitwisseling, kunnen verschillende thermodynamische kringlopen worden gebruikt. In hoofdstuk 2.1.2 worden de relevante thermodynamische kringlopen beschreven, met een verwijzing naar toepassingen in eerdere onderzoeken omtrent magnetocalorisch koelen.

Recente nieuwe onderzoeksresultaten maken het mogelijk dit effect te gebruiken rond kamertemperatuur en lagere temperaturen. Daarnaast zijn gedurende de laatste jaren sterke permanente magneetmaterialen ontwikkeld, die het mogelijk maken magnetocalorisch koelen energiezuinig toe te passen.

### 2.1.1 Werkingsprincipe

Het werkingsprincipe van magnetocalorisch koelen is gebaseerd op het magnetocalorisch effect (von Ardenne et al., 2005; Brück et al., 2007). Dit effect wordt



Figuur 2.2: Temperatuur - Entropie diagram van magnetocalorisch koelen (uit Krosse et al. (2004)).

veroorzaakt door het feit dat magnetocalorisch actieve stoffen een verandering in temperatuur ondergaan als zij door een magneetveld beïnvloed worden. De verandering in temperatuur wordt veroorzaakt door een verandering in entropie.

In de vorm van een vergelijking kan de relatie weer worden gegeven als:

$$dU = T dS + dW \quad (2.1)$$

met  $U$  de interne energie,  $T$  de (absolute) temperatuur,  $S$  de entropie en  $W$  arbeid. Voor arbeid verricht door een magneet word bovenstaande vergelijking:

$$dU = T dS + \mu_0 H d(V M) \quad (2.2)$$

waarbij het symbool  $\mu_0$  de magnetische permeabiliteit weergeeft,  $H$  de magnetische veldsterkte,  $V$  het volume en  $M$  de magnetisatie. In figuur 2.2 is het temperatuur - entropie diagram van een magnetocalorische koelcyclus weergegeven.

Dit principe is al sinds lange tijd bekend, en wordt toegepast binnen de ruimtevaart en "low-temperature physics". Toepassingen op industrieel en/of huishoudelijk gebied ontbreken tot nu toe door een combinatie van factoren:

- Tot kort geleden waren er nauwelijks geschikte materialen beschikbaar om magnetocalorisch koelen rond 300 K toe te kunnen passen. Mede door onderzoek van de Universiteit van Amsterdam is daar verandering in gekomen (Tegus et al., 2002).
- Voor de toepassing is het zeer belangrijk dat de warmteoverdracht tussen het magnetocalorisch materiaal en de omgeving efficiënt verloopt. Bestaande ontwerpen voor koelmachines voldoen nauwelijks aan deze eis (Hordijk, 2006). De in deze haalbaarheidsstudie voorgestelde toepassing van een magnetocalorisch materiaal in suspensie lost het probleem van de overdracht van warmte op.
- Het bestaande wetenschappelijke en technologische onderzoek richt zich op het toepassen van het magnetocalorisch effect als enig koeffect. Juist de in deze haalbaarheidsstudie voorgestelde combinatie van een traditioneel koelcircuit samen met een magnetocalorisch koeffect kan een grote verbetering van de efficiëntie bewerkstelligen.

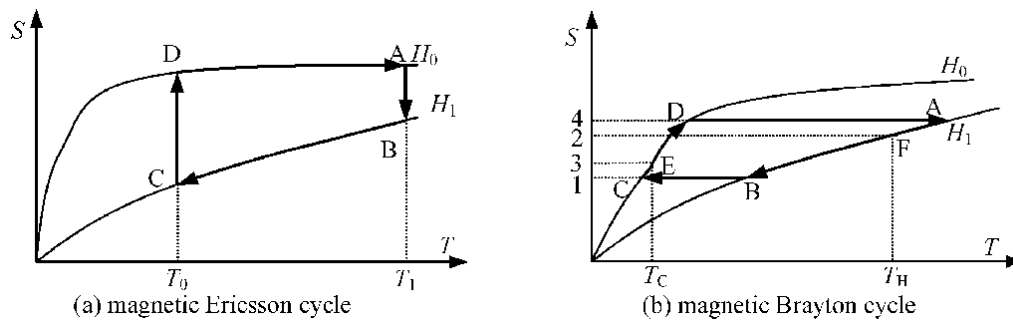
Het nieuwe aan het idee CoolBoost is het toepassen van het magnetocalorisch effect in combinatie met bestaande technologie op het gebied van koeling. Tot nu toe was (is) magnetocalorisch koelen niet grootschalig gebruikt, o.a. omdat het bereikte temperatuurverschil niet voldoende groot is. Dit probleem wordt ondervangen in CoolBoost. Dit houdt in dat een magnetocalorisch stof als suspensie in een vloeistof wordt gebruikt waardoor deze vloeistof wordt afgekoeld. Deze vloeistof kan dan als booster van een conventioneel koelcircuit functioneren. Om het idee te kunnen toepassen is na een haalbaarheidsstudie verder fundamenteel onderzoek nodig naar het gedrag van magnetocalorische stoffen in suspensie en de interactie met een extern opgewekt magneetveld.

### 2.1.2 Thermodynamische Kringlopen

In principe zijn verschillende thermodynamische kringlopen voor de realisatie van een magnetocalorisch koelsysteem mogelijk. Praktisch gezien komen rond kamertemperatuur vooral regeneratieve cycli in aanmerking. Geschikt zijn met name de magnetische Ericsson en de magnetische Brayton cyclus. Dit heeft o.a. te maken

grootheid	gas thermodynamica	magneto thermodynamica
driving force	druk	magnetisch veld
order parameter	specifiek volume	magnetisatie
externe arbeid (gesloten systeem)	$-p dV$	$-\mu_0 H_0 dM$
technische arbeid (open systeem)	$V dp$	$\mu_0 M dH_0$

Tabel 2.1: analogie tussen gas en magnetische thermodynamische kringlopen (naar Kitanovski and Egolf (2006)).



Figuur 2.3: Temperatuur - Entropie diagram van magnetocalorisch koelen (uit Yu et al. (2003)).

met de relatief grote rooster entropie bij kamertemperatuur (Yu et al., 2003) en het te bereiken temperatuurverschil.

Om een beeld te schetsen van deze kringlopen en hoe deze geconceptualiseerd kunnen worden dient tabel 2.1, waarin de parameters van de magnetische cycli worden vergeleken met de parameters van de gas cycli.

In tabel 2.2 worden de stappen van de magnetische Ericsson en Brayton kringloop beschreven. deze kringlopen lenen zich in de praktijk het meest voor het toepassen in een magnetocalorische koelmachine.



stap	Ericsson kringloop	Brayton kringloop
1	Isotherme magnetisatie	Adiabatische magnetisatie
2	(Af)koelen bij constant magnetisch veld	(Af)koelen bij constant magnetisch veld
3	Isotherme de-magnetisatie	Adiabatische de-magnetisatie
4	Opwarmen bij constant magnetisch veld	Opwarmen bij constant magnetisch veld

Tabel 2.2: Samenvatting thermodynamische kringlopen bij magnetocalorisch koelen.

### 2.1.3 Entropie

Een centrale rol in de beschrijving van de thermodynamische kringlopen en hun toepassing wordt vervuld door het concept van entropie. De entropie is een maat voor energie, en het opwekken van entropie bij een proces is een maat voor de irreversibele thermodynamische verliezen. Bij het ontwerp van een koelmachine is het dan ook van groot belang deze verliezen te minimaliseren (Bejan, 1996; Naterer and Camberos, 2008).

De vergelijking voor totale entropie bij constante druk van een magnetocalorisch materiaal is:

$$S(T, H) = S_M(T, H) + S_L(T, H) + S_E(T, H) \quad (2.3)$$

met  $S_M$  de magnetische entropie,  $S_L$  de rooster entropie en  $S_E$  de elektronen entropie. Door het variëren van een magneetveld kan de magnetische entropie  $S_M$  worden beïnvloed, en daarmee de totale entropie van een materiaal.

De totale entropie kan worden berekend met (Pecharsky and Gschneider Jr., 1996):

$$S = \int_0^T \frac{c_p}{T} dT \quad (2.4)$$

Het model voor CoolBoost is niet gebaseerd op berekeningen van de entropie, omdat daarvoor een complete set gegevens voor  $c_p$  tussen 0 en  $\sim 350 K$  bij verschillende

magnetisaties nodig is. In de wetenschappelijke literatuur zijn deze gegevens niet verkrijgbaar.

Gerelateerd aan het begrip entropie is exergie. Exergie is een maat voor het beschikbare thermodynamische potentieel (Ahern, 1980). In dit rapport wordt primair met entropie gewerkt, omdat dit conceptueel beter aansluit bij het ontwerp van een koelmachine (Bejan, 1996, 2006).

## 2.2 Resultaten van eerder Onderzoek

Het magnetocalorisch effect is voor het eerst door Warburg in 1881 beschreven (Warburg, 1881). Pas in het begin van de 20de eeuw is het magnetocalorisch effect toegepast. Eerste toepassingen waren voor het koelen bij zeer lage temperaturen door Debye (1926) en Giaque (1927).

Pas in de jaren '70 is door Brown (1976) een experiment beschreven, waarbij met behulp van een ferromagnetisch materiaal (gadolinium) rond kamertemperatuur een temperatuurverschil van 47 K werd bereikt. Daarbij werd gebruik gemaakt van een regeneratieve Ericsson cyclus.

In vervolg daarop werd door Steyert (1978) een experimentele opstelling voor een roterende magnetische koeler geconstrueerd. Daarbij werd gebruik gemaakt van de magnetische Stirling cyclus en een roterend, poreus magnetocalorisch materiaal.

Barclay (1982) gebruikte als eerste een ferrofluid voor de warmteuitwisseling in het magnetocalorisch materiaal. De opstelling was gebaseerd op een roterend wiel zoals in het experiment van Steyert (1978). Door de draaibeweging van het wiel werd het ferrofluid door het magneetveld bewogen waardoor de stroming gereguleerd werd.

Een eerste prototype van een praktische koelmachine werd geconstrueerd door Astronautics (Russek and Zimm, 2006). Dit prototype werd ontwikkeld voor toepassing in air conditioning. Kort daarna is in Strasbourg door Cooltech Applications S.A. een andere prototype gebouwd. Over dit prototype is zeer weinig bekend. Publicaties in de wetenschappelijke literatuur gaan slechts in op het ontwerp van het magneetveld (Allab et al., 2006)

Parallel daaraan heeft de onderzoeksgroep rond Prof. Egolf aan de University of Applied Sciences of Western Switzerland een nieuwe prototype gemaakt, gebaseerd op een roterend cylinder gemaakt van een mangaan legering (Bernhart, 2006; Kitanovski et al., 2004a; Egolf et al., 2006).

Ook heeft deze onderzoeksgroep meerdere patent aanvragen ingediend: Kitanovski et al. (2004b,a); Egolf et al. (2006). Voor het project CoolBoost is vooral de patentaanvraag van Kitanovski et al. (2004b) van belang, omdat deze o.a. betrekking heeft op magnetocalorische deeltjes in suspensie.

Een andere onderzoeksrichting werd bewandeld door Resler Jr. and Rosensweig. Al in 1964 publiceerde hij een theoretisch onderzoek naar het opwekken van energie door middel van het magnetocalorisch effect (Resler Jr. and Rosensweig, 1964). Kort daarna volgde een vervolg (Resler Jr. and Rosensweig, 1967). Een belangrijke nieuwe richting in het onderzoek was het gebruik van een regeneratieve cyclus. Voortbouwend op de resultaten van Resler Jr. and Rosensweig werkte Van Der Voort (1969) het effect van ruimtelijke variatie in het magneetveld uit.

Recent onderzoek aan de University of Puerto Rico (Montoya, 2005) naar het gebruik van het magnetocalorische effect voor koelen in combinatie met "heat pipes" toont aan dat het magnetocalorisch effect potentieel heeft. Wel moet worden opgemerkt dat de opstelling van Montoya met een ferrofluid werkt en is gericht op het koelen van elektronische componenten. In het onderzoek van Montoya (2005) is een relatief eenvoudig model ontwikkeld.

Voortbouwend op Rosensweig's eerdere werk is in 2006 een theoretisch onderzoek naar het gebruik van het magnetocalorische effect in suspensies van deeltjes gepubliceerd (Rosensweig, 2006). Dit onderzoek beschrijft een systeem, gebaseerd op gadolinium deeltjes in suspensie in NaK, een bij kamertemperatuur vloeibaar mengsel van Natrium en Kalium. NaK is gekozen omwille van zijn extreem hoge thermische geleidbaarheid. Het is zeer de vraag of zo'n systeem potentieel heeft voor praktische toepassing in koelsystemen. NaK is zeer reactief, en bij lekken vanuit het koelcircuit kan bij contact met water waterstof vrijkomen (brand- en explosierisico). De reactieproducten van NaK zijn zeer toxisch (Natronloog, Kaliumloog, etc) en agressief. CoolBoost maakt gebruik van het theoretisch werk van Rosensweig (2006), maar er is gekozen voor een andere draagvloeistof.

Kawanami et al. (2006) hebben recentelijk een prototype opstelling van een air

conditioning unit beschreven. Alhoewel hun opstelling zeer simpel is, hebben zij een zeer interessante optimalisatie voor gebruik rond kamertemperatuur doorgevoerd. Het nadeel van hun opstelling is dat zij geen gebruik maken van een regeneratieve cyclus en daardoor geen groot temperatuurverschil kunnen overbruggen.

In opdracht van Hoffmann RD heeft de Universiteit van Amsterdam een studie naar enkele relevante aspecten van magnetocalorisch koelen voor een toepassing zoals CoolBoost uitgevoerd (Universiteit van Amsterdam, 2007). Ook uit deze studie volgt geen direct met CoolBoost vergelijkbaar systeem.

## 2.3 Onderzoeksgroepen

In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van onderzoeksgroepen en bedrijven wereldwijd die actief zijn op het gebied van magnetocalorisch koelen. Daarbij ligt de nadruk op onderzoeksgroepen die een prototype koelmachine hebben ontwikkeld. Het is zeer waarschijnlijk dat aanzienlijk meer bedrijven bezig zijn met de ontwikkeling van magnetocalorisch koelen, maar dat de bedrijven deze informatie niet publiek maken.

### 2.3.1 Risø National Laboratory, Denemarken

Aan het Risø National Laboratory, verbonden aan de Technical University of Denmark (DTU) word sinds enkele jaren intensief onderzoek naar magnetocalorisch koelen uitgevoerd. In 2007 is een onderzoeksproject gestart, met als doel voor 2011 een werkend prototype te bouwen. Risø richt zich in haar onderzoek primair op het Active Magnetic Regenerator (AMR) concept en het ontwikkelen van nieuwe magnetocalorische materialen. Daarbij wordt vooral gezocht naar nieuwe keramische materialen (Petersen et al., 2006). In Petersen et al. (2007) is een theoretisch model voorgesteld van een AMR systeem gebaseerd op een regenerator met parallelle platen voor de warmteuitwisseling. De resultaten laten een relatieve Carnot efficiëntie van maximaal 7.2% zien.

### 2.3.2 Cooltech Applications in Strasbourg, Frankrijk

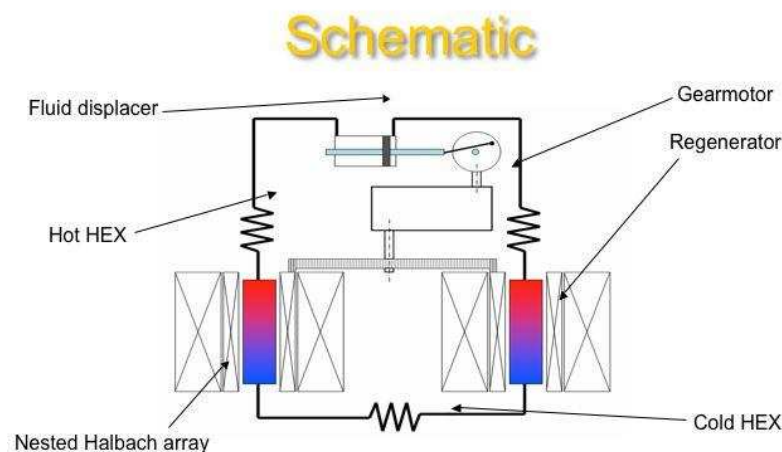
In 2003 is in Strasbourg, Frankrijk, het eerste Europese commerciële bedrijf voor het ontwikkelen van magnetocalorische koelsystemen opgericht: Cooltech Applications S.A. Dit bedrijf heeft twee patenten ingediend en door wetenschappelijke publicaties bekendheid gegeven aan hun technologie. Deze is gebaseerd op een nieuw concept voor het ontwerp van de permanente magneten en de controle van de vloeistof voor warmteuitwisseling (Allab et al., 2006; Vasile and Muller, 2006). In Vasile and Muller (2006) wordt de constructie van het koelsysteem geoptimaliseerd met de methode van Bejan (2004). Helaas zijn er verder geen details over het prototype of de performance beschikbaar.

### 2.3.3 University of Aveiro, Portugal

Aan de Universiteit van Aveiro in Portugal is een groep onderzoekers rond professor Mario Reis bezig met onderzoek naar magnetocalorische materialen. De groep is onderdeel van het "Centre for Research in Ceramics and Composite Materials - CICECO" (<http://magnetocaloric.web.ua.pt>). Speerpunt van het onderzoek is de optimalisatie van materialen m.b.t. warmtegeleiding, toxiciteit, kosten, en hoofdzakelijk een zo groot mogelijke magnetische entropieverandering. Onder andere wordt daarbij gewerkt aan La-Sr Manganiten.

### 2.3.4 Ensys, Canada

Ensys (<http://www.ensys.ca/>) is een onderzoeksinstituut, verbonden aan het Institute for Integrated Energy Systems, University of Victoria, Canada. Binnen dit instituut wordt al enkele jaren intensief onderzoek gedaan naar zowel lage temperatuur koeling, als ook naar koeling rond kamertemperatuur (figuur 2.4). Daarbij wordt zowel van experimentele opstellingen als ook numerieke simulaties gebruik gemaakt. Het onderzoek richt zich voornamelijk op AMR systemen, in combinatie met meerdere lagen van verschillende magnetocalorische materialen (Richard et al., 2004; Rowe et al., 2005).



Figuur 2.4: Schema van de "Permanent Magnet Magnetic Refrigerator (PMMR)" (<http://www.ensys.ca>).

### 2.3.5 University of Applied Sciences of Western Switzerland, Zwitserland

De zeer actieve onderzoeksgroep rond Prof. Egolf en Kitanovski heeft zowel theoretisch onderzoek verricht (Kitanovski and Egolf, 2006), als ook een prototype opstelling gebouwd (Bernhart, 2006). Daarnaast zijn meerdere octrooien ingediend (Kitanovski et al., 2004b,a; Egolf et al., 2006). Het theoretische onderzoek richtte zich vooral op de thermodynamica van cyclische magnetocalorische koelprocessen. Daarbij is een vernieuwde beschrijving van de Kelvin kracht gebruikt. Ook zijn systemen vergeleken waarbij koelcascades worden gebruikt met systemen die gebruik maken van een regeneratieve cyclus.

Het in octrooi Kitanovski et al. (2004a) beschreven mechanisme, gebaseerd op een roterende cylinder gemaakt van een mangaan legering is als prototype opgesteld (Bernhart, 2006). Dit heeft tot op heden niet geleid tot een commerciële prototype.

### 2.3.6 Astronautics, University of Illionois en NASA, VS

De onderzoeksgroepen rond Pecharsky, Gschneider, Russek en Zimm zijn al zeer lange tijd actief op het gebied van magnetocalorisch koelen (Pecharsky and Gschneider Jr., 1996, 2001). Astronautics was het eerste bedrijf wat een commerciële prototype voor air-conditioning heeft ontwikkeld. In een recent artikel (Russek and Zimm, 2006) wordt het potentieel voor op gadolinium gebaseerde koelinstallaties economisch vergeleken met alternatieven. De voornaamste conclusie is dat magnetocalorisch koelen in principe goedkoper is dan conventioneel compressiekoelen.

### 2.3.7 Toshiba, Japan

Enkele jaren geleden waren Chubu Electric en Toshiba in Japan bezig met het ontwikkelen van een prototype magnetocalorische koeler. De laatste jaren zijn echter geen nieuwe ontwikkelingen bekend.

### 2.3.8 University of Cambridge en Camfridge, UK

Aan de University of Cambridge wordt al enkele jaren onderzoek gedaan naar magnetocalorisch koelen. De onderzoeksgroep rond Prof. Sandeman is vooral actief op het gebied van materiaalonderzoek. In een recent artikel is een materiaal met een negatief magnetocalorisch effect voorgesteld (Sandeman et al., 2006). Een negatief magnetocalorisch effect betekent dat het materiaal bij een verhoging van het magnetoveld kouder wordt. Tot op heden zijn er geen of nauwelijks andere onderzoeksgroepen op dit specifieke terrein bezig. In 2004 heeft dit nieuwe onderzoek geleid tot het oprichten van een bedrijf: Camfridge Ltd. (<http://www.camfridge.com/>). Tot op heden heeft dit bedrijf geen producten voortgebracht.

### 2.3.9 University of Wisconsin, VS

De University of Wisconsin heeft in samenwerking met het Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute een numeriek model voor een "active magnetic regenerator" (AMR) systeem ontwikkeld en gepubliceerd (Engelbrecht et al., 2005).

Dit model is vergeleken met een prototype koelmachine ontwikkeld bij Astronautics (zie 2.3.6). In hun publicatie gaan de onderzoekers uitgebreid op de veronderstellingen van de modellering in. Ondanks een aantal vereenvoudigingen geeft hun model resultaten die kunnen worden gebruikt bij het verder optimaliseren van magnetocalorische koelmachines. Een belangrijke bijdrage van het numerieke model is een beschrijving van het effect van de interne temperatuurgradienten in AMR regeneratoren (Engelbrecht et al., 2006).

## 2.4 Magnetocalorische Materiaaleigenschappen

Magnetocalorische materialen zijn stoffen die bij een verandering van het magneetveld een verandering in entropie en daarmee van temperatuur ondergaan. Uiteraard is de verandering in entropie afhankelijk van de temperatuur.

Een vereenvoudigde beschrijving is als volgt: Als men uitgaat van een paramagnetisch materiaal, d.w.z. een materiaal dat bij afwezigheid van een magneetveld geen magneet is, en dit materiaal wordt geplaatst in een magneetveld, dan verandert de oriëntatie van de magnetische dipolen in het materiaal. De thermodynamische vergelijkingen die dit gedrag beschrijven zijn opgenomen in Bejan (2006). Als de dipolen geordend zijn, is de entropie verlaagd en neemt de temperatuur toe. Als nu de warmte wordt afgevoerd en daarna het magneetveld wordt verlaagd, gaat de ordening van de dipolen verloren. Daardoor verhoogd de entropie van het materiaal en daalt de temperatuur. Dit heeft als gevolg dat het materiaal warmte uit de omgeving kan opnemen en daardoor de omgevingstemperatuur kan verlagen.

In de praktijk wordt vaak gewerkt met experimentele data en correlaties om de materiaaleigenschappen te beschrijven in een simulatiemodel (Siddikov et al., 2005). Ook wordt gebruik gemaakt van theoretische beschrijvingen (Brown, 1976; Steyert, 1978; Hashimoto et al., 1981).

Pecharsky and Gschneider Jr. (2001) hebben in een onderzoek verschillende materialen en manieren om de magnetocalorische materiaaleigenschappen te beschrijven vergeleken. Zij concluderen dat op gadolinium gebaseerde materialen een veelbelovende optie zijn voor het gebruik in magnetocalorische koelsystemen.



Contrasterend daarmee heeft recent onderzoek aan de Universiteit van Amsterdam een andere kijk op het gebruik van magnetocalorische materialen opgeleverd (Brück et al., 2007). De onderzoeksgroep rond Brück, Tegus, Thanh, and Buschow vindt het meer waarschijnlijk dat La(Fe,Si)H of Mn gebaseerde materialen in praktische toepassingen zullen worden gebruikt.

Ook het onderzoek van Kitanovski and Egolf (2006), waarin de verschillende thermodynamische kringlopen worden beschreven, vormt een basis om het effect van het gebruik van verschillende magnetocalorische materialen te vergelijken. Yu et al. (2003) geven een overzicht van het gebruik van verschillende materialen voor magnetocalorisch koelen.

Materialen gebaseerd op gadolinium en gadolinium legeringen zijn het meest gebruikt in magnetocalorische koelsystemen. In eerste instantie komt dit door het relatieve grote magnetocalorische effect, en in tweede instantie door hun relatief kostenvoordeel ten opzicht van andere materialen (Russek and Zimm, 2006), alhoewel de meningen hierover verdeeld zijn (Brück et al., 2007).

Een relatief nieuwe ontwikkeling zijn materialen die bij een verhoging van het externe magneetveld een verlaging van de temperatuur ondergaan (Sandeman et al., 2006). Dit zogenoemde negatieve magnetocalorische effect is tot op heden niet in prototypes toegepast. Het potentieel van materialen met een negatief magnetocalorisch effect is groot, omdat daarmee relatief eenvoudiger een efficiënte koelmachine geconstrueerd kan worden dan met materialen met een positief magnetocalorisch effect.

Voor het project CoolBoost is gebruik gemaakt van in de wetenschappelijke literatuur gepubliceerde data en correlaties. Specifiek zijn Siddikov et al. (2005) en Engelbrecht et al. (2005) gebruikt voor het parameteriseren van het simulatiemodel, in combinatie met Li et al. (2006); Hashimoto et al. (1981) voor het thermodynamische sub-model.

## 2.5 Magneetveld

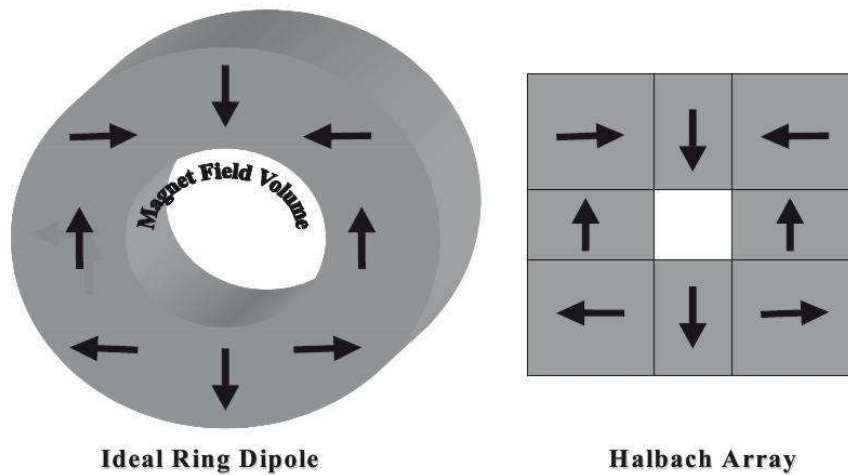
Naast de magnetocalorische materialen is het gebruikte magneetveld een essentiële factor in het koelsysteem. In principe bestaan verschillende opties om dit magneet-

veld op te wekken (Craik, 1997):

1. Elektromagnetische opwekking. Dit heeft als voordeel dat sterke magneetvelden eenvoudig kunnen worden opgewekt, en dat ook eenvoudig zowel een variatie in ruimte en tijd in het magneetveld kan worden aangebracht. Het belangrijkste nadeel is het relatief grote energiegebruik. Daardoor is elektromagnetische opwekking niet interessant binnen CoolBoost.
2. Supra-geleidende magneten. Deze technologie wordt vooral gebruikt bij zeer lage temperatuur koeling. Supra geleidende magneten hebben in principe geen energie nodig om een (sterk) magneetveld in stand te houden. Binnen het project CoolBoost is deze mogelijkheid van het opwekken van een magneetveld niet interessant, omdat deze magneten praktisch alleen bij zeer lage temperaturen (onder 23 K) werken (von Ardenne et al., 2005).
3. Opwekking door middel van permanente magneten (Campbell, 1996; Coey, 2002; Vasile and Muller, 2006). Door de beschikbaarheid van zeer sterke permanente magneetarrays in zogenoemde Halbach configuraties kunnen de gewenste magneetvelden opgewekt worden. Een Halbach configuratie is een ruimtelijke plaatsing van permanente magneten die een ring-dipol benaderd (figuur 2.5. Door de ruimtelijke configuratie te veranderen is het zelfs mogelijk het magneetveld "aan en uit te schakelen", en zo een temporaire variatie op te wekken. Ook is het eenvoudig een ruimtelijke gradiënt in het magneetveld te construeren. Een relatief nadeel ten opzichte van de andere technologieën is dat de opgewekte magneetvelden in de praktijk maximaal 2 – 3 Tesla zijn. Een tweede nadeel is dat de massa van de permanente magneten relatief groot is.

### 2.5.1 Permanente Magnetten

Als permanente magneten worden gebruikt, dan moet een keuze worden gemaakt uit het materiaal voor de permanente magneet in de constructie. In de praktijk worden meestal  $ND_2Fe_{14}B$  materialen gebruikt (Russek and Zimm, 2006). De configuraties zijn normaal gesproken gebaseerd op Halbach configuraties. De onderzoeksgroep rond Allab, Kedous-Lebouc, Yonnet, and Fournier heeft een praktische



Figuur 2.5: Halbach configuratie in analogie aan ring-dipol (naar Russek and Zimm (2006)).

methode ontwikkeld voor het ontwerpen van het benodigde magnetveld voor magnetocalorisch koelen (Allab et al., 2006). Hun methode is gevalideerd aan de hand van twee- en driedimensionale eindige elementen berekeningen. Een prototype gebaseerd daarop is in gebruik genomen bij Cooltech-Applications S.A. in Strasbourg (Vasile and Muller, 2006).

## 2.6 Gebruik van Magnetocalorisch Koelen

Tot op heden wordt magnetocalorisch koelen vooral toegepast in de ruimtevaart en zeer lage temperatuur koeling. Bij zeer lage temperatuur koeling rond het absolute nulpunt wordt de zogenoemde "one-shot" de-magnetisatie toegepast. Dit gebruik is relatief eenvoudig en efficiënt, omdat de rooster entropie van de gebruikte materialen bij zeer lage temperaturen uiterst laag is. Bij kamertemperatuur daarentegen moet wel degelijk met de roosterentropie rekening gehouden worden en zijn daarom andere toepassingen nodig.

## 2.7 Toekomstige Toepassingsgebieden/Markt

In eerste instantie ligt de primaire markt vermoedelijk op het gebied van grotere koelinstallaties. Dit heeft te maken met het feit dat CoolBoost als secundair circuit en/of effect binnen een koelinstallatie kan werken. Daardoor is het eerder mogelijk het optimale temperatuurverschil voor magnetocalorisch koelen te bereiken. In feite wordt dan het conventionele compressiecircuit gebruikt om het magnetocalorische circuit optimaal in te regelen. Als voorbeelden kunnen dienen:

- koelinstallaties in supermarkten
- air-conditioning installaties in gebouwen
- koel- en vrieshuizen

Een tweede potentiële markt zijn koelinstallaties waarbij het te overbruggen temperatuurverschil niet groot is. Dan is het zelfs mogelijk dat CoolBoost als primair koeffect voldoende is. Te denken valt bijvoorbeeld aan klimaatregeling in auto's. Daarnaast kan een toekomstig toepassingsgebied liggen in het domein van warmtepompen.

Een aantal aspecten van magnetocalorisch koelen maken de toepassing in automobielen bijzonder interessant:

- Er is geen koelvloeistof nodig, dus geen kans op lekkage.
- Daardoor is er ook verminderd brandgevaar.
- In theorie is door het beperkte aantal bewegende delen zeer weinig onderhoud nodig (in vergelijking met op compressie gebaseerde air conditioners).
- De motor van de auto kan zorgen voor het benodigde vermogen voor de pompen.

Het is te verwachten dat voor de markt van kleinere koelinstallaties, of installaties met een enkel verdampingscircuit, zoals huishoudelijke koelkasten, de techniek van

CoolBoost vooralsnog niet geschikt is. Dit komt door het relatief kleine te bereiken temperatuurverschil.

Door het karakter van een haalbaarheidsstudie is het niet zonder meer mogelijk betrouwbare uitspraken over de omvang van de (toekomstige) markt voor CoolBoost te doen, omdat er (nog) te weinig kennis aanwezig is. Wel is uit het bovenstaande duidelijk dat de potentiële markt voor CoolBoost aanzienlijk is mits de relatieve efficiëntie hoog genoeg is. In tabel 2.3 wordt een schematisch overzicht gegeven van de mogelijke toepassingen van CoolBoost. Wat opvalt aan dit overzicht is dat een constructie met een regeneratieve kringloop de meeste potentiële toepassingen heeft. Ook de combinatie met een conventioneel koelsysteem is goed mogelijk, maar door deze combinatie van twee systemen zal CoolBoost in zijn geheel veel complexer worden.

De toekomstige toepassing van magnetocalorisch koelen is afhankelijk van nieuwe materialen en de verwachte prijzen. In principe wordt het bereikte temperatuurverschil groot door het gebruik van een regeneratieve cyclus, maar dat maakt het in de praktijk minder efficiënt door additionele verliezen van een secundair kringloop. Regeneratieve kringlopen maken het wel mogelijk het magnetocalorische materiaal rond zijn optimale temperatuurbereik te gebruiken.

De markt voor CoolBoost hang uiteraard ook af van de (verdere) ontwikkeling van andere innovatieve koeltechnologieën. Bijvoorbeeld  $CO_2$  koelen is een al praktisch toegepaste nieuwe koeltechnologie, en in de toekomst wordt waarschijnlijk ook absorptiekoelen steeds meer gebruikt.

	niet regeneratieve kringloop	regeneratief kringloop	in combinatie met conventioneel koelsysteem
bereikbaar temperatuurverschil	klein	groter	groot
toepassingen	mogelijk potentieel		
air conditioning in gebouwen	—	mogelijk	mogelijk
air conditioning voor auto's	—	mogelijk	onwaarschijnlijk
koelhuizen	—	mogelijk	mogelijk
koelinstallaties in supermarkten	—	mogelijk	mogelijk

Tabel 2.3: Schematisch overzicht van de mogelijke toepassingen van CoolBoost.

## Hoofdstuk 3

# Systeemontwikkeling CoolBoost

De ontwikkeling van CoolBoost is gebaseerd op een overzicht van tot nu toe gerealiseerde en bestudeerde magnetocalorisch koelmachines. Daarbij is gebleken dat koelmachines gebaseerd op suspensies van een magnetocalorische materiaal in een draagvloeistof relatief weinig bestudeerd zijn, en daardoor in principe een nog relatief onbekend terrein vormen.

### 3.1 Inleiding

Magnetocalorische koelsystemen kunnen worden ingedeeld naar de thermodynamische kringlopen die zij gebruiken. De volgende tabel (tabel 3.1) geeft aan de hand van in de literatuur gepubliceerde beschrijvingen de gebruikte thermodynamische kringloop weer.

Yu et al. (2003) hebben een overzicht van het gebruik van de verschillende thermodynamische kringlopen gepubliceerd. Hun conclusie is dat de magnetische Ericsson en Brayton kringlopen, met een regenerator, de beste optie zijn voor magnetocalorisch koelen rond kamertemperatuur. Een regenerator kan op verschillende manieren in de koelcyclus worden geïntegreerd. Bij de praktische toepassing van magnetocalorisch koelen is een regenerator nodig om de in de praktijk optredende temperatuurverschillen te kunnen overbruggen. Deze temperatuurverschillen zijn normaal

thermodynamische kringloop	literatuurverwijzing
Ericsson	Brown (1976), Kirol (Yu et al., 2003)
Brayton	Steyert (1978); Barclay (1982); Rosensweig (2006); Kawanami et al. (2006); Petersen et al. (2006); Rowe et al. (2005); Russek and Zimm (2006); Vasile and Muller (2006); Allab et al. (2006)

Tabel 3.1: Magnetocalorische koelsystemen, gerangschikt naar thermodynamische kringloop

gesproken groter dan de door het magnetocalorisch effect bereikte temperatuurverschillen. Pas daardoor wordt magnetocalorisch koelen haalbaar. Mogelijkheden voor de regeneratoren zijn:

1. Externe regeneratoren. Hierbij wordt de warmteoverdracht tussen het magnetocalorische materiaal en de generator gefaciliteerd door een vloeistof voor warmteuitwisseling.
2. Interne regeneratoren. Hierbij worden zowel het magnetocalorische materiaal als ook de regenerator in het magnetische veld geplaatst. Deze twee materialen zijn dan ook in direct contact voor het faciliteren van de warmteuitwisseling.
3. Actieve magnetische regenerator. In de AMR kringloop is het magnetocalorische materiaal zowel koelmateriaal als ook regenerator. Daardoor worden de irreversibele verliezen van warmteuitwisseling tussen regenerator materiaal en magnetocalorisch materiaal geminimaliseerd.

Een tweede manier van indelen van de systemen is door hun constructie te bekijken. Daarbij zijn vooral de twee volgende van belang: AMR (Active Magnetic Regenerator) systemen en systemen met een regeneratieve vloeistofkringloop. De meeste tot nu toe gerealiseerde prototypes zijn gebaseerd op het AMR principe. Doordat in de



AMR cyclus het magnetocalorisch materiaal zowel regenerator als ook koelmateriaal is, moet het de verschillende stadia van de thermodynamische cyclus doorlopen. Dat vereist óf een relatieve beweging in en uit het magneetveld, óf een in de tijd variabel magneetveld (Vasile and Muller, 2006). Ook moet de regenerator bij verschillende processtappen gescheiden worden van het materiaal voor warmteoverdracht. Dit is normaal gesproken een vloeistof, maar er zijn ook ideeën ontwikkeld om daarvoor een gas te gebruiken. In de praktijk zijn AMR systemen dan ook gebaseerd op periodieke heen en weerbeweging van een vloeistof voor warmteuitwisseling.

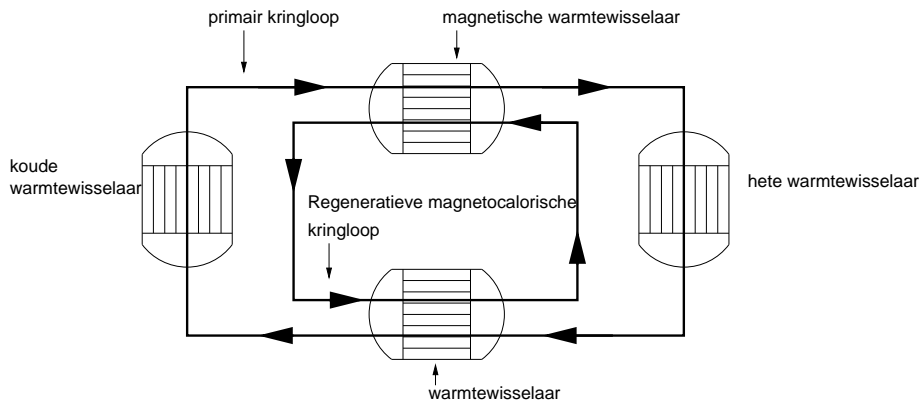
Eerdere koelmachines gebruikten een roterend wiel (Barclay, 1982), waarin het magnetocalorische materiaal is geplaatst. Een vergelijkbare techniek wordt toegepast door Astronautics. Met behulp van de rotatie van het wiel werd het magnetocalorisch materiaal in en uit het magneetveld bewogen.

Al in Kitanovski and Egolf (2006) wordt gesteld dat de toekomst van magnetocalorisch koelen ligt in systemen die gebruik maken van ferrohydrodynamica (Rosensweig, 1997). Eerste patenten voor dergelijke systemen zijn aangevraagd: Kitanovski et al. (2004b); Egolf et al. (2006). In eerder onderzoek door Bisio et al. (1999) werden verschillende alternatieve configuraties theoretisch onderzocht.

Recent is er vernieuwde belangstelling voor dit onderwerp (Rosensweig, 2006). In dit artikel wordt theoretisch een mogelijke configuratie geanalyseerd. CoolBoost is ten dele gebaseerd op dit ontwerp. Maar er zijn een aantal belangrijke aanpassingen doorgevoerd.

## 3.2 Beschrijving CoolBoost

Het systeem CoolBoost bestaat uit twee vloeistof-circuits: een primair circuit waarin bijvoorbeeld een koude warmtewisselaar warmte van het te koelen systeem opneemt en een warme warmtewisselaar waarmee warmte aan de omgeving wordt afgegeven (figuur 3.1). Dit primaire circuit is met twee warmtewisselaars gekoppeld aan een intern, regeneratieve magnetische koelcircuit. De thermodynamische cyclus is een magnetische Brayton cyclus. Het is mogelijk de primaire cyclus te koppelen aan een conventioneel compressie koelcircuit, en daardoor een gecombineerde koelmachine te realiseren. Zo'n koppeling maakt het bereikte temperatuurverschil groter, met als nadeel een complexere constructie.



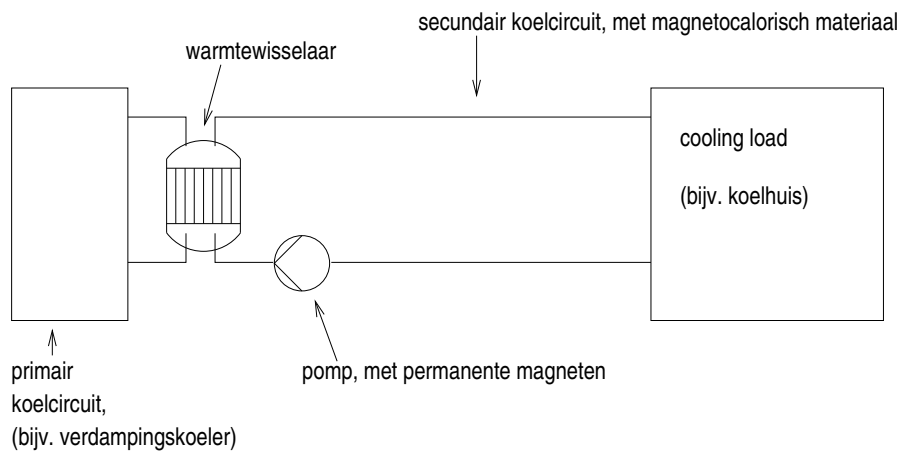
Figuur 3.1: Schema vloeistofkringlopen in CoolBoost.

Als het te overbruggen temperatuurverschil met enkel het interne circuit kan worden bereikt, kan de primaire circuit worden weggelaten wat resulteert in een niet regeneratieve koelmachine.

De vloeistof in beide circuits wordt door een pomp bewogen. De vloeistof in het regeneratieve circuit stroomt tegenovergesteld aan de vloeistof in het primaire koelcircuit. In dit interne regeneratieve circuit wordt de suspensie van magnetische deeltjes voortbewogen. De suspensie wordt in de warme warmtewisselaar in een magneetveld geplaatst. Hierin wordt dan warmte afgegeven aan het primaire koelcircuit. Bij het verlaten van het magneetveld verlaagd de temperatuur van het regeneratieve circuit, en wordt in de koude warmtewisselaar warmte opgenomen vanuit het primaire koelcircuit.

Het primaire koelcircuit neemt in de koude warmtewisselaar warmte op van het te koelen systeem. Daarna stroomt de vloeistof door een warme warmtewisselaar met magneetveld, waarin het extra warmte opneemt vanuit het regeneratieve circuit. Daarna geeft de warme vloeistof warmte af naar de omgeving in de warme warmtewisselaar. Vervolgens stroomt de vloeistof door de koude warmtewisselaar van het regeneratieve circuit, en wordt het verder afgekoeld. De nu koude vloeistof stroomt dan naar de primaire koude warmtewisselaar om hier vervolgens weer warmte op te nemen van het te koelen systeem.

De twee primaire warmtewisselaars kunnen conventionele warmtewisselaars zijn. Belangrijk is dat zij relatief efficiënt zijn. De koude warmtewisselaar, die het primaire en het regeneratieve circuit koppelt is een conventionele warmtewisselaar. De warme



Figuur 3.2: Schema koppeling Coolboost met conventionele koelmachine.

warmtewisselaar, die het primaire en het regeneratieve circuit koppelt is daarentegen een warmtewisselaar, die is geplaatst in een magneetveld. Daardoor is deze warmtewisselaar van een speciale vorm. Het magneetveld in deze warmtewisselaar wordt opgewekt door permanente magneten. De warmtewisselaar moet in het magnetic gap passen. Door de veldsterkte te variëren, kan de benodigde arbeid voor het pompen van de vloeistof door het magneetveld worden gevarieerd (Van Der Voort, 1969).

Een tweede mogelijkheid voor de realisatie van CoolBoost is dat het primaire koelcircuit ook het primaire koelcircuit is van een conventionele compressie koelcircuit. in figuur (hier ref. fig) is dit schematisch weergegeven.

Daardoor werkt het magnetisch circuit als een booster voor het conventionele koelcircuit. Belangrijk hierbij is het relatief grote bereikte temperatuurverschil, wat veroorzaakt wordt door het compressiekoelen.

### 3.2.1 Draagvloeistoffen

In het primaire en secundaire koelcircuit kunnen zonder meer verschillende vloeistoffen voor de warmteoverdracht worden gebruikt. De gebruikte vloeistof in het primaire koelcircuit is voor het uitwerken van het systeem CoolBoost vooral van belang voor de warmtecapaciteit in combinatie met de massaflux. De vloeistof in het

magnetische, regeneratieve circuit daarentegen dient ook als draagvloeistof voor de suspensie van de magnetocalorische deeltjes. Daardoor moeten de eigenschappen van deze vloeistof worden afgestemd op het magnetocalorisch materiaal. Wenselijk zijn een lage viscositeit, een dichtheid die in de buurt ligt van het magnetocalorisch materiaal en een zo hoog mogelijke warmtegeleidbaarheid.

Hierbij is het ook van belang de warmtecapaciteit van de draagvloeistof af te stemmen op het magnetocalorische materiaal. Hoe hoger de warmtegeleiding in de suspensie is, des te makkelijker en efficiënter wordt in de warmtewisselaars warmte opgenomen c.q. afgegeven aan het primaire koelcircuit (Bejan, 1996; Rosensweig, 1997, 2006). In het algemeen kan worden gesteld dat bij een relatief grote warmtecapaciteit het bereikte temperatuurverschil van de suspensie relatief klein is, maar dat ook de massaflux relatief klein kan zijn. Bij een lagere warmtecapaciteit daarentegen zijn grotere temperatuurverschillen mogelijk, die gepaard gaan aan een grotere benodigde massaflux.

### 3.2.2 Warmtewisselaars

In principe kunnen in het systeem CoolBoost verschillende type warmtewisselaars worden gebruikt. In Rosensweig (2006) bijvoorbeeld worden “shell and tube” warmtewisselaars gemodelleerd. Deze keuze heeft te maken met het constante magnetische veld en de efficiëntie. In Vasile and Muller (2006) worden “flat plate” warmtewisselaars gebruikt, waarbij de warmtewisselaar zelf uit het magnetocalorische materiaal is gemaakt. De keuze voor een specifiek ontwerp van de warmtewisselaar is dan ook afhankelijk van de manier waarop het (permanente) magneetveld wordt gerealiseerd. Stoecker (1989) en Bejan et al. (1996) geven een overzicht van de meest voorkomende mogelijkheden.

Voor de simulaties is het voldoende de warmtewisselaars eigenschappen toe te kennen die van invloed zijn op het vermogen dat nodig is voor het rondpompen van de vloeistoffen bij een bepaald bereikt temperatuurverschil.

### 3.2.3 Magnetisch Veld

Binnen CoolBoost wordt ervan uitgegaan dat het magnetisch veld wordt opgewekt door middel van permanente magneten. Zij kunnen worden geplaatst in een Halbach configuratie (Coey, 2002; Universiteit van Amsterdam, 2007; Allab et al., 2006). Daardoor is het mogelijk een relatief hoog magnetisch veld op te wekken. In de praktijk zal waarschijnlijk een veld rond 2Tesla kunnen worden opgewekt, maar in de simulaties zijn verschillende sterktes van het magneetveld getest.

## Hoofdstuk 4

# Modelbeschrijving

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste vergelijkingen en hun gebruik in CoolBoost beschreven. Daardoor is het mogelijk de modellering van CoolBoost te vergelijken met andere modellen uit de literatuur.

Als basis voor het implementeren van een simulatiemodel voor CoolBoost is de beschrijving van Rosensweig (2006) gebruikt. In dit artikel wordt een op expliciete vergelijkingen gebaseerd model beschreven. Het model van Rosensweig is gecombineerd met ideeën uit Li et al. (2006) en op een meer abstracte manier geïmplementeerd, vergelijkbaar aan (Russek and Zimm, 2006). Daarnaast zijn vergelijkingen en modelleerprincipes overgenomen uit de volgende wetenschappelijke literatuur: Hashimoto et al. (1981); Li et al. (2006); Tagliafico et al. (2006); Russek and Zimm (2006).

Rosensweig (2006) gebruikt een simpel, parametrisch model voor het modelleren van de efficiëntie van de warmtewisselaar. In het model voor CoolBoost is er echter voor gekozen de warmtewisselaars niet expliciet te modelleren, maar vereiste interne warmtestromen tussen het primaire en het regeneratieve circuit direct te berekenen. Daardoor komen de parameters van de warmtewisselaars alleen indirect terug in de berekening van het vereiste vermogen om de vloeistoffen rond te pompen.

Een ander voorbeeld voor het CoolBoost model is gegeven in het artikel van Li et al. (2006). Alhoewel dit model een AMR circuit modelleert, is het toch van belang door de vergelijkbare opzet van het CoolBoost model. In CoolBoost is ervoor gekozen

de temperatuurverandering door veranderingen in het magnetisch veld direct te berekenen, gebruik makend van Li et al. (2006).

In Engelbrecht et al. (2005) is een gedetailleerd model opgesteld. Dit model is gebruikt om de performance van een bestaande prototype door te rekenen. Daarmee is het model gevalideerd, en is het mogelijk gebleken een optimalisatie van de parameters van het prototype door te voeren. Het model van Engelbrecht et al. (2005) is niet zonder meer geschikt voor CoolBoost, omdat een exacte specificatie van een prototype voor het simulatiemodel moet worden gegeven. Dat betekent dat het model te specifiek is. Daarom is voor CoolBoost een meer generiek model ontwikkeld.

## 4.1 Modelvergelijkingen

Het model voor CoolBoost kan in de vorm van wiskundige vergelijkingen expliciet worden weergegeven. In dit deel van het rapport worden de vergelijkingen en parameters van het model dan ook gegeven. Het model is gebaseerd op de uitwisseling van warmte en het daarbij benodigde vermogen.

Het vermogen  $Q$  bij een verandering van temperatuur  $\Delta T$  van een massaflux  $\dot{m}$  met warmtecapaciteit  $c_p$  is:

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4.1)$$

Deze vergelijking wordt toegepast op het magnetocalorisch materiaal en de suspensie in zijn geheel. Bij een gegeven verandering van de magnetische fluxdichtheid van het magneetveld, verandert de temperatuur van het magnetocalorisch materiaal. De bereikte verandering van temperatuur bij magnetisatie of de-magnetisatie verschilt. Dit is het gevolg van warmteuitwisseling van het regeneratieve circuit met het primaire circuit, waardoor het materiaal een andere temperatuur aanneemt. Het maximaal bereikbare vermogen is gegeven door het minimale temperatuurverschil dat kan worden bereikt ten opzichte van de koude dan wel hete randvoorwaarden,

$$Q_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} \dot{m} c_p \Delta T_{mag}^+ \\ \dot{m} c_p \Delta T_{mag}^- \end{array} \right. \quad (4.2)$$

met  $\Delta T_{mag}^+$  en  $\Delta T_{mag}^-$  de verandering van temperatuur door een verhoging dan wel een verlaging van de veldsterkte van het externe magneetveld.  $\Delta T_{mag}$  van een magnetocalorisch materiaal is primair afhankelijk van de sterkte van het gebruikte magneetveld en de temperatuur. Bij het ontwerp van een koelmachine kan door de wijze van constructie invloed worden uitgeoefend op de massaflux  $\dot{m}$ , en door de keuze van de vloeistoffen voor warmteuitwisseling op de warmtecapaciteit  $c_p$  van de suspensie.

### 4.1.1 Berekening Magneetveld

In CoolBoost is gekozen voor het opwekken van het magneetveld door middel van permanente magneten. De magnetische fluxdichtheid  $B$  is gegeven door:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (4.3)$$

met  $\mu_0$  de magnetische permeabiliteit,  $H$  de magnetische veldsterkte en  $M$  de magnetisatie. Doordat  $M$  zelf een niet lineaire functie van  $H$  is (vergelijking 4.4), wordt vergelijking 4.3 binnen CoolBoost door middel van een iteratief proces berekend. Bij de simulaties is gewerkt met verschillende waarden van de magnetische fluxdichtheid  $B$  als randvoorwaarde. Daaruit zijn dan de magnetische veldsterkte  $H$  en magnetisatie  $M$  van het magnetocalorische materiaal berekend.

### 4.1.2 Thermodynamische Vergelijkingen

Voor het modelleren van het bereikte temperatuurverschil is het van groot belang een relatief nauwkeurig model te gebruiken. Na uitgebreid literatuuronderzoek (Rosensweig, 2006; Li et al., 2006; Hashimoto et al., 1981; Tagliafico et al., 2006; Engelbrecht et al., 2005; Pecharsky and Gschneider Jr., 1996, 2001; Siddikov et al., 2005) is gekozen voor het model van Hashimoto et al. (1981). De door Hashimoto et al. gebruikte vergelijkingen zijn equivalent aan de vergelijkingen gebruikt in Rosensweig (2006). Een mogelijk alternatief zou de correlatie zoals opgesteld door Siddikov et al. (2005) zijn. Doordat deze correlatie maar een zeer beperkte betrouwbaarheid heeft is binnen CoolBoost gekozen om de magnetisatie en daaruit volgend het temperatuurverschil met het theoretische model uit Hashimoto et al. (1981) te berekenen.



Daarbij is de betrouwbare correlatie voor de warmtecapaciteit van gadolinium bij verschillende veldsterktes van Siddikov et al. (2005) gebruikt.

De modelvergelijkingen voor de magnetisatie is een functie van de zogenoemde Brillouin functie  $B_J(\alpha)$ :

$$M(T, H) = Ng\mu_B J B_J(\alpha) \quad (4.4)$$

met  $N$  het spin getal,  $g$  de gyromagnetische factor,  $\mu_B$  het Bohr magnetron en  $J$  het quantumgetal.  $B_J$  is de Brillouin functie, gegeven door:

$$B_J(\alpha) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2j+1}{2J}\alpha\right) - \frac{1}{2J} \coth\frac{\alpha}{2J} \quad (4.5)$$

Waarbij  $\alpha$  wordt gedefinieerd als:

$$\alpha = \frac{3k_B}{Ng^2\mu_B^2 J(J+1)} T_c \quad (4.6)$$

met  $k_B$  de Boltzmann constante en  $T_c$  de Curie temperatuur van het magnetocalorische materiaal.

### 4.1.3 Materiaal Parameters

Voor zowel de vloeistofparameters als ook voor het magnetocalorische materiaal (in het model gadolinium) zijn de parameters die in de simulaties zijn gebruikt weergegeven in tabel 4.1.

Uit deze primaire parameters zijn de volgende grootheden afgeleid. De dichtheid van de suspensie:

$$\rho_s = \phi \rho_{Gd} + (1 - \phi)\rho_f \quad (4.7)$$

Analoog daaraan is de warmtecapaciteit van de suspensie berekend aan de hand van:

$$c_{ps} = c_{pGd} \rho_{Gd} + (1 - \phi)c_{pf} \quad (4.8)$$

Voor het bepalen van de warmtecapaciteit van gadolinium is gebruik gemaakt van de correlatie van Siddikov et al. (2005). Hun vergelijking 5 geeft een betrouwbare weergave van de warmtecapaciteit.

parameter	waarde	eenheid
$\rho_{Gd}$	7901.0	[ kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_f$	998.0	[ kg m <sup>-3</sup> ]
$J$	7/2	[ - ]
$T_c$	292.0	[ K ]
$\mu_0$	$4\pi 10^{-7}$	[ T M A <sup>-1</sup> ]
$k_B$	$1.38062 \cdot 10^{-23}$	[ J K <sup>-1</sup> ]
$g$	2.0023	[ - ]
$\mu_B$	$0.92710^{-23}$	[ A m <sup>2</sup> ]
$c_{pf}$	4182.0	[ J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\phi$	0.4	[ - ]

Tabel 4.1: Materiaalparameters gebruikt in de simulaties.

#### 4.1.4 Berekening Magnetocalorische Temperatuurverandering

Omdat vergelijking 25 in Siddikov et al. (2005) voor de verandering in temperatuur minder betrouwbaar wordt geacht, is deze niet gebruikt en is de verandering in temperatuur door een verandering in het magneetveld expliciet berekend. Daarvoor is vergelijking 13 van Li et al. (2006) in combinatie met het thermodynamische model van Hashimoto et al. (1981) gebruikt. Deze vergelijking is aangepast aan de situatie binnen het CoolBoost model, zodat in plaats van een AMR gerekend wordt met de relevante waarden voor de suspensie.

$$dT(T, H) = -\frac{\mu_0}{\rho_s} \left( \frac{T}{c_p(T, H)} \right) \Big|_H \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right) \Big|_H dH \quad (4.9)$$

Hierbij is  $M(T, H)$  iteratief berekend uit vergelijking (4.4).

### 4.1.5 Warmteuitwisseling

Het vermogen dat benodigd is voor een verandering van temperatuur van een gegeven massaflux is:

$$Q = \dot{m}c_{p,s}(T_{out} - T_{in}) \quad (4.10)$$

met  $T_{out}$  de uitstroomtemperatuur,  $T_{in}$  de instroomtemperatuur en het subscript  $s$  voor suspensie. De warmtewisselaars worden impliciet door deze vergelijkingen gespecificeerd, doordat het benodigde vermogen voor warmteuitwisseling direct is gegeven. Dat betekent dat een specifieke geometrie van de warmtewisselaars niet is gemodelleerd. Deze vergelijkingen zijn opgesteld analoog aan de methode in Tagliafico et al. (2006).

### 4.1.6 Modelsynthese

De combinatie van de voorgaande vergelijkingen geeft een niet-lineair model. Voor het oplossen van dit systeem van vergelijkingen is het nodig de initiële condities te specificeren.

Als invoer voor het model worden gebruikt:

1. een extern gegeven koude randvoorwaarde  $T_C$
2. een extern gegeven hete randvoorwaarde  $T_H$
3. een extern gegeven magnetische fluxdichtheid  $B$
4. een gewenst koelvermogen  $Q_{global}$

Met behulp van de gegeven  $T_C$  en  $T_H$  worden  $\Delta T_{mag}^+$  en  $\Delta T_{mag}^-$  berekend met vergelijking 4.9. Het maximaal bereikbare vermogen wordt daarna gegeven door vergelijking 4.2. Dit vermogen wordt dan gelijk gesteld aan  $Q_{global}$ , en daaruit wordt de benodigde massaflux  $\dot{m}_p$  in het primaire circuit berekend:

$$Q_{global} = \dot{m}_p c_{pp} \Delta T_{mag} \quad (4.11)$$

$$\dot{m}_p = \frac{Q_{global}}{c_{pp} \Delta T_{mag}} \quad (4.12)$$

parameter	bereik	eenheid
$T_C$	283 – 303	[K]
$T_H$	285 – 323	[K]
$B$	1 – 5	[T]
$Q_{global}$	20 – 100	[W]

Tabel 4.2: Bereik van de parameters in de roostersimulaties.

met subscript  $p$  voor het primaire circuit. Analoog daaraan wordt de massaflux van de suspensie berekend door:

$$\dot{m}_s = \frac{Q_{global}}{c_{ps}\Delta T_{mag}} \quad (4.13)$$

De twee regeneratieve warmtewisselaars hebben een relatief hoog vermogen nodig, omdat een relatief hoger temperatuurverschil moet worden overbrugd. Het temperatuurverschil is de som van het externe temperatuurverschil en het temperatuurverschil door het magnetocalorisch effect. Het benodigde vermogen wordt berekend door:

$$Q_{hi} = \dot{m}_p c_{pp} (T_H + \Delta T_{mag} - T_C) \quad (4.14)$$

Omdat in het model voor CoolBoost geen specifieke opstelling wordt gemodelleerd, is het vermogen dat nodig is om de vloeistoffen rond te pompen gemodelleerd met een vergelijking waarbij het vermogen proportioneel is aan de som van  $Q_{global}$  en  $Q_{hi}$  (Tagliafico et al., 2006):

$$Q_{flow} = \alpha(Q_{global} + Q_{hi}) \quad (4.15)$$

De factor  $\alpha$  is een dimensieloze factor, die aangeeft dat bij de conversie van vermogen benodigd voor de warmteuitwisseling naar vermogen benodigd om de vloeistoffen rond te pompen een correctie nodig is omdat de efficiëntie uiteraard niet 100% is.

Het vermogen dat nodig is voor magnetisatie en de-magnetisatie wordt berekend aan de hand van:

$$Q_{mag} = \dot{m}_s (Q_{mag}^+ - Q_{mag}^-) \quad (4.16)$$

met  $Q_{mag}$  het netto vermogen van magnetisatie en de-magnetisatie,  $Q_{mag}^+$  het vermogen van een verhoging van magnetisatie en  $Q_{mag}^-$  het vermogen van een verlaging van magnetisatie.

Een dimensieloze maat voor de performance van een koelmachine is de “Coefficient of Performance” (COP). De COP is een maat voor de verkregen vermogen gedeeld door het vermogen dat nodig is om dit te bereiken, bij een koelmachine is dit:

$$\text{COP} = \frac{\text{koelvermogen}}{\text{ingebracht vermogen als arbeid}} \quad (4.17)$$

Bij CoolBoost is de COP gedefinieerd als:

$$\text{COP} = \frac{Q_{global}}{Q_{mag} + Q_{flow}} \quad (4.18)$$

Een ideale koelmachine heeft een maximale COP zoals gegeven door de Carnot efficiëntie (Tagliafico et al., 2006):

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_C}{T_C - T_H} \quad (4.19)$$

Binnen CoolBoost is voor de definitie van Tagliafico et al. (2006) gekozen. Het valt af te leiden dat een koelmachine geen grotere efficiëntie kan hebben dan de Carnot efficiëntie (Bejan, 2006).

Bij de simulaties van CoolBoost is de absolute waarde van de COP van minder belang. Belangrijker is de bereikte verhouding van de COP tot een ideale COP:

$$\frac{\text{COP bereikt}}{\text{COP}_{\text{carnot}}} \quad (4.20)$$

Door het abstracte model voor CoolBoost is het in het vervolg mogelijk de invloeden van de verschillende parameters op de performance van een gesimuleerd systeem te bepalen. Deze manier van modelleren is analoog aan Tagliafico et al. (2006).

### 4.1.7 Dimensieloze Grootheden

Om een indicatie te verkrijgen van de eigenschappen van CoolBoost is een analyse op basis van dimensieloze parameters doorgevoerd. Naast de COP en de  $\text{COP}_{\text{carnot}}$  is daarbij van de volgende dimensieloze grootheden gebruik gemaakt:

$$\frac{Q_{mag}}{Q_{flow}} \quad (4.21)$$

$$\text{COP}_{mag} = \frac{Q_{global}}{Q_{mag}} \quad (4.22)$$

## 4.2 Simulatiemethode

De gebruikte simulatiemethode is analoog aan de methodes gebruikt in Tagliafico et al. (2006) en Rosensweig (2006). Doordat de vergelijkingen niet lineair zijn, is het nodig door middel van iteraties dan wel optimalisatie de vergelijkingen op te lossen. Meer achtergrondinformatie over dit principe van simuleren is te vinden in Clarke (2001) en Tierney (1990).

### 4.2.1 Gevoeligheidsanalyse Simulaties

Om een indruk te verkrijgen van de invloed van de verschillende parameters en de gevoeligheid van het model voor variatie in parameters zijn de simulaties met een groot aantal combinaties van verschillende parameters doorgevoerd (zie ook tabel 4.2). Daarbij zijn de simulaties in eerste instantie uitgevoerd op een meerdimensionaal rooster, opgespannen door de combinaties van parameterwaarden. Daarna zijn een aantal locale optimalisatieberekeningen gedaan.

Meer dan 1000 verschillende combinaties van parameters zijn gesimuleerd. Daardoor is het mogelijk hun invloed op de variatie in output van het systeem te analyseren en beschrijven. Bij de bespreking van de simulatie resultaten in hoofdstuk 5 word ook de gevoeligheid ten opzichte van de parameters besproken.

## Hoofdstuk 5

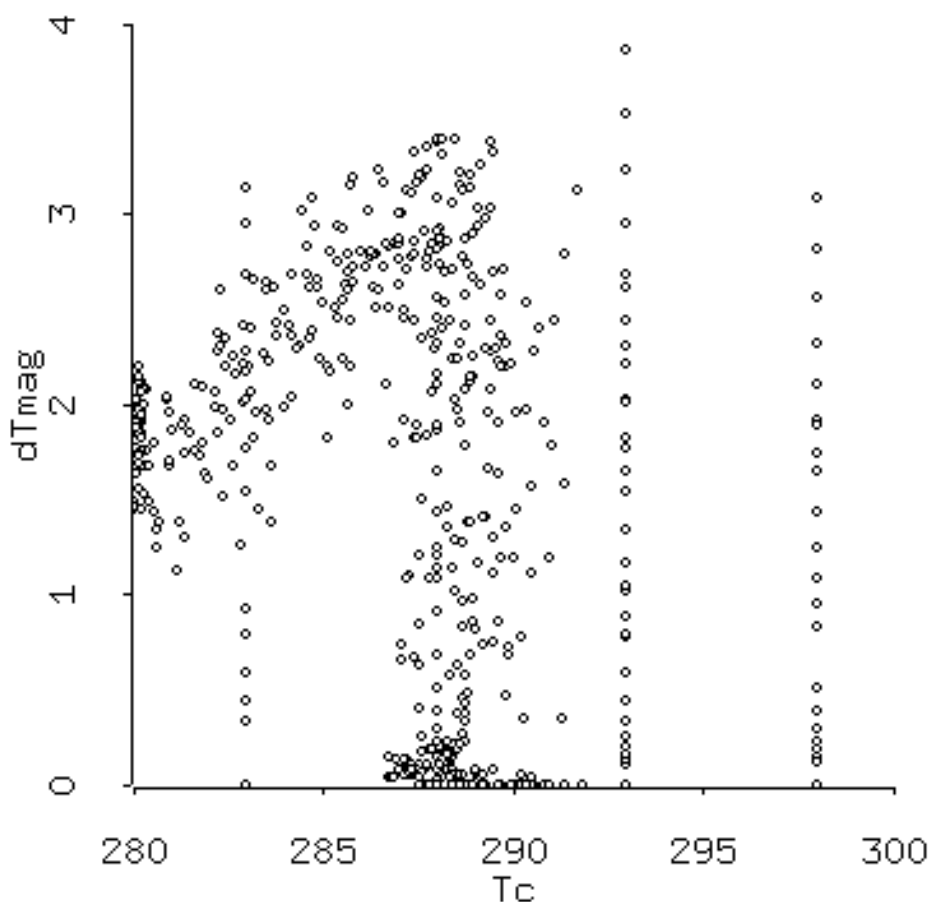
# Simulatie Resultaten en Discussie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het simulatiemodel voor CoolBoost besproken. Deze resultaten zijn verkregen door in eerste instantie met een groot aantal verschillende parameters de simulaties door te voeren. Daarna zijn een aantal optimalisaties vanuit verschillende startpunten doorgevoerd. De resultaten worden in de vorm van dimensieloze grootheden in grafieken weergegeven. Daardoor is het beter mogelijk de resultaten onderling te vergelijken.

### 5.1 Beschrijving Resultaten

Om een eerste overzicht te geven van de verschillende simulaties die zijn doorgevoerd, is in figuur 5.1  $T_C$  uitgezet tegen  $\Delta T_{mag}$ , en in figuur 5.2  $T_H$  uitgezet tegen  $\Delta T_{mag}$ . Wat direct opvalt aan deze figuren is dat een groot aantal simulaties zijn doorgevoerd op een rooster van punten en dat de optimalisatiestappen puntenwolken gecreëerd hebben. Zoals verwacht zijn de meeste simulaties doorgevoerd bij een  $T_C$  lager dan de Curie temperatuur, en bij een  $T_H$  hoger dan de Curie temperatuur. Ook is duidelijk dat het in de suspensie bereikte temperatuurverschil kleiner is dan het temperatuurverschil dat wordt bereikt door het magnetocalorisch materiaal zelf in pure vorm.

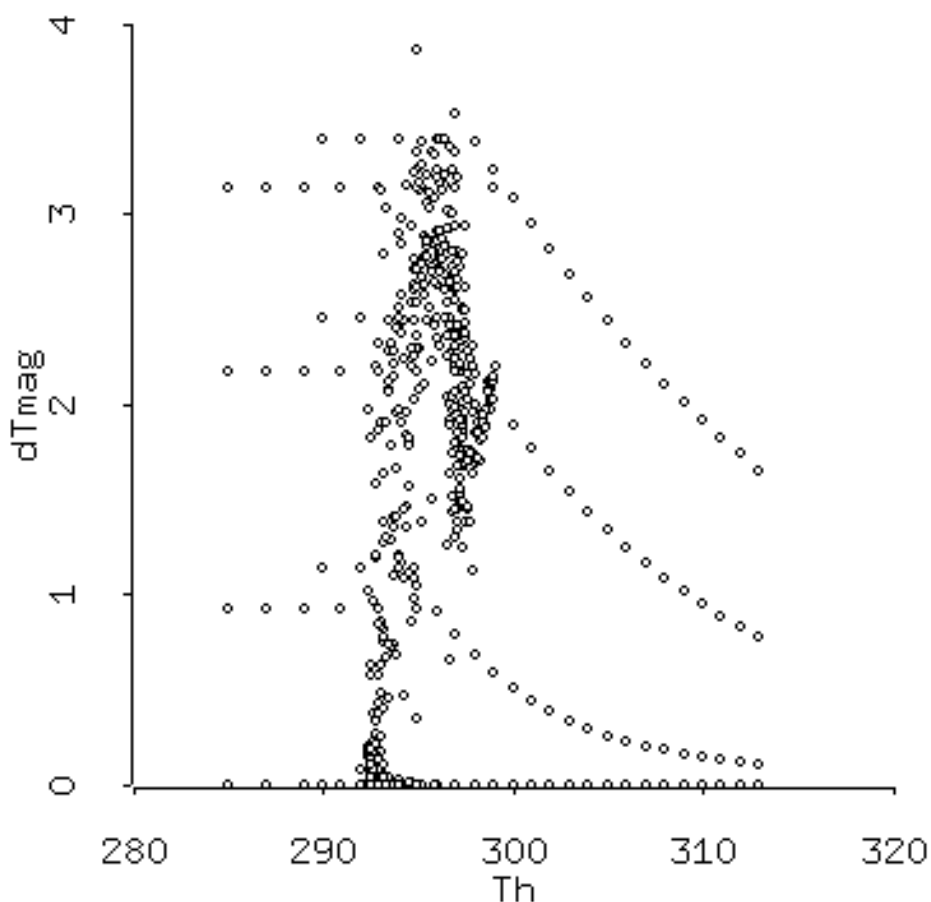
In figuur 5.3 is de COP van het CoolBoost model uitgezet tegen de  $COP_{carnot}$ . Wat direct opvalt is dat de  $COP_{carnot}$  veel hogere waarden bereikt dan de COP van Co-



Figuur 5.1:  $T_C$  vs.  $\Delta T_{mag}$ .

IBoost. Dit heeft te maken met de parameterisatie van het CoolBoost model. Van belang zijn echter niet zo zeer de absolute getalwaarden als de trends in deze figuur. Uit figuur 5.3 valt af te leiden dat de COP van CoolBoost asymptotisch naar een maximale waarde lijkt te lopen. Een relevante vraag is dus welke getalwaarde deze maximale waarde in een bepaald prototype aanneemt. De  $COP_{carnot}$  hangt enkel af van de warme en koude randvoorwaarden. De COP van CoolBoost daarentegen hangt af van het vermogen dat nodig is om een bepaald koelvermogen te bereiken ( $\frac{Q_{global}}{Q_{mag}+Q_{flow}}$ ). Dit vermogen neemt toe als  $T_H - T_C$  groter wordt, omdat de re-

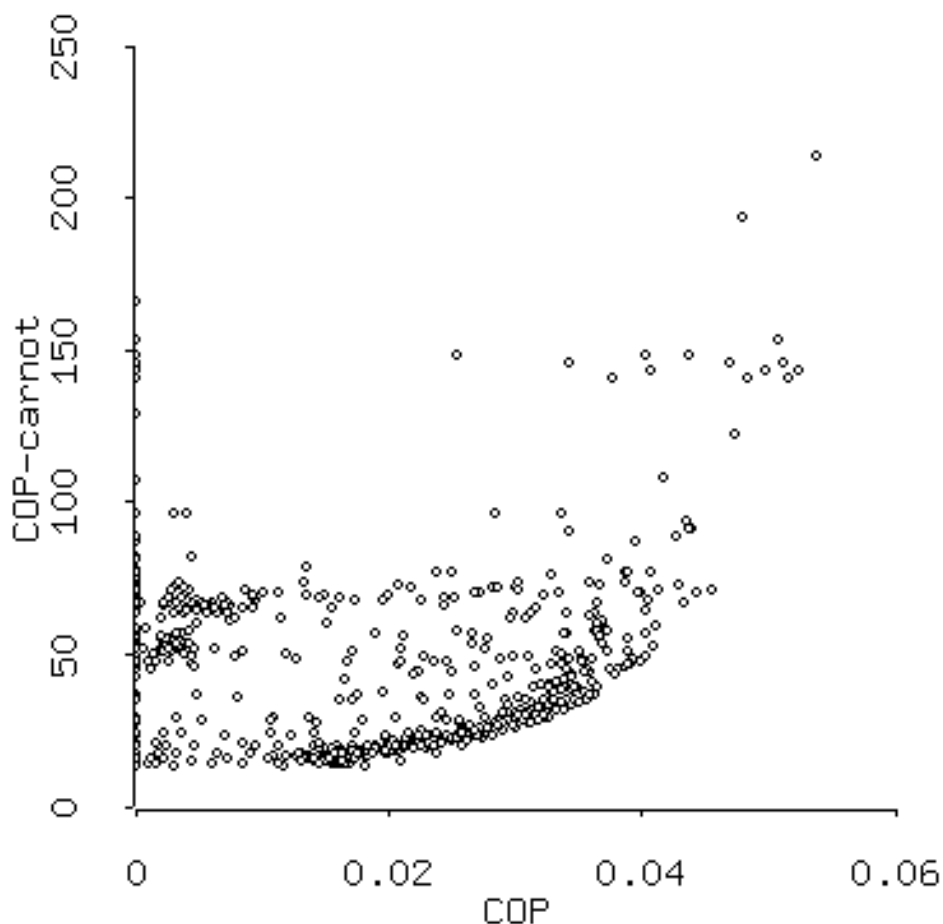




Figuur 5.2:  $T_H$  vs.  $\Delta T_{mag}$ .

generatieve kringloop steeds meer vermogen nodig heeft voor het rondpompen van de vloeistof. Ook worden daardoor de irreversibele verliezen in de warmtewisselaars steeds groter (Bejan, 1996).

In figuur 5.4 is duidelijk te zien dat er een relatief hoge COP kan worden bereikt als het natuurlijk logaritme van  $COP_{mag}$  in de orde van  $-1.9$  ligt. Dit geeft aan dat er een optimale verdeling is tussen de bijdrage van het vermogen nodig om de suspensie rond te pompen en het vermogen nodig voor magnetische arbeid. Ook hier is de absolute getalwaarde van  $-1.9$  minder van belang dan de vorm van de

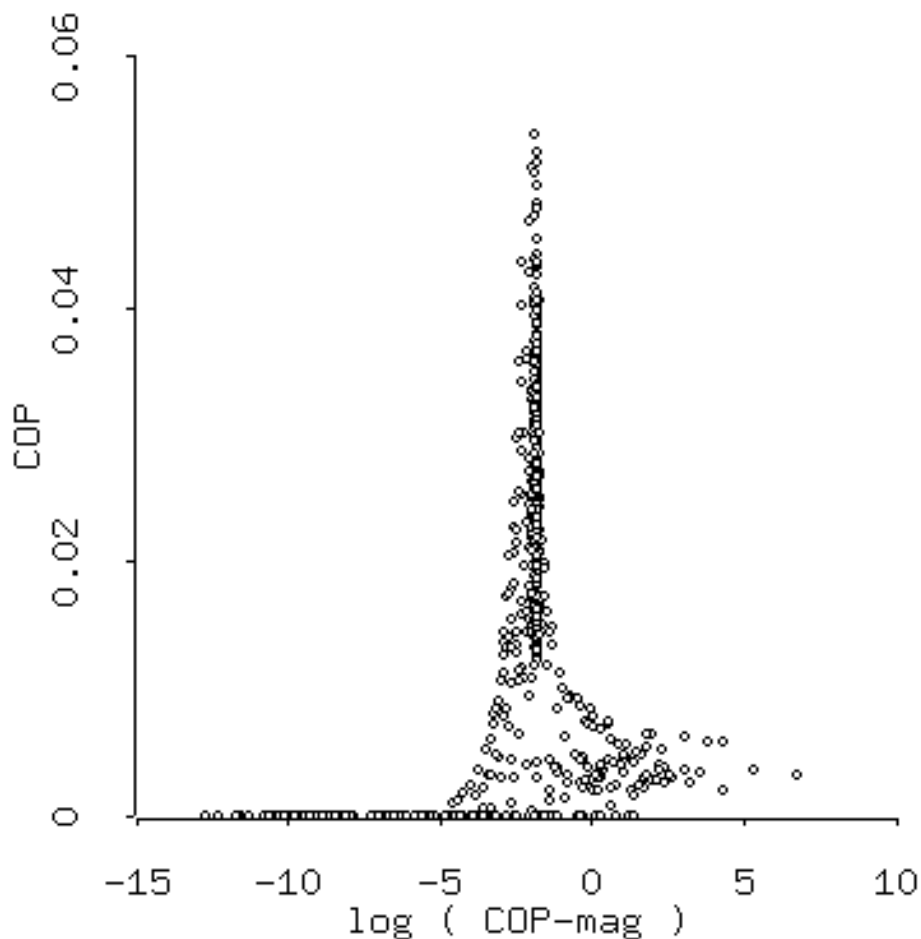


Figuur 5.3: COP vs.  $COP_{carnot}$ .

curve.

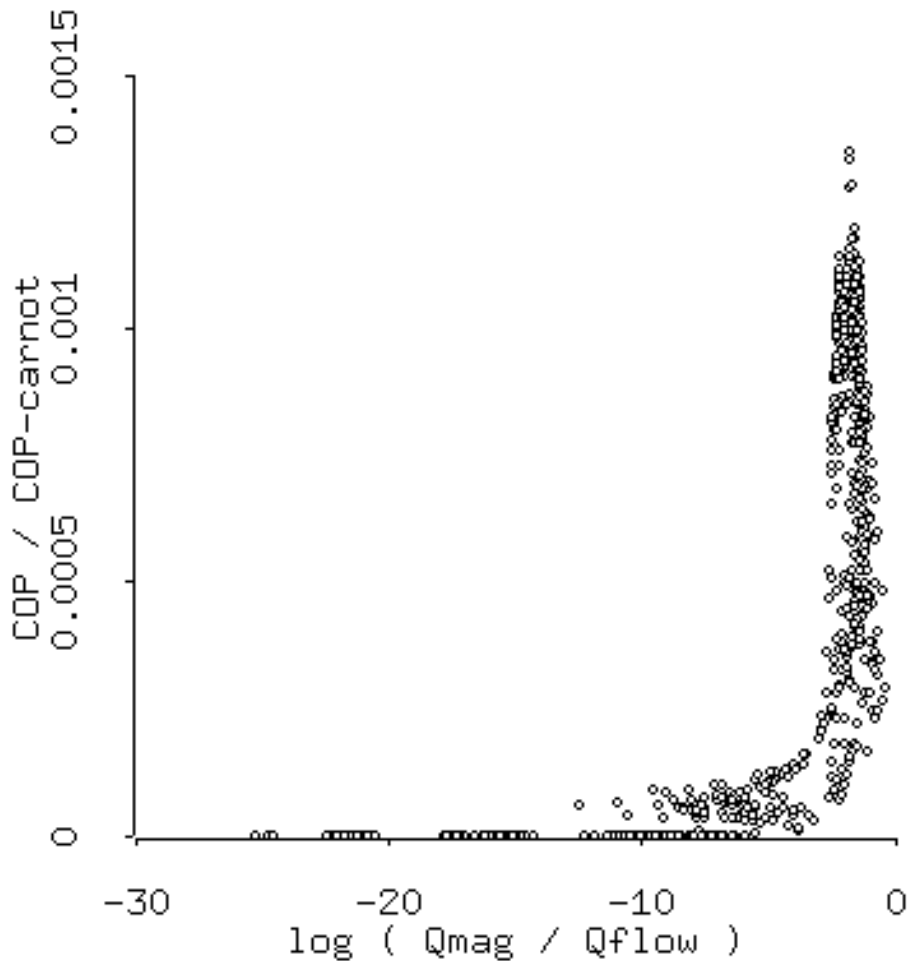
Figuur 5.5 laat vergelijkbaar aan figuur 5.4 de optimale waarde van de verhouding van  $\frac{Q_{mag}}{Q_{flow}}$  zien. Wat hier opvalt is dat het optimale  $\ln\left(\frac{Q_{mag}}{Q_{flow}}\right)$  rond  $-1.7$  ligt. In alle gemodelleerde situaties is  $Q_{mag}$  kleiner dan  $Q_{flow}$ . Dit geeft aan dat bij CoolBoost de irreversibele verliezen die gepaard gaan aan het benodigde vermogen om de suspensie rond te pompen relatief groot zijn.

Bij het ontwerp van een koelmachine is het belangrijk een schatting te kunnen maken van de grootte van het bereikte temperatuurbereik waarbij er niet al te



Figuur 5.4:  $\ln \text{COP}_{\text{mag}}$  vs. COP.

grote irreversibele verliezen optreden. Uit figuur 5.6 valt af te leiden dat voor de simulatie van CoolBoost de keuze voor de parameters waaruit  $T_H - T_C \approx 5 \Delta T_{\text{mag}}$  resulteert optimaal is. Dit heeft betrekking op het temperatuurverschil wat door het magnetocalorisch effect in de suspensie wordt bereikt. Wordt voor een ander magnetocalorisch materiaal gekozen, of is de warmtecapaciteit van de suspensie anders, dan zal de optimale verhouding schuiven. Andersom kan figuur 5.6 worden gebruikt om de haalbaarheid van een configuratie van CoolBoost te beoordelen als een gegeven extern temperatuurverschil moet worden overbrugd.

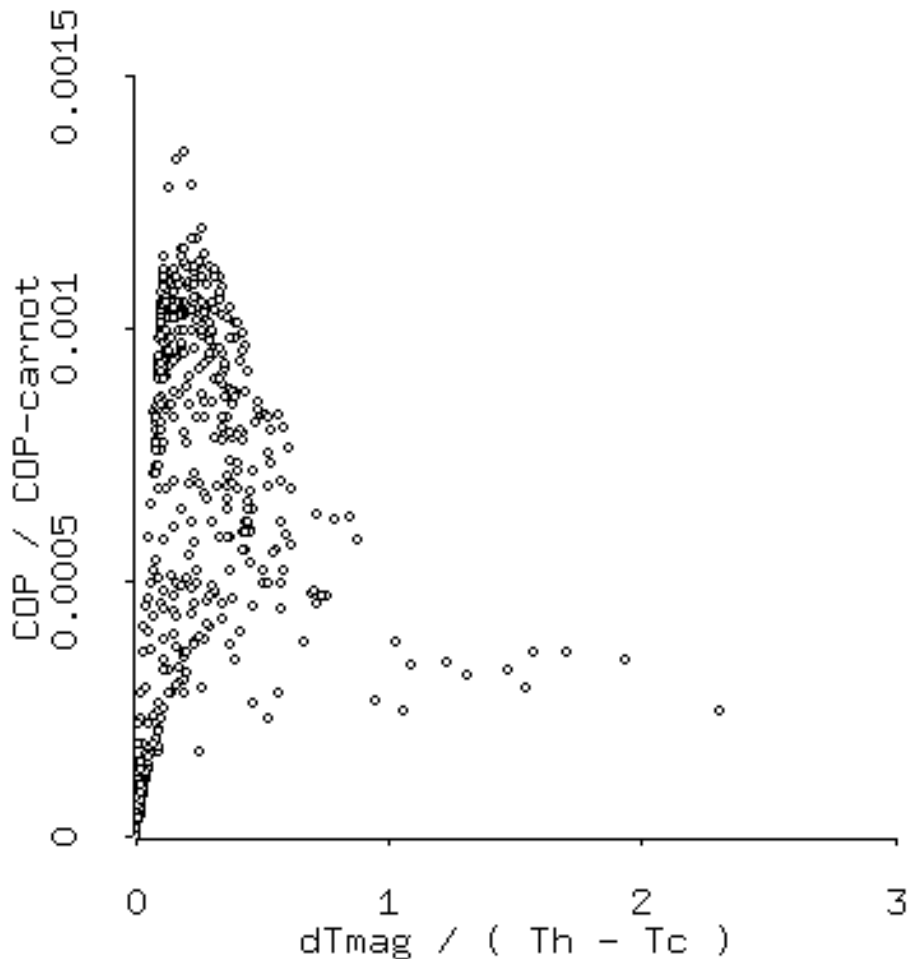


Figuur 5.5:  $\ln \frac{Q_{mag}}{Q_{flow}}$  vs.  $\frac{COP}{COP_{carnot}}$ .

Figuur 5.7 laat zien dat de verhouding tussen  $Q_{mag}$  en  $Q_{flow}$  een optimum kent. Ook is duidelijk dat er een ondergrens is aan haalbare combinaties van deze grootheden.

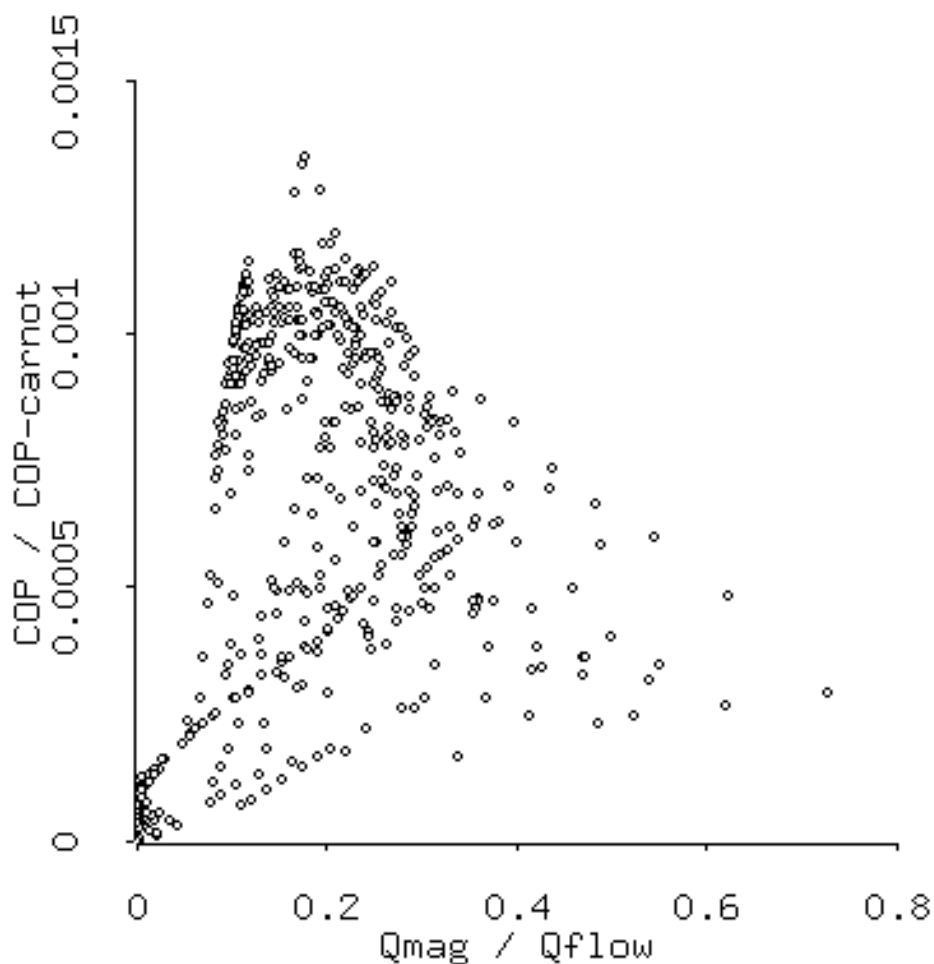
## 5.2 Analyse Resultaten

De simulatieresultaten van het model CoolBoost zijn beschreven in hoofdstuk 5.1. In dit hoofdstuk wordt een analyse van de resultaten gegeven. Hierbij moet rekening



Figuur 5.6:  $\frac{\Delta T_{mag}}{T_H - T_C}$  vs.  $\frac{COP}{COP_{carnot}}$ .

worden gehouden met de opzet van het model CoolBoost: er is geen specifieke geometrie van een koelmachine gemodelleerd. Daardoor zijn een aantal processen relatief eenvoudig, maar robuust geparаметeriseerd. Wat opvalt is dat bij modellen die een meer specifiek parameterisatie van een prototype bevatten (Rosensweig, 2006; Engelbrecht et al., 2005), de thermodynamische grootheden dan wel magnetische arbeid vergelijkbaar aan het model CoolBoost gemodelleerd zijn (Tagliafico et al., 2006; Engelbrecht et al., 2005).



Figuur 5.7:  $\frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{carnot}}}$  vs.  $\frac{Q_{\text{mag}}}{Q_{\text{flow}}}$ .

### 5.3 Onzekerheden

Het geïmplementeerde model is een sterke vereenvoudiging van een concept voor het maken van een koelmachine gebaseerd op een suspensie van een magnetocalorisch materiaal. Daardoor zijn de resultaten met een behoorlijke onzekerheid omkleed. Dit neemt niet weg dat uit de figuren in hoofdstuk 5.1 trends omtrent de mogelijke realisatie van een dergelijke koelmachine vallen af te leiden. Ook vallen de algemene eigenschappen van het concept CoolBoost af te leiden, zoals het bestaan van een

optimale verhouding van  $Q_{mag}$  tot  $Q_{flow}$  en een asymptotische waarde voor de COP.

# Hoofdstuk 6

## Conclusies

In dit hoofdstuk worden de conclusies worden per onderwerp gegeven. Aanbevelingen op basis van deze conclusies zijn onderwerp van hoofdstuk 7.

### 6.1 Samenvatting Resultaten

De belangrijkste resultaten uit het haalbaarheidsproject CoolBoost zijn de antwoorden op de vragen:

1. Is het zinvol verder fundamenteel onderzoek over het idee CoolBoost voort te zetten?

*Ja, mits nieuwe ontwikkelingen op het gebied van magnetocalorisch koelen worden gevolgd:*

- *Nieuwe materialen met een negatief magnetocalorisch effect.*
- *Onderzoek naar de invloed van tempore en / of ruimtelijke verandering van het magneetveld.*

2. Is er zicht op het ontwikkelen van een praktische c.q. technisch haalbare toepassing van CoolBoost?

*Niet in de huidige vorm. Nodig is een specifiek onderzoek naar het gevolg van ruimtelijke dan wel tempore verandering van het magneetveld op de*



*efficiëntie en het vermogen om de suspensie rond te pompen. Ook is verder onderzoek nodig naar het effect van verschillende magnetocalorische materialen. Dit maakt uitgebreidere simulaties nodig, samen met het (gedeeltelijk) valideren van het simulatiemodel met experimenten.*

3. Kunnen de effecten van het toepassen van CoolBoost voor de Nederlandse energiehuishouding worden gekwantificeerd?

*Nee, dat zal pas mogelijk zijn als de simulaties voor specifieke koelinstallaties worden gedaan. Het is wel duidelijk dat CoolBoost in zijn huidige vorm geen directe bijdrage kan leveren aan het verlagen van het energiegebruik doordat de "Coefficient of performance" (COP) relatief laag is.*

## 6.2 Conclusies Simulaties

De simulaties geven een overzicht van de relatieve performance van CoolBoost in zijn huidige vorm. Uit een vergelijking met resultaten uit de literatuur valt op dat de COP weliswaar laag is, maar dat dit mogelijksterwijs aan de specifieke aannames gemaakt in het simulatiemodel ligt.

## 6.3 Conclusies Toepassingen

In de huidige situatie is CoolBoost niet geschikt voor praktische toepassing. Pas als er een significant hogere COP wordt bereikt, is het interessant verder naar praktische toepassingen van CoolBoost te kijken.

## 6.4 Haalbaarheidsanalyse

### 6.4.1 Technische Haalbaarheid

Binnen dit onderzoek zijn geen fundamentele obstakels voor de realisatie van een prototype voor CoolBoost ontdekt. Wel is gebleken dat de verwachte COP relatief laag is. Opmerkelijk is dat in de meeste literatuur over magnetocalorisch

koelen een relatief hoge COP wordt gegeven, maar dat uit gedetailleerde simulaties (Engelbrecht et al., 2005) blijkt dat de gerealiseerde COP waarschijnlijk relatief laag ligt.

## 6.4.2 Economische Haalbaarheid

Een eerste aanzet tot een vergelijking van de kosten van magnetocalorisch koelen wordt gegeven in Russek and Zimm (2006) van *Astronautics*. In dit artikel wordt, gebruik makend van het entropie versus temperatuur diagram, een eenvoudig model ontwikkeld. Met dit model wordt een ideaal effect berekend, waaruit wordt geconcludeerd dat in potentie magnetocalorisch koelen concurrerend is met compressiekoelen.

Drie aspecten spelen een belangrijke rol bij de analyse van de economische haalbaarheid van CoolBoost:

1. De besparing op het energiegebruik door het toepassen van CoolBoost. *Doordat er vooralsnog geen verwachte besparing van het energiegebruik is door het toepassen van CoolBoost levert dit geen economisch voordeel op.*
2. Verschillen in kosten van koelinstallaties met en zonder CoolBoost. *Naar verwachting kunnen de kosten van een installatie die gebruik maakt van CoolBoost lager zijn dan een installatie die gebruik maakt van compressiekoelen (Russek and Zimm, 2006). Het is echte (nog) niet mogelijk de mogelijke besparing kwantitatief uit te drukken.*
3. Effecten op de kostprijs van koelinstallaties door het verminderen van het gebruik van koelvloeistoffen. *Door de relatief lage kosten van koelvloeistoffen zal de vermindering van de kostprijs relatief laag zijn.*

## 6.5 Geïntegreerde Analyse en Beoordeling Haalbaarheid

1. Uit dit en de voorgaande hoofdstukken blijkt *dat CoolBoost in principe haalbaar is*. Tegelijk is gebleken dat er *geen verwachte besparing in het energie-*

*gebruik* in relatieve en absolute zin is.

2. Uit de voorgaande hoofdstukken kan op grond van de tot nu toe beschikbare informatie de conclusie getrokken worden *dat CoolBoost technisch haalbaar is*. Dat betekent dat met toepassing van huidige, bekende technieken een opstelling van CoolBoost daadwerkelijk gerealiseerd kan worden. De simulaties laten zien dat het in het huidige stadium van ontwikkeling van CoolBoost nog niet relevant is hoe CoolBoost zich daadwerkelijk in een installatie gedraagt. Dit is pas van belang als de efficiëntie van CoolBoost significant hoger is.

## Hoofdstuk 7

# Aanbevelingen

1. Pas in de verdere toekomst kan CoolBoost mogelijk een rol spelen in de Nederlandse energiehuishouding.
2. Voor een betere inschatting van het potentieel van magnetocalorisch koelen in het algemeen en CoolBoost in het bijzonder is het nodig het huidige, wereldwijd verspreide onderzoek actief te volgen.
3. De volgende technisch-wetenschappelijke aspecten verdienen verder onderzoek:
  - (a) Onderzoek naar het negatief magnetocalorisch effect.
  - (b) Onderzoek naar een ruimtelijk en / of temporair variabel magneetveld.
  - (c) Onderzoek naar de integratie van een magnetische pomp voor de suspensie samen met een warmtewisselaar.
4. Een wereldwijde inventarisatie van industrieel onderzoek naar magnetocalorisch koelen is aan te bevelen om de bestaande kennis te bundelen en toegankelijk te maken.

# Bijlage A

## Symbolen

Symbol	Omschrijving
$B$	magnetische fluxdichtheid
$B_J(\alpha)$	Brillouin functie vergelijking (4.5)
$c_p$	warmtecapaciteit
COP	“Coefficient of performance”
COP carnot	COP van een ideale Carnot kringloop
$g$	gyromagnetische factor
$H$	magnetische veldsterkte
$J$	quantum nummer
$k_B$	Boltzmann constante
$\dot{m}$	massaflux
$N$	aantal dipolen
$p$	druk
$Q$	vermogen [W]
$S$	entropie
$S_E$	elektronen entropie
$S_M$	magnetische entropie
$S_L$	rooster entropie
$T$	temperatuur
$U$	interne energie
$V$	volume
$W$	arbeid

## griekse symbolen

Symbool	Omschrijving
$\mu$	magnetische permeabiliteit
$\mu_0$	permeabiliteit van vacuum
$\mu_B$	Bohr magnetron
$\phi$	fractie magnetocalorische deeltjes in suspensie
$\alpha$	factor in vergelijking (4.6)

## subscript

Symbool	Omschrijving
<i>C</i>	koud
<i>f</i>	vloeistof
<i>flow</i>	gerelateerd aan stroming
<i>global</i>	globaal
<i>H</i>	warm
<i>hi</i>	interne, regeneratieve warmtewisselaar
<i>in</i>	instroom
<i>mag</i>	magnetisch
<i>out</i>	uitstroom
<i>p</i>	primair
<i>s</i>	

## Referenties

- Ahern J. *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*. Wiley, 1980. ISBN 0-471-05494-1.
- Allab F., Kedous-Lebouc A., Yonnet J., and Fournier J. A magnetic field source system for magnetic refrigeration and its interaction with magnetocaloric material. *International Journal of Refrigeration*, pp. 1340 – 1347, 2006.
- Barclay J. Use of ferrofluid as the heat-exchange fluid in a magnetic refrigerator. *Journal of Applied Physics*, 53(4):2887 – 2894, 1982.
- Bejan A. *Entropy Generation Minimization*. CRC Press, 1996. ISBN 978-0849396519.
- Bejan A. *Convection Heat Transfer*. Wiley, 3rd edn., 2004. ISBN 0471271500.
- Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley, 3rd edn., 2006. ISBN 978-0471677635.
- Bejan A., Tsatsaronis G., and Moran M. *Thermal Design and Optimization*. Wiley, 1996. ISBN 978-0471584674.
- Bernhart C. Kälte mittels Magnet und Manganlegierung. *Swiss Engineering*, pp. 10 – 11, 2006.
- Bisio G., Rubatto G., and Schiapparelli P. Magnetic systems depending on three or two variables; thermodynamic analysis and some existing and possible applications. *Energy Conversion & Management*, pp. 1267 – 1286, 1999.
- Brown G. Magnetic heat pumping near room temperature. *Journal of Applied Physics*, 47(8):3673 – 3680, 1976.

- Brück E., Tegos O., Thanh D., and Buschow K. Magnetocaloric refrigeration near room temperature (invited). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 310:2793 – 2799, 2007.
- Campbell P. *Permanent Magnet Materials and their Application*. Cambridge University Press, 1996. ISBN 978-0521566889.
- Clarke J. *Energy Simulation in Building Design*. Butterworth-Heinemann, 2nd edn., 2001. ISBN 0-7506-5082-6.
- Coey J. Permanent magnet applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 441 – 456, 2002.
- Craik D.J. *Magnetism: Principles and Applications*. Wiley, 1997. ISBN 978-0471954170.
- Debye P. Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei Tiefer Temperatur. *Annalen der Physik*, pp. 1154 – 1160, 1926.
- Egolf P., Kitanovski A., Sari O., Derrick A.C., and Gendre F. Magnetic refrigerator and/or heat pump using magnetocaloric fluid and process for magnetic heating and/or cooling with such a refrigerator and/or heat pump. WIPO International Application Published under the Patent Cooperation Treaty, 2006. WO 2006/136041 A1.
- Engelbrecht K., Nellis G., and Klein S. A numerical model of an active magnetic regenerator refrigeration system. Tech. Rep. ARTI-21CR/612-10075, Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute, Arlington, Virginia, 2005.
- Engelbrecht K., Nellis G., and Klein S. The effect of internal temperature gradients on regenerator matrix performance. *Journal of Heat Transfer, ASME*, pp. 1060 – 1069, 2006.
- Giauque W. A thermodynamic treatment of certain magnetic effects. a proposed method of producing temperatures considerably below 1° absolute. *Journal of the American Chemical Society*, pp. 1864 – 1870, 1927.
- Hashimoto T., Numasawa T., Shino M., and Okada T. Magnetic refrigeration in the temperature range from 10 k to room temperature: the ferromagnetic refrigerants. *Cryogenics*, pp. 647 – 653, 1981.



- Hordijk J. Deelrapport magnetische koeling - een scan naar octrooien. Tech. rep., Octrooicentrum Nederland, 2006.
- Kawanami T., Chiba K., Sakurai K., and Ikegawa M. Optimization of a magnetic refrigerator at room temperature for air cooling systems. *International Journal of Refrigeration*, pp. 1294 – 1301, 2006.
- Kitanovski A. and Egolf P. Thermodynamics of magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, pp. 3 – 21, 2006.
- Kitanovski A., Egolf P., and Sari O. Method and device for the continuous generation of cold and heat by means of the magneto-caloric effect. WIPO International Application Published under the Patent Cooperation Treaty, 2004a. WO 2004/059221 A1.
- Kitanovski A., Egolf P., and Sari O. Method and device for the generation of cold and heat by magneto-caloric effect. WIPO International Application Published under the Patent Cooperation Treaty, 2004b. WO 2004/059222 A1.
- Krosse L., Vermeeren R., and Verwoerd M. Magnetische koeling: toekomst of utopie? TNO-rapport R 2004/483, TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie, 2004. URL <http://www.robklimaat.nl/docs/4800001678.pdf>.
- Li P., Gong M., Yao G., and Wu J. A practical model for analysis of active magnetic regenerative refrigerators for room temperature applications. *International Journal of Refrigeration*, pp. 1259 – 1266, 2006.
- Montoya J. *Development of a Magnetocaloric Pump for Applications in Heat Pipes*. Master's thesis, University of Puerto Rico, 2005.
- Naterer G. and Camberos J. *Entropy-Based Design and Analysis of Fluids Engineering Systems*. CRC Press, Boca Raton, 2008. ISBN 978-0-8493-7262-9.
- Pecharsky V. and Gschneider Jr. K. Comparison of the magnetocaloric effect derived from heat capacity, direct, and magnetization measurements. *Advances in Cryogenic Engineering*, pp. 423 – 430, 1996.
- Pecharsky V. and Gschneider Jr. K. Some common misconceptions concerning magnetic refrigerant materials. *Journal of Applied Physics*, 90(9):4614 – 4622, 2001.

- Petersen T., Pryds N., Smith A., and Bahl C. A numerical analysis of a reciprocating active magnetic regenerator with a parallel-plate regenerator geometry. In IIF-IIR Slovenia ., editor, *Proceedings of the 2nd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, pp. 271 – 279. 2007.
- Petersen T., Pryds N., Smith A., Linderoth S., Jeppesen S., and Knudsen H.J. Magnetic refrigeration and the magnetocaloric effect. In *Kompendium: Danske Køledage 2006*. Technical University of Denmark, Risø National Laboratory, 2006.
- Resler Jr. E. and Rosensweig R. Magnetocaloric power. *AIAA Journal*, 2(8):1418 – 1422, 1964.
- Resler Jr. E. and Rosensweig R. Regenerative thermomagnetic power. *Journal of Engineering for Power*, 89():399 –406, 1967.
- Richard M.A., Rowe A., and Chahine R. Magnetic refrigeration: Single and multi-material active magnetic regenerator experiments. *Journal of Applied Physics*, 95(4):2146 –2150, 2004.
- Rosensweig R. *Ferrohydrodynamics*. Dover Publications, 1997. ISBN 978-0486678344. (reprint of Cambridge University Press, 1985 edition).
- Rosensweig R. Refrigeration aspects of magnetic particle suspensions. *International Journal of Refrigeration*, 29(8):1250 – 1258, 2006.
- Rowe A., Tura A., Dikeos J., and Chahine R. Near room temperature magnetic refrigeration. In *Proceedings of the International Green Energy Conference*. 2005.
- Russek S. and Zimm C. Potential for cost-effective magnetocaloric air-conditioning systems. *International Institute of Refrigeration Bulletin*, pp. 1 – 8, 2006. Bulletin number 2006-2.
- Sandeman K., Daou R., Özcan S., Durrell J., Mathur N., and Fray D. Negative magnetocaloric effect from highly sensitive metamagnetism in  $\text{CoMnSi}_{1-x}\text{Gex}$ . *Phys. Rev. B*, 2006.
- Siddikov R., Wade B., and Schultz D. Numerical simulation of the active magnetic regenerator. *Computers and Mathematics with Applications*, pp. 1525 – 1538, 2005.

- Steyert W. Stirling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature. *Journal of Applied Physics*, 49(3):1216 – 1226, 1978.
- Stoecker W. *Design of Thermal Systems*. McGraw Hill, 1989. ISBN 0-07-061620-5.
- Tagliafico L., Scarpa F., Canepa F., and Cirafici S. Performance analysis of a room temperature rotary magnetic refrigerator for two different gadolinium compounds. *International Journal of Refrigeration*, pp. 1307 – 1317, 2006.
- Tegus O., Brück E., Buschow K., and de Boer F. Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications. *Nature*, 415:150 – 152, 2002.
- Tierney L. *Lisp-Stat: An Object-Oriented Environment for Statistical Computing and Dynamic Graphics*. John Wiley & Sons, New York, 1990. ISBN 0-471-50916-7.
- Universiteit van Amsterdam. Some aspects of the magneto caloric effect - report on request of Hoffmann RD, Wageningen; concept, confidential. Tech. rep., Universiteit van Amsterdam, 2007.
- Van Der Voort E. Ideal magnetocaloric conversion. *Appl. Sci. Res.*, 20():98 – 114, 1969.
- Vasile C. and Muller C. Innovative design of a magnetocaloric system. *International Journal of Refrigeration*, pp. 1318 – 1326, 2006.
- von Ardenne M., Musiol G., and Klemradt U. *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 3rd edn., 2005.
- Warburg E. Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Koerzitivkraft. *Annalen der Physik*, pp. 141 –164, 1881.
- Yu B., Gao Q., Zhang B., Meng X., and Chen Z. Review on research of room temperature magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, pp. 622 – 636, 2003.

