



MAGNETISCHE WÄRMEPUMPE MIT ERD- WÄERME-QUELLE

OPTIMIERTER PROTOTYP

Jahresbericht 2008

Autor und Koautoren	P.W. Egolf, A. Kitanovski, D. Vuarnoz, C. Gonin, T. Swinnen P. Repetti, A. Orita, J.-L. Beney
Beauftragte Institution	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
Adresse	Route de Cheseaux 1, CH 1401 Yverdon-les-Bains, Schweiz
Telefon, E-mail, Internetadresse	024 / 557 61 57, Peter.egolf@heig-vd.ch , http://www.heig-vd.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100'873/152'928
BFE-Projektbegleiter	Th. Kopp, externer F&E-Programmleiter Ressortforschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Oktober 2007 – 31. März 2010
Datum	1. Dezember 2008

ZUSAMMENFASSUNG

Die magnetische Wärmepumpen-Technologie ist eine Art der Wärmeproduktion ohne eine Anwendung umweltgefährdender Kältemittel. Sie basiert auf dem magnetokalorischen Effekt, der zu einem Erwärmen im Fall einer Magnetisierung und zu einer Kühlung im gegenteiligen Fall der Entmagnetisierung führt. Dieser physikalische Effekt kann dazu verwendet werden um zu Kühlen (oder Gefrieren), Heizen oder auch für eine Energiekonversion von Wärmeenergie in mechanische oder elektrische Energie. In diesem Projekt wird die Entwicklung einer Prototyp-Wärmepumpe mit 8 kW Heizleistung in Verbindung mit einer Erd-Wärme-Quelle realisiert. Vorausgehend wurden einige Berechnungen durchgeführt, welche das Potential einer solchen Maschine aufzeigen und mit jenem einer analogen konventionellen Wärmepumpe vergleichen. Diese zeigen, dass die magnetische Wärmepumpe eine konkurrenzfähige Alternative darstellt.

In einem für das Projekt wesentlicheren Teil wurden zwei verschiedene magnetische Wärmepumpen grob entwickelt. Sie enthalten verschiedene Magnetkonfigurationen. Einfach ausgedrückt enthält die eine Maschine eine zweidimensionale Magnet-Konfiguration, währenddem die zweite eine dreidimensionale beinhaltet. Es wurde noch nicht definitiv entschieden, welches Prinzip angewendet werden soll, da immer noch Versuche die Magnetmasse zu reduzieren im Gange sind. Um eine optimale Maschine zu erhalten, müssen in diesem ersten Stadium schon verschiedenste Phänomene des Magnetismus, der Fluidodynamik und der Thermodynamik rechnerisch behandelt werden. Nur so kann ein guter „Coefficient of Performance“ (COP) erwartet werden. Der Artikel gibt Auskunft über den Stand der Entwicklung, bereits erfolgte Lösungen, aber auch über noch zu meisternde Schwierigkeiten. Zudem wurden verschiedene Kontakte mit Materialwissenschaftlern in den USA, den Niederlanden, Russland und China geknüpft.

Projektziele

Die Studie mit dem Titel: „Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz“ [1] hat ergeben, dass beim heutigen Stand der Materialtechnologie und der Systemtechnik magnetische Luft/Wasser-Wärmepumpen für Renovationsbauten mit konventionellen Radiatorenheizungen noch nicht einen möglichen Anwendungsbereich haben, da die Temperaturspreizung zu hoch und die Wärme-Quellen-Temperatur der Ansaugluft zu fluktuierend ist. Dagegen konnte ein interessantes Potenzial bei magnetischen Sole/Wasser-Wärmepumpen für Minergiehäuser mit Fussbodenheizungen ausgemacht werden, da gerade in dieser Anwendung die beiden genannten Schwierigkeiten für die magnetokalorische Heiztechnik nicht auftreten. Die Studie ergab im Vergleich mit der herkömmlichen Gas-Kompressions-Technologie etwas bessere *COP*-Werte („Coefficient of Performance“), aber dagegen ein wenig höhere Anschaffungskosten. Wegen des umweltschonenden Prinzips wurde trotzdem entschieden, mit dem Projekt weiterzufahren und im Rahmen eines grösseren Projekts einen ersten Prototyp zu bauen. Der Kanton Waadt, der die magnetische Heiz- und Kältetechnik prioritär fördert, beteiligt sich an der Finanzierung mit einem Hauptanteil dieses durch das BFE initiierten Projekts.

Das Hauptziel ist somit der Bau eines geeigneten Prototyps mit den Eckdaten:

Temperatur-Primärseite:	5 °C
Temperatur-Sekundärseite:	35 °C
Leistung:	8 kW (Wärmepumpe mit zwei Magnet-Modulen à je 4 kW)

Das Projekt beinhaltet die folgenden Arbeiten: „Konzept und „Layout“ sowie „Design“ einer mehrstufigen Maschine mit zwei- oder dreidimensionaler magnetischer Flusslinien-Konzentration. Dies soll zuerst durch einfachere Handrechnungen nach dem Berechnungsprinzip, wie es in der Machbarkeitsstudie [1] erstmals dargelegt worden ist und Modelica-Simulationen geschehen. Dem sollen feinere numerische Optimierungsrechnungen folgen.

Danach soll die Prototyp-Maschine durch die Gruppe von Prof. Repetti, bereits ein wenig industriegeeignet, konzipiert werden. Hier werden schon verschiedenste Detailprobleme - wie z. B. die Stabilität des drehenden Rades in einem starken Magnetfeld, Dichtungsprobleme beim Einsatz einer Sole als Wärmetransportfluid, usw. - zu lösen sein. Nach diesem Prozess soll die Maschine gebaut werden.

Das grösste Problem heute ist die Beschaffung einer genügend grossen Menge magnetokalorischen Materials hoher Qualität. Wir haben zum Beispiel mit der Firma BASF in Ludwigshafen, Deutschland („Division: Future Business“) einen Zusammenarbeitsvertrag unterzeichnet. Dadurch besteht gute Hoffnung, dass die Füllung der Maschine mit dem Testmaterial Gadolinium durch eine effektivere Substanz ersetzt werden kann.

Parallel dazu wird ein Versuchsstand im Labor des „Institut Génie Thermique“ aufgebaut werden. Danach wird eine experimentelle Umgebung geschaffen, um die Betriebsweise des Prototyps messtechnisch zu erfassen. Dazu gehören auch eine drahtlose Übertragung von Messsignalen (Temperaturen) vom rotierenden Referenzsystem „Rotor“ ins ruhende Laborsystem. Diese Arbeiten sollen mit den numerischen Berechnungen abgestimmt werden, bis Übereinstimmung erlangt werden kann. Danach wird der Prototyp als Modell für eine Industrialisierung bereitgestellt werden.

Es ist geplant diesen dann an einer größeren Messe der Heizungs- und Lüftungstechnik, z.B. der HILSA 2010 in der Schweiz, auszustellen.

Es wird die im Vorprojekt aufgestellte Projekt-Begleit-Gruppe beibehalten. Diese besteht aus:

- Prof. Dr. Thomas Kopp, Hochschule Rapperswil, Programmleiter Energieforschungsprogramm Umgebungswärme, WKK, Kälte des Bundesamtes für Energie
- André Montani, EWZ
- Daniel Gendre, Frigotherm AG

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Allgemeine Fortschritte

Die magnetische Heiz- und Kältetechnik unterliegt einer schnellen Entwicklung. Es werden zurzeit viele Demonstratoren und Prototypen gebaut (siehe z.B. Ref. [2] und [3]). Im Moment sind es gut dreissig verschiedene Prototypen, die publiziert worden sind, und über welche zum Teil vollständige, aber zum Teil auch weniger komplette technische Daten zur Verfügung stehen. Nicht eingerechnet sind all die firmennahen Entwicklungen, welche hinter verschlossenen Türen – ohne veröffentlicht zu werden – betrieben werden. Es wurde auch weiter an magnetokalorischen Materialien gearbeitet und es sind neue Legierungen entstanden, die interessant für den Einsatz in Prototypen sind (siehe Ref. [4] bis [8]). Sehr motivierend ist, dass zwei führende Firmen im Materialbereich, nämlich die BASF [9] und die Firma Vacuumschmelze [10] heute daran gehen magnetokalorische Materialien praxisingerecht aufzubereiten und für eine Markteinführung vorzubereiten. Unsere Kontakte mit anderen Gruppen zeigen, dass allgemein an verschiedensten Verbesserungen gearbeitet wird. Solche sind die z. B. die Beschichtung von magnetokalorischen Materialien um den Kontakt mit Wasser zu ermöglichen, effizientere Magnet-Konfigurationen, Versuche die Frequenz einer Maschine (sei es eine Linearmaschine oder eine rotative Maschine) zu erhöhen, usw. Letzteres führt sofort zu einer Verringerung der Masse und damit der Produktionskosten einer Maschine. Im Materialbereich ist es die Suche nach Materialien die einen grossen magnetokalorischen Effekt zeigen, das heisst eine grosse adiabatische Temperaturdifferenz bei gleichzeitig ebenfalls hoher spezifischer Entropiedifferenz. Die Kosten und die Bearbeitbarkeit dieser Materialien sind Hauptpunkte bei der Beurteilung und werden oft als Kritik genommen oder im Erfolgsfall als wichtiger Vorteil gepriesen.

Erste Ergebnisse der HEIG-VD/SIT-Gruppe im Überblick

Es zeigt sich heute, dass viele Prototypen gebaut und diese wie auch ihre Leistungsdaten publiziert werden. Die wenigsten dieser Maschinen halten einer kritischen Überprüfung stand. Meistens sind die Autoren mit einer ersten Abkühlung bei kleiner Leistung zufrieden. Die Angabe des *COP*-Werts enthält in den seltensten Fällen die Druckverluste der Flüssigkeitsströme. Meistens sind die magnetokalorischen Materialien als Füllbette in die Maschine eingebracht worden. Dies verhindert im vornherein eine Maschineneffizienz, die besser sein kann als jene von konventionellen Maschinen.

Um nicht solche Fehler zu begehen, war es unsere Absicht langsam zu beginnen und viel Kopfarbeit zu Beginn des Projektes zu leisten. Ein wichtiges Resultat solcher Anstrengungen war die im Folgenden beschriebene Entwicklung. Die physikalischen Modelle, welche im Endbericht der diesem Projekt vorausgegangenen Machbarkeitsstudie entwickelt worden waren, wurden stark verbessert und den Realitäten weiter angepasst. Damit ist es möglich alle ersten Maschinenentwürfe bereits einer kritischen Überprüfung zu unterwerfen und vorerst einmal grob so ins Lot zu bringen, dass alle Energieverluste sich mehr oder weniger im Rahmen des Vertretbaren halten lassen. Feinabstimmungen sollen aber erst später an einer ausgewählten Maschine stattfinden. Auf diese Weise kann nicht nur die Mechanik, sondern auch die Magnetokalorik, der erste Entwurf von geeigneten magnetischen Feldern, thermodynamisches Verhalten (vor allem irreversible Wärmeübergänge) und fluiddynamische Eigenschaften alle in ihrer Gesamtheit in vernünftige Bahnen gelenkt werden. Ein wenig selbstlos haben wir uns gedacht, dass wir einige solche Betrachtungen publizieren, damit auch andere an diesen Erkenntnissen partizipieren können. Dies führte zu einer Reihe von Publikationen, vor allem solche im Rahmen von internationalen Konferenzen und Fachjournalen (siehe z.B. Ref. [11] bis [13]).

Jetzt werden die wichtigsten Ergebnisse, welche zu Beginn dieses Projekts erarbeitet worden sind, kurz aufgelistet und dann werden diese Arbeiten in kurzen Unterkapiteln mit mehr Detaillierungsgrad beschrieben. Den einzelnen Punkten wird auch gleich noch ein kleiner Ausblick auf die im Jahre 2009 und anfangs 2010 folgenden Arbeiten zugefügt. Das gibt dem Leser einen guten Einblick in den Stand unserer Arbeiten. Es handelt sich hier um die folgenden Resultate:

- 1) Die weitere Verbesserung eines numerisches Programms in Excel mit einfachen physikalischen Modellen, welches eine gesamtheitliche Berechnung des *COP*-Werts erlaubt. Dieses Programm sollte es ermöglichen ab initio eine sinnvolle energieeffiziente Maschine bauen zu können. Die wichtigsten Optimierungsparameter sind enthalten. Dagegen gibt es noch eine Schwachstelle. Die Berechnung guter Magnetfelder ist noch abgekoppelt und findet mit speziellen Finite-Elemente-Berechnungen statt. Somit ist hier noch zeitaufwändiges iteratives Berechnungsvorgehen gefragt. Eine globalere Lösung dieses Problems wird angestrebt.

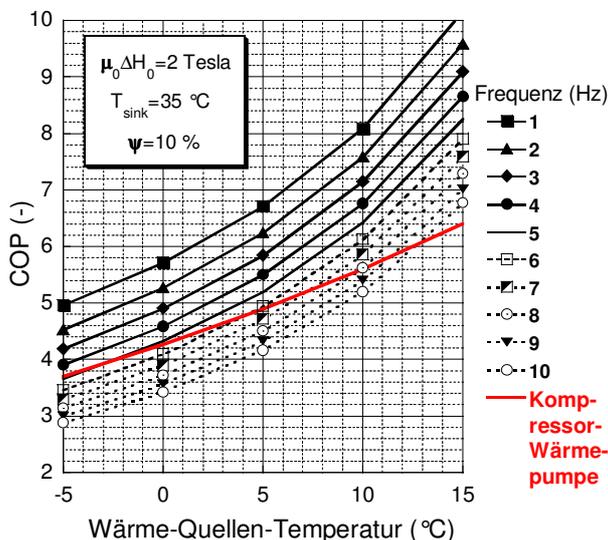
- 2) Es wurden etwa zwei Dutzend verschiedene Maschinen entworfen und einer Evaluation unterzogen. Zurzeit stehen zwei Kronfavoriten zur Verfügung. Obwohl es sich bereits um zwei sehr gute Maschinenentwürfe handelt, wird im Jahre 2009 noch etwa ein Monat für den Versuch die Magnetmasse zu verkleinern investiert werden. Uns scheint das wichtig und deshalb auch lohnend, da die Magnete den teuersten Teil der Maschine ausmachen und die Produktionskosten stark von dieser Masse abhängig sind. Die beiden Maschinentypen werden in der Figur 6 und 7 sehr vereinfacht (nur das Wesentliche ohne Details) dargestellt.
- 3) Spezielle Untersuchungen von etwa zwei Dutzend Magnet-Konfigurationen mit magnetischen Feldberechnungen mit Finite-Elemente-Berechnungen in 2d- und 3d-Berechnungsprozessen. Die erhaltenen Resultate sind ein Hauptkriterium für die Evaluation bester Maschinen. Solche Beispiele magnetischer Feldberechnungen sind in den Figuren 8, 9 und 11 gezeigt. Sollte die Suche nach einer Maschine mit weniger Masse erfolgreich sein, müssen diese Berechnungen zum Teil wiederholt und weitergeführt werden.
- 4) Bestimmung von einer grossen Anzahl von optimalen Parametern, wie z. B. der Porosität (Füllungsgrad und Dimensionen wie Wellenlänge und Amplitude) des magnetokalorischen Materials, das in eine Wellenstruktur eingebracht werden soll, des optimalen Durchmessers und der optimalen Länge des Rotors, usw. Diese Parameter bestimmen die Wärmeübertragungsfläche, welche ebenfalls optimal angepasst werden muss. So sieht man eine komplexe Vernetzung von sechzehn verschiedenen Parametern. Die vielfach wiederholte intelligente Anwendung des Excel-Programmes erlaubt es in diesem „Dschungel“ gute Lösungen zu finden. Hier wird eventuell später noch ein professionelleres Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen.
- 5) Iteration der Berechnungsschritte, welche unter Punkt 3) und 4) beschrieben sind, bis die Ergebnisse für die Mechanik, den Magnetismus und die Fluid- und Thermodynamik im Einklang sind.
- 6) Ein erster Einbezug der HEIG-VD-Gruppe CAD/CAM von Prof. P. Repetti hat stattgefunden. Sobald die magnetische Wärmepumpe von der Gruppe SIT fertig entworfen und optimiert worden ist, wird diese Maschine zur Feinbearbeitung - hinsichtlich konstruktiver Gegebenheiten - an die Fachleute dieser Gruppe zur Weiterbearbeitung weitergereicht.
- 7) Die Evaluation nach besten Materialien ist im Gange. Es wird ein erster Test der Maschine mit Gadolinium stattfinden, aber es ist auch geplant eine Alternative - eine andere Legierung - in der Maschine zu testen. Es zeigt sich, dass Materialwissenschaftler darauf erpicht sind, ihre besten Materialien in solchen Prototypen eingesetzt zu sehen. Wir planen z.B. einen Assistenten im Frühjahr 2009 bei der Produktion eines solchen Materials in grösseren Mengen an der Shanghai Universität teilhaben zu lassen. So wird ein optimaler Wissensaustausch zwischen den verschiedenen Welten der Material- und Systemspezialisten garantiert.
- 8) Nebst all diesen konkreten Projektarbeiten haben wir gewisse interessante Evaluationen der Machbarkeitsstudie ein wenig weiter getrieben, da sie allgemein auf sehr grosses Interesse gestossen sind. Einige dieser Resultate sind in den Figuren 1-4 zu sehen. Solche wurden zum Teil in Konferenzbänden oder in internationalen Journalen publiziert (siehe Ref. [11] bis [15]).

Weiterführung der allgemeinen Untersuchungen

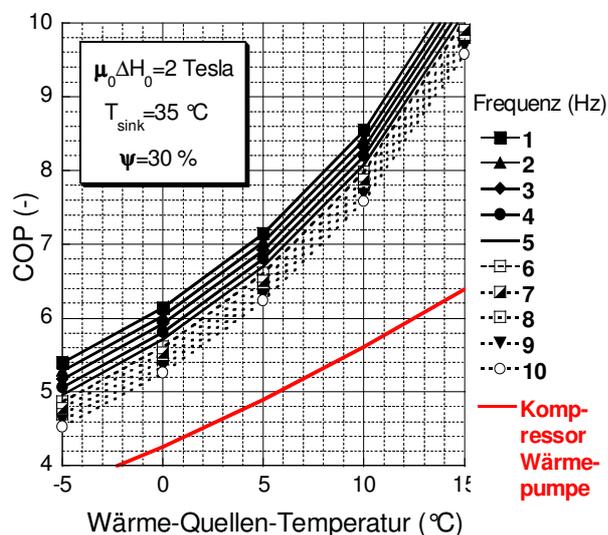
Das erwähnte physikalische Modell, das in einem Excel-Programm mit „Macros“ umgesetzt worden ist, wurde im Endbericht der Machbarkeitsstudie [1] ausführlich beschrieben. Es wurden gewisse Verbesserungen gemacht, die an dieser Stelle, wegen ihrer mathematischen Form, nicht allzu geeignet sind, weiter ausgeführt zu werden. Die Theorie wurde ausgedehnt um verschiedene Betriebsbedingungen von magnetischen Wärmepumpen zu simulieren. Dabei fällt das grösste Augenmerk auf die Bestimmung des magnetokalorischen Rings, die Minimierung von irreversiblen Wärmetransportvorgängen und die Auffindung von best geeigneten Strömungen mit minimalen Druckabfällen.

In dieser Machbarkeitsstudie für eine magnetische Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 8 kW und der Verwertung von Wärme aus dem Untergrund eines Gebäudes ($\vartheta=5^{\circ}\text{C}$) mit Fussbodenheizung ($\vartheta=35^{\circ}\text{C}$) wird ein Temperaturhub von 30 °C verlangt. Das für diesen Fall erstellte Berechnungsprogramm kann natürlich auch ganz andere Fälle berechnen. Wir Autoren dieses Berichts konnten es

daher nicht lassen, diesen Vorteil auszuwerten und einige Grafiken allgemeiner Art zu erstellen. Solche Resultate können bestimmt in anderen Zusammenhängen von Nutzen sein. Diese Figuren wurden auch schon international zugänglich gemacht (siehe speziell in Ref. [13]). Einige sind auch in diesem Bericht gedruckt worden, wie die Figuren 1 und 2 (*COP*-Werte als Funktion der Wärme-Quellen-Temperatur) und die Figuren 3 und 4 (*COP*-Werte als Funktionen der magnetischen Feldstärken) zeigen.



Figur 1: „Coefficients of performance“ (*COP*) einer magnetischen Wärmepumpe als Funktion der Wärme-Quellen-Temperatur und der Rotationsfrequenz für eine magnetische Feld-Induktion von 2 Tesla, eine Temperatur der Wärmesenke von 35 °C und einem Volumen-Packungsgrad mit magnetokalorischem Material des Rades von nur 10 % (gemäss der Ref. [13]).

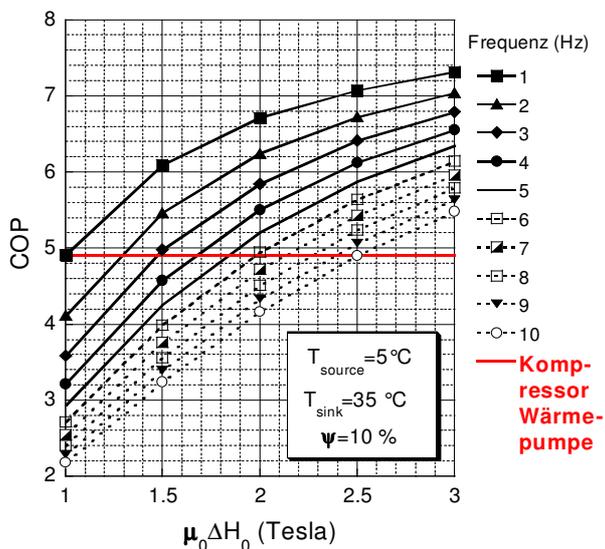


Figur 2: Analoge Figur zu Figur 1, aber für den Volumen-Packungsgrad 30 % [13]. Betrachtet man die beiden Figuren 1 und 2, so wird die Konkurrenzfähigkeit oder sogar ein Potential besser abzuschneiden sehr deutlich. Vor allem der höhere Packungsgrad führt zu noch besseren Resultaten. *COP*-Werte bis zu 7 scheinen für diese Anwendung realistisch zu sein.

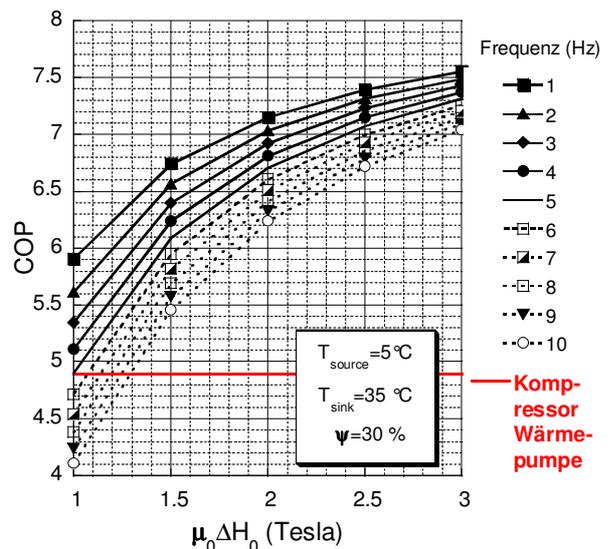
Die Figuren 1 und 2 zeigen auch, dass eine magnetische Feldstärke von 2 T genügt um mit einer konventionellen Kompressions-/Expansions-Wärmepumpe konkurrenzieren zu können. Die durchgeführte Analyse zeigt weiter, dass der Volumenpackungsgrad bis zu etwa 30 % gesteigert werden kann, ohne eine wesentliche Erhöhung der Druckverluste der Fluid-Ströme in Kauf nehmen zu müssen. Daher ist ein Packungsgrad von 30 % natürlich interessant, denn dann hat man eine kompaktere und leistungsstärkere Maschine. Aber nicht nur das magnetokalorische Material wird weniger, sondern damit natürlich auch die Magnetmasse, denn die Räume mit starken magnetischen Feldern reduzieren sich ja auch. Weiter reduzieren sich die Verluste durch diese Kompaktheit. Höhere Packungsgrade werden uninteressant, weil die Druckverluste nun zu Energieverlusten führen, die merklich negativen Einfluss auf die *COP*-Werte haben. Wir arbeiten noch daran 50 % zu erreichen, ein Erfolg ist aber noch nicht garantiert.

In diesen Figuren wurde eine qualitativ gute Wärmepumpe, welche auf dem Markt erhältlich ist, zu Vergleichszwecken herangezogen. Die Studie zeigt vor allem gute Resultate, wenn die Temperaturdifferenzen nicht zu gross sind. Daher zeigt der Vergleich auch bessere Resultate für die Wärmepumpe mit Erdwärme als für eine die Wärme aus der Umgebungsluft bezieht.

Die Figuren 3 und 4 zeigen die Abhängigkeit des *COP*-Werts von der magnetischen Feldstärke für verschiedene Frequenzen der Magnetisierung und Demagnetisierung. Es ist zu beachten, dass bei 10 % Packungsgrad und tiefen Frequenzen magnetische Feldstärken von nur wenig über 1 T schon kompetitive Maschinen ergeben könnten. Bei höheren Packungsgraden werden die Verhältnisse wiederum noch besser. Interessant wäre es, wenn die Frequenz auf zehn Herz erhöht werden könnte. Das würde dann zu kleinen massiven Maschinen führen. Die Gruppe SIT hat vor noch weitere Versuche in diese Richtung zu unternehmen, bevor die definitive Maschinenkonstruktion festgelegt wird. In der Ref. [13] sind auch die entsprechenden Exergie-Wirkungsgrade zu finden.



Figur 3: "Coefficient of Performance" einer magnetischen Wärmepumpe als Funktion der magnetischen Feldstärke und der Rotationsfrequenz für eine Wärme-Quellen-Temperatur von 5 °C, einer Temperatur der Senke von 35°C [13]. Der Volumen-Packungs-Grad beträgt hier 10 %. Ein Vergleich mit einer konventionellen Wärmepumpe (Kurve in roter Farbe) ist gegeben.



Figur 4: Im Rahmen einfacher Optimierungsarbeiten wurden dieselben Berechnungen für einen höheren Packungs-Grad, nämlich 30 %, durchgeführt [13]. Die Resultate fallen noch viel versprechender aus. Die magnetische Wärmepumpe ist gemäss diesen Angaben klar überlegen. Doch auch diese Ergebnisse müssen noch experimentell bestätigt werden.

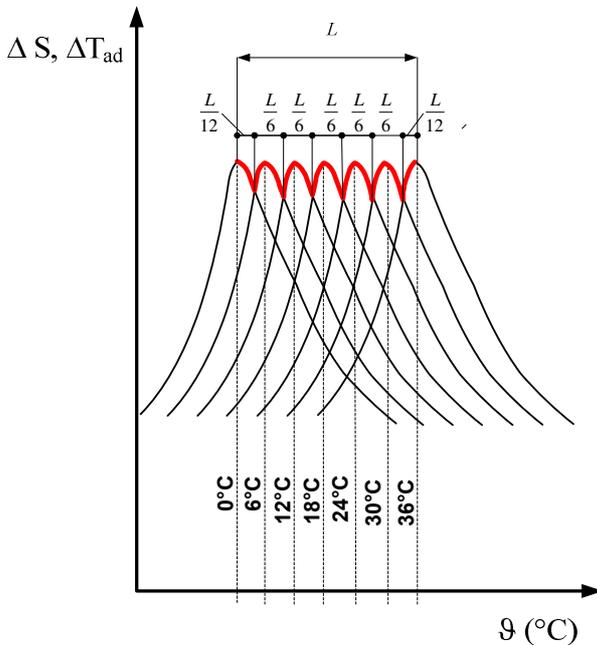
Entsprechende Berechnungsmodelle für Kältemaschinen [16] und magnetische Energie-Konversions-Systeme [17] wurden bereits publiziert. Die genauen Ausführungen der spezifischen Modelle für die magnetische Wärmepumpe werden im Frühjahr 2010 im Schlussbericht dieses Projekts erscheinen. Um das Vertrauen in die Simulationsergebnisse (es gibt (berechtigterweise?) viele Skeptiker für solche Ergebnisse) ein wenig zu heben, sollen hier wenigstens all die Verluste die in den physikalischen Modellen gebührend berücksichtigt werden, aufgelistet werden:

- Thermodynamischer Wirkungsgrad
- Verluste durch irreversible Wärmeübertragung bei den regenerativen Prozessen
- Off-Curie-Temperatur-Betriebsweise
- Hysterese-Verluste im magnetokalorischen Material
- Wirbelstromverluste im magnetischen Material
- Wirbelstromverluste im magnetokalorischen Material
- Strömungs-Reibungsverluste der Rotoren (vernachlässigbar klein)
- Strömungsverluste der konvektiven Wärme-Transport-Fluide
- „Carry-over leakage“ der Rotoren
- Wärmeverluste durch das Apparategehäuse
- Verluste im Antriebsmotor
- Verluste der Zentrifugalpumpen.

Diese Resultate beziehen sich auf ein von der HEIG-VD patentiertes Maschinenprinzip, das in ähnlicher Form vielerorts eingesetzt wird. Diese Maschinen haben wegen Übertragungsverlusten („carry-over leakage“) eine Beschränkung der Rotationsfrequenz zur Folge. Sollten Maschinen erfunden werden, die ohne erhebliche Nachteile höhere Frequenzen erreichen, so könnten die in diesem Bericht dargestellten COP-Werte allenfalls noch übertroffen werden.

Magnetokalorische Materialien

Die besten Kandidaten als Kältemittel für eine Maschine enthalten (Gd), Lanthan (La), und/oder Mangan (Mn) (siehe Referenzen [4] - [8]). Die erste Gruppe der Legierungen, die Gd enthalten, sind teuer. Dagegen sind jene mit La oder Mn wesentlich günstiger und kommen daher eher für eine praktische Umsetzung in Betracht. Die Firmen BASF und Vacuumschmelze konzentrieren sich auf diese Materialien. Dies könnte zu einem realistischen Einsatz guter Materialien in wenigen Jahren führen. BASF hat grosses Interesse bekundet ihre Materialien in der BFE-Magnetischen-Wärmepumpe einzusetzen.



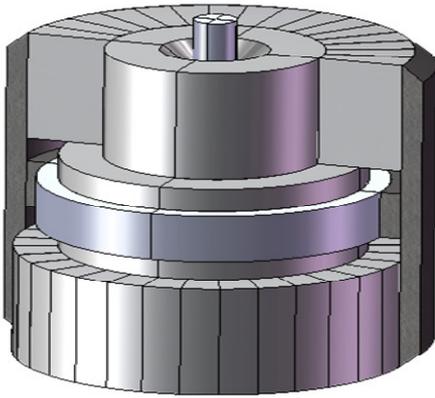
Figur 5: Die „Layering-bed technique“ magnetokalorischer Materialien dient der Leistungssteigerung von magnetischen Wärmepumpen. Dies soll anhand der rechts liegenden Figur verdeutlicht werden. Nehmen wir an in einem Betriebsbereich zwischen 0 °C und 36 °C (es wurde für den Wärmeübergang an der Quelle 5°C, respektive an der Senke 1 °C addiert) würde nur eine Legierung eingesetzt. Dann wäre nur die vierte (von links oder rechts) der sieben Kurven vorhanden. Sofort sieht man wie stark die adiabatische Temperaturdifferenz ΔT_{ad} und die Entropiedifferenz ΔS gegen 0 °C und 36 °C hin abnehmen. Die Grösse L bezeichnet in einer Axialmaschine die Länge des Rotors. Das Fluidum strömt in Achsenrichtung des Zylinders und ändert die Rotortemperatur in dieser Richtung. Wird nun an jeder Stelle die „Performance“ der Legierung an die stationäre Betriebstemperatur an diesem Ort im Rotor angepasst, so erhält man die Funktionsweise der sieben Kurven, die sich überlappen (siehe rote „Kappen“) mit nahezu maximalem Effekt.

Die zweite genannte Gruppe von magnetokalorischen Materialien hat schmalere „Curie-Bereiche“ als die Gd basierten Legierungen. Deshalb erfordern diese Materialien ganz speziell den Einsatz der Schicht-Bett-Technik, wobei hier eine deutsche Übersetzung des Wortes „layered bed „ benützt wird. Je mehr verschiedene Legierungen eingesetzt werden, desto näher ist das Material im ganzen Gebiet in der Nähe der Curietemperatur, wo die grösste Heizungsichte auftritt. Ein Beispiel dieser Technik vermittelt die Figur 5. Es wurde eine adiabatische Temperaturdifferenz von 6 K vorausgesetzt. Dies wird später auch im thermodynamische Zyklus die Voraussetzung sein. Man beachte, dass aber grössere Temperaturdifferenzen in Zukunft möglich sein werden. Es wird angestrebt die Diskussion, welches Zweit-Material eingesetzt werden soll, gleich anfangs 2009 intensiv zu Ende zu führen. Dies ist wichtig, damit alle Berechnungen rechtzeitig nochmals angepasst durchgeführt werden können.

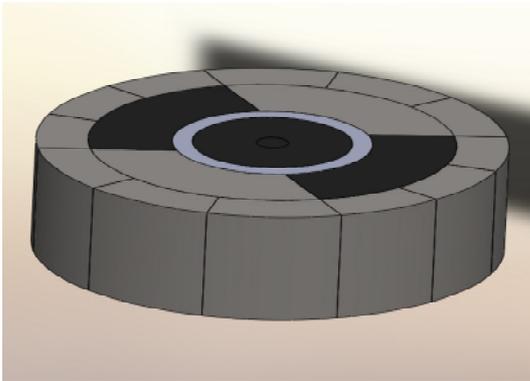
Erste Entwürfe für einen Prototyp

In den letzten zwei Jahren hat die HEIG-VD-Gruppe etwa zwei Dutzend verschiedener Maschinenvarianten diskutiert. Die Situation, dass Egolf und Kitanovski – zurzeit zusammen mit Prof. Yu an der Jiao Tong Universität in Xi’an, China - einen „Review-Artikel“ über alle existierenden Prototypen verfassen, war eine gute Ausgangslage für diesen Prozess. Weiter flossen Ideen aus früheren ähnlichen Aktionen, die zu Patentanmeldungen geführt hatten, in diesen Prozess ein.

Der Maschinenentwurf müsste eigentlich beendet sein; er ist aber noch in seiner Endphase. In den Figuren 6 und 7 werden zwei Kronfavoriten schematisch (noch mit kleinem Detaillierungsgrad) gezeigt. Es handelt sich um eine Maschine mit einer zwei-dimensionalen Magnetkonfiguration (unten) und eine mit einer drei-dimensionalen (oben). Die erstgenannte ist einfacher zu realisieren, hat dafür aber eine kleinere magnetische Felddichte aufzuweisen. Daher wird sie etwas grösser sein. Zurzeit wird evaluiert, welche dieser beiden grundlegenden Prinzipien angewendet werden soll, oder ob sogar eine weitere Entwicklung einer Maschine mit einer noch grösseren Massenreduktion zum Einsatz kommen könnte. Doch im Moment stehen noch Hindernisse einer Realisierung einer hier nicht gezeigten dritten Variante - mit höherer Rotationsfrequenz – im Wege.



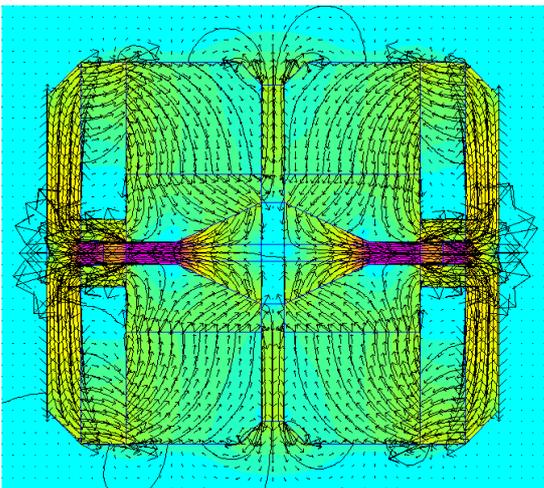
Figur 6: Zwei Möglichkeiten eine magnetische Wärmepumpe zu realisieren sind in dieser Figur gezeigt. Die obere enthält eine dreidimensionale Fokussierung der magnetischen Flusslinien in den Zentralbereich. Dies findet im Innern statt und kann in dieser Figur nicht eingesehen werden. Damit können magnetische Feldstärken von über 2 Tesla erreicht werden. Man beachte, dass die Magnete stationär sind, und dass die magnetokalorische poröse Ringstruktur sich kreisförmig bewegt. Ein innerer Ring aus „weichem“ Eisen hilft eine optimale magnetische Flusslinienverteilung zu erhalten.



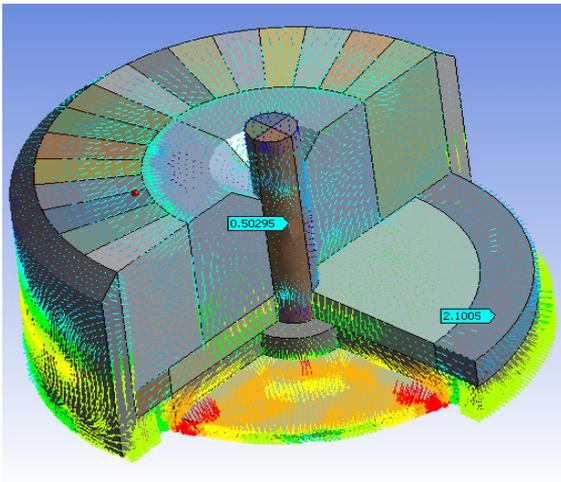
Figur 7: Diese Maschine sieht in dieser Präsentation sehr einfach aus; sie hat aber doch auch einige Spezialitäten, die hier noch nicht gezeigt sind. Die Magnet-Konfiguration ist in diesem Falle extrem einfach. Dagegen ist die magnetische Flussliniendichte kleiner als in der Maschine mit der dreidimensional gestalteten magnetischen Feldverteilung. Die Figuren 1 bis 4 zeigen, dass kleinere magnetische Feldstärken zu kleineren Wirkungsgraden der Maschine führen. Dies ist eine generell richtige Aussage. Dagegen kommt die Einfachheit als attraktiver Pluspunkt zum Tragen.

Magnet-Konfigurationen

Die Auslegung einer idealen Magnetkonfiguration unter den Randbedingungen eine möglichst hohe magnetische Feldstärke zu erreichen und eine kleine Magnetmasse zu realisieren, ist sehr anspruchsvoll und wird nicht von allen Konstrukteuren von Prototypen genügend beachtet. Wir haben herausgefunden (dies ist eigentlich nichts Besonderes), dass das Verhältnis des Volumens zwischen jenem der Magnetkonfiguration und demjenigen des Raumes, welches das Kältemittel magnetokalorisches Material enthält, eine wichtige Grösse ist und zeigt wie gut die verrichtete Arbeit (Optimierung) durchgeführt worden ist. Anstatt des Volumen- kann natürlich das entsprechende Massen-Verhältnis herangezogen werden. Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto tiefer werden die Produktionskosten einer Maschine ausfallen. Das folgt aufgrund der doch erheblichen Kosten für Magnete.

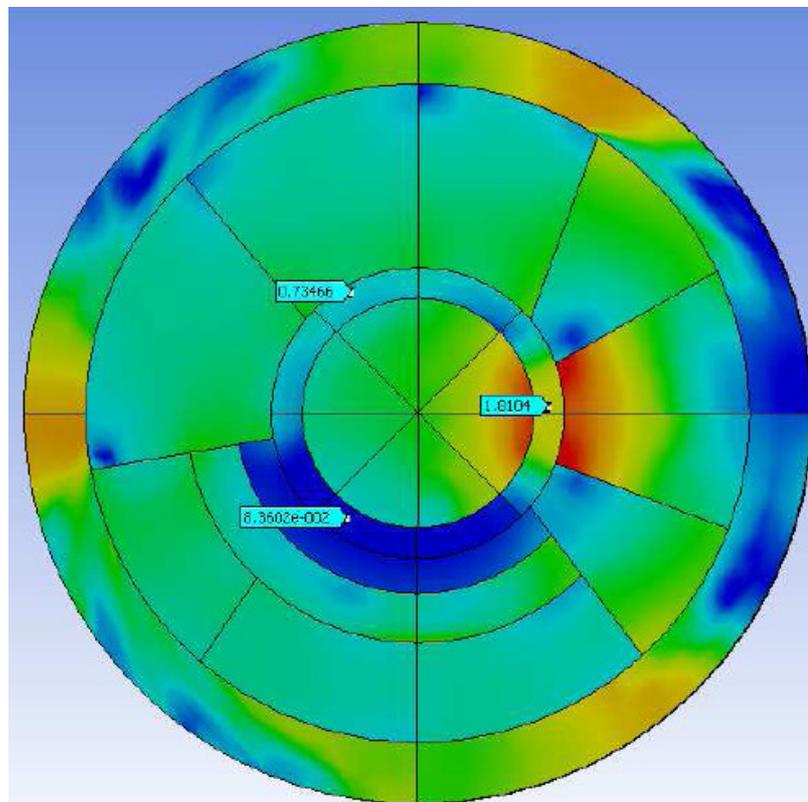


Figur 8: Numerische Feldlinien-Verteilungen als Resultat einer zwei-dimensionalen Simulation mit einem Finite-Elemente-Programm. Zweidimensionale Berechnungen sind schnell gemacht und wurden für erste Untersuchungen eines möglichen Prototyps ausgeführt. Nach dem Erstellen eines Grobkonzepts aufgrund solcher Voruntersuchungen findet jeweils eine feinere Analyse mit dem „ANSYS Multiphysics“ Rechenprogramm statt, welche die exaktere Bestimmung von drei-dimensionalen Feldverteilungen ermöglicht. In diesem Bild ist jedoch schon gut zu erkennen, wie die magnetischen Feldlinien konzentriert im Rad der Maschine auftreten. Die Höhe der Feldstärken geht von gelb zu orange, rot und violett und erreicht in diesem Falle Maximalwerte, die über zwei Tesla liegen.



Figur 9: Hier wird das Resultat einer aufwändigen ANSYS-Multiphysics-Simulation in dreidimensionaler Ausführung dargestellt. Es wurde aber nur der Magnetismus-Modul eingesetzt. Es zeigt sich, dass eine kombinierte Berechnung von Magnetismus- und Thermodynamik-Verhalten einer magnetischen Wärmepumpe sehr komplex ist. Wir arbeiten aber intensiv daran. Zudem werden eigene Programme, die problemspezifisch gestaltet sind, erarbeitet. Dreidimensionale Felder sind nicht so einfach darzustellen. Man kann immer nur mit Schnitten Sachverhalte verdeutlichen. In dieser Maschine werden Flusslinien nicht nur in einer ringförmigen Anordnung zusammengeführt; es wird in dreidimensionaler Weise auf das magnetokalorische Material eingewirkt.

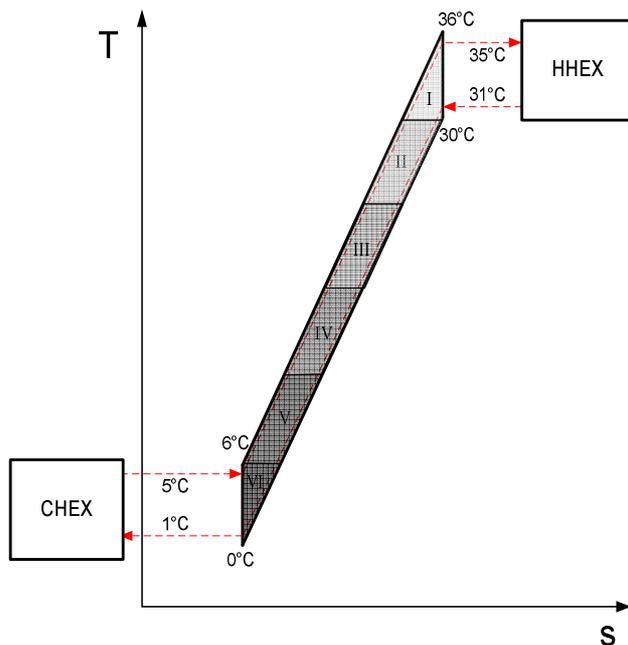
Figur 10: Eine perspektivische Zeichnung der zweidimensionalen Magnetkonfiguration einer möglichen magnetischen Wärmepumpe ist rechts dargestellt. Dieses Modell besitzt einen Bereich höchster magnetischer Feldstärke auf der rechten Seite. Dagegen gibt es auch einen Bereich, der abgeschirmt wird um eine sehr geringe Feldstärke zu bewirken. Die Abschirmung durch magnetisch schlecht leitendes Material ist im Bild in weisser Farbe gezeigt. Der Eisenring, der das Ganze umfasst, minimiert die magnetischen Streuverluste. Auch das ist wichtig um gute COP-Werte zu erreichen.



Figur 11: Das Magnetfeld der zweidimensionalen Maschine wurde ebenfalls mit einer 3-d Simulation ermittelt, da die Länge des Zylinders kurz ist. Wegen Randeffekten ist es nicht möglich absolute verlässliche Resultate mit zweidimensionalen Berechnungen zu erhalten.

Magneto-Thermodynamik der magnetischen Wärmepumpe

Die Figur 12 zeigt einen regenerativen Brayton-Thermodynamik-Zyklus, welcher mit grosser Wahrscheinlichkeit in der von uns vorgeschlagenen magnetischen Wärmepumpe realisiert werden wird. Es könnten natürlich grundsätzlich auch andere thermodynamische Zyklen zum Einsatz kommen. Es könnten zum Teil sogar noch effizientere Zyklen realisiert werden, wie z.B. ein Ericsson-Zyklus, weiter ein Stirling-Zyklus, ein angenäherter Carnot-Zyklus oder sogar ein spezieller von uns vorgeschlagener hybrider thermodynamischer Zyklus. Aber das würde ein wenig weg von der Einfachheit einer Maschine führen, weshalb wir uns nicht für solche Lösungen - gedacht für den einfachen Einsatz in Gebäuden - erwärmen können. Andererseits würden solche komplexere Systeme aber doch einen Einfluss auf die Energieeffizienz und die Magnet-Konfiguration zeigen und damit auf die Magnetmasse, die Gesamtmasse und damit die Kosten der Maschine wesentlich reduzieren. Somit sollte man sich solche Optionen für weiterführende Entwicklungen zu späterer Zeit offen halten.



Figur 12: Ein Beispiel eines regenerativen Brayton-Zyklus für eine magnetische Wärmepumpe ist in dieser Figur zu sehen. Die rot gestrichelten Linien repräsentieren die Fluid-Temperatur-Niveaus. Schwarze Linien stehen für die Beschreibung des Temperatur-Entropie-Verhaltens des magnetokalorischen Materials. Die adiabatische Temperaturänderung von 6 K korrespondiert mit einer magnetischen Feldänderung (angegeben als Induktion in Tesla) von 1.5 bis 2 T, was der „Performance“ von Gadolinium entspricht. Die römischen Zahlen entsprechen einer Materialschichtung mit verschiedenen magnetokalorischen Materialien. Jede Schicht ist genau angepasst an ihre Betriebsbedingungen, genau so wie es im Kapitel über die magnetokalorischen Materialien beschrieben ist (siehe vorne).

Fluiddynamik und Wärmetransport

Die quadratische Beziehung der aufgewendeten Leistung für den Fluidtransport durch die durchlässigen Metallstrukturen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, respektive des Volumenstroms für eine laminare Strömung führt dazu, dass die Leistungszahl sehr sensitiv auf Geschwindigkeitserhöhungen reagiert. Es kann noch schnell passieren, dass man eine Maschine vorschlägt, in der diese Verluste gigantisch sind. Es gibt auch Prototypen, deren Qualitäten gepriesen werden, die eine Prüfung des Druckabfalls nicht erfolgreich bestehen würden. Meist wurde in diesen Fällen die Leistungszahl ohne die Verlustleistung - welche durch den Druckabfall bei gegebenem Volumenstrom entsteht - berechnet.

Auch der Wärmeübergang ist stark von den Strömungsbedingungen abhängig. Und diese werden durch die interne Struktur des magnetokalorischen Rings definiert. Zudem spielen die physikalischen Eigenschaften des Fluidums eine grosse Rolle. Die sehr grosse thermische Kapazität des Wassers (oder der Sole) führt zu einer Schwierigkeit, die gelöst werden muss. Dies ist der Grund warum verschiedene Gruppen den AMR („active magnetic refrigeration cycle“) benutzen. Dazu siehe z.B. die weitreichenden Ausführungen in der Ref. [2]. Das magnetokalorische Material mit seiner Wärmequelle, gegeben durch den magnetokalorischen Effekt, gibt in der Regel zu wenig Wärme ab um das Wasser genügend zu erwärmen. Deshalb sind kleine Wassergeschwindigkeiten gefragt. Dies ist aber wegen der Übertragungsverluste im Rotor ungünstig. Somit erhält die Maschine eine Limitierung der Frequenz. Um eine kleine Maschine zu erhalten, soll aber die Frequenz nicht zu klein sein. Und da hat man schon den Widerspruch, den es aufzulösen gilt. Genau aus diesem Grunde ist die magnetische Wärmepumpe noch nicht eindeutig festgelegt worden und es finden immer noch Versuche statt die Masse der magnetischen Wärmepumpe weiter zu reduzieren.

Nationale Zusammenarbeiten

Das BFE hat auch zwei Studien, in welchen potentielle Anwendungen der magnetischen Kältetechnik und der magnetischen Stromproduktion (inverser Prozess) aufgelistet und untersucht wurden, finanziert. Die Projekt-Schlussberichte (über die magnetische Kältetechnik [16] und magnetische Energiekonversion [17]) wurden diesen Herbst beendet und stehen ebenfalls zur Verfügung.

Offizielle des Kantons Waadt haben beschlossen die Gruppe SIT (Simulations des Systèmes Thermiques) der HEIG-VD als prioritär förderungswürdig zu betrachten. Ein zweiter Teil der Finanzierung dieses Projekts wurde von M. Rochat, dem neuen Generaldirektor der Höheren Ausbildung des Kantons Waadts, vorgeschlagen und vom Kanton bewilligt.

Internationale Zusammenarbeiten

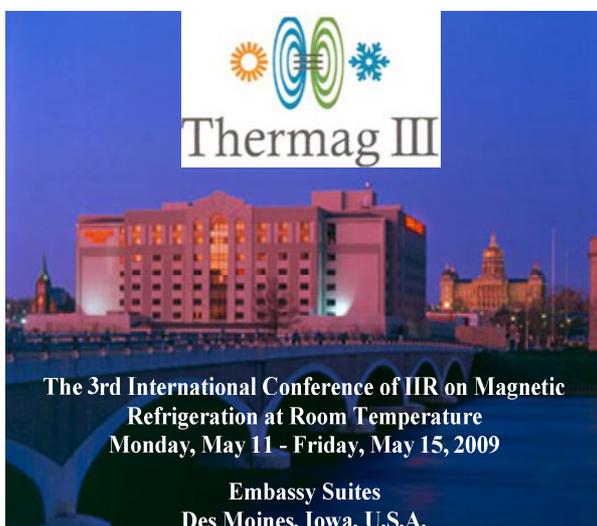
Im letztjährigen Jahres-Schluss-Bericht wurde sehr ausführlich über die verschiedenartigsten Aktivitäten auf dem internationalen Parkett berichtet. All das soll an dieser Stelle nicht wiederholt werden. Wir verweisen deshalb auf den vorjährigen Jahresbericht (siehe Ref. [18]).

Mit Prof. A. Tishin, der an der „Lomonosov Moscow State University“ lehrt und forscht, werden verschiedene gemeinsame Aktivitäten gepflegt. In einem von einer Firma finanzierten Projekt wird eine Klein-Kältemaschine entworfen. Zudem wird gemeinsam an einer Verbesserung der Hyperthermia-Methode durch den Einsatz einer magnetokalorischen Legierung mit einer Curie-Temperatur von 37 °C (Bluttemperatur) gearbeitet. Die gewöhnliche Hyperthermia-Methode gehört heute zur Krebsforschung und wird zur Krebsbekämpfung eingesetzt. Die von uns vorgeschlagene Methode ist noch weit von einem Einsatz in einer Klinik entfernt. Eine russische Studentin hat im Sommer 2008 als Austauschstudentin im SIT-Labor gearbeitet (siehe Ref. [19]).

Eine gute Zusammenarbeit wird auch mit der Gruppe um Prof. A. Poredos an der Universität in Ljubljana gepflegt. P.W. Egolf und A. Kitanovski waren z.B. Ko-Referenten bei der Doktoratsprüfung von A. Sarlah, der mit einer Doktorarbeit in magnetischer Kältetechnik promovierte [20]).

Im Jahre 2008 wurde eine Zusammenarbeit mit Prof. Hatton am MIT in Boston, USA, begonnen. Ein Mitarbeiter der Gruppe SIT studierte während dreier Monate den Einsatz magnetischer Flüssigkeiten in verschiedenen technischen Anwendungen. Neue Projektideen sind aus dieser Zusammenarbeit entstanden und werden auch mit Ronald Rosensweig (New Jersey) und Reinhard Richter (Universität Bayreuth) weiter verfolgt.

Eine gute Zusammenarbeit mit K. Gschneidner und Vitalij Pecharsky am AMES Institut der IOWA „State University“ konnte weiter ausgebaut werden. Zurzeit wird in einer gemeinsamen Aktion die „Third Int. Conf. on Magnetic Refrigeration at Room Temperature“ organisiert, welche im nächsten Mai stattfinden wird. Die HEIG-VD ist auch Sponsor dieser Konferenz (die Internet-Seite ist in Ref. [21] gegeben).



Figur 6: Der Internationale Kälteverband IIF/IIR mit Sitz in Paris verfügt über eine Arbeitsgruppe „Magnetic Refrigeration at Room Temperature“, die von P. W. Egolf und A. Kitanovski geleitet wird. In einem zweijährigen Zyklus werden internationale Konferenzen durchgeführt. Zurzeit wird die dritte Konferenz, kurz THERMAG III genannt, organisiert. Die Anmeldung von bereits 130 Beiträgen (gegenüber je zirka 50 an der Thermag I und II) zeigen das steigende Interesse von Industrielleuten und Forschern an dieser innovativen Technologie. An dieser Konferenz wird die Arbeitsgruppe eine Sitzung durchführen um über die Koordination von Aufgaben zu diskutieren. Diese Sitzungen sind für jedermann zugänglich. Interessierte sind auch jederzeit eingeladen kostenlos Mitglied der Arbeitsgruppe zu werden (für die Internet-Seite siehe Ref. [22]).

Verdankung

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie, Thomas Kopp und Roland Brüniger, für ihr Engagement für die Technologie des magnetischen Kühlens. Weiter sind wir dankbar den Vertretern des Kantons Waadt, Michel Rochat und Christian Kunze, für ihre Unterstützung unserer Arbeiten.

Referenzen

- [1] P. W. Egolf, F. Gendre, A. Kitanovski, O. Sari, **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz**. Schlussbericht des Projektes zuhanden des Bundesamtes für Energie Nr. 100873/151017, 2006, pp. 1- 67
- [2] B. Yu, M. Liu P. W. Egolf, A. Kitanovski, **A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2009**, Invited article in preparation for the International Journal of Refrigeration, 2009
- [3] K. A. Gschneidner Jr., V. K. Pecharsky, **30 years of near room temperature magnetic cooling**. Conference Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature. Portoroz, Slovenia, 11-13, April 2007, pp. 9-21
- [4] K. A. Gschneidner, V. K. Pecharsky, A. O. Tsokol, **Recent developments in magnetocaloric materials**, Inst. of Phys., Rep. Prog. Phys. 68, 2005, pp. 1479-1539
- [5] V. K. Pecharsky, K. A. Gschneidner, **Advanced magnetocaloric materials: What does future hold ?**, Int. J. of Refr., 29, 2006, pp. 1239-1249
- [6] H. Wada, **Magnetocaloric effect and magnetic refrigerant materials**, J. Calorimetry and Thermal Analysis, Vol. 33, No 3, 2006, pp. 98-103
- [7] A. M. Tishin, **Magnetocaloric effect: Current situation and future trends**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, JMMM, 316, 2007, pp. 351-357
- [8] E. Brueck, **Magnetocaloric refrigeration at ambient temperature**, Handbook of Magnetic Materials, Vol. 17, 2007, pp. 235-291
- [9] www.basf-fb.de (Dezember 2008)
- [10] www.vacuumschmelze.de (Dezember 2008)
- [11] P. W. Egolf, A. Kitanovski, M. Diebold, C. Gonin, D. Vuarnoz, **Magnetic power conversion with machines containing full or porous wheel heat exchangers**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, JMMM, in press, Nov. 2008
- [12] A. Kitanovski, P. W. Egolf, **Application of magnetic refrigeration and its assessment**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, in press, November 2008
- [13] A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin, P. W. Egolf, **Research on rotary porous wheel magnetic heat pumps in Switzerland**, Proceedings of the 9th International IEA heat pump conference, Zürich, 2008
- [14] P. W. Egolf, A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin, **Magnetic heating, refrigeration and power conversion**, Proceedings of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 14-17, 2008
- [15] P. W. Egolf, R. E. Rosensweig, **Magnetic refrigeration at room temperature**, XIII. European Conference, UNEP-IIR-CSG, November 2008
- [16] A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin, P. W. Egolf, **Applications of magnetic refrigeration and its assessment**, Jahresbericht für das Bundesamt für Energie, 2007, 1-12
- [17] A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin, P. W. Egolf, **Applications of magnetic "power production" and its assessment**, Jahresbericht für das Bundesamt für Energie, 2007, 1-11
- [18] P. W. Egolf *et al.*, **Magnetische Wärmepumpe mit Erd-Wärme-Quelle**, Jahresbericht des Projekts zuhanden des Bundesamts für Energie Nr. 100'873/152'928, 2007, pp. 1-11
- [19] E. Zatssepina *et al.*, **Magnetocaloric effect applied for a cancer tumour defeat: improved hyperthermia method**, Scientific report of a summer internship, HEIG-VD, IGT-SIT, August 2008
- [20] A. Sarlah, **Thermo-hydraulic properties of heat regenerators in magnetic refrigerator**, PhD at the University of Ljubljana, Slovenia, 2008
- [21] <http://www.ucs.iastate.edu/mnet/thermag/home.html>
- [22] <http://www.mcwp.ch/>