



ANWENDUNGEN DER MAGNETISCHEN KÄLTETECHNIK UND IHRE BEWERTUNG

Jahresbericht 2006

Autor und Koautoren	Peter W. Egolf, Andrej Kitanovski, Osmann Sari
Beauftragte Institution	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
Adresse	Route de Cheseaux 1
Telefon, E-mail, Internetadresse	024 426 44 79, Peter.egolf@heig-vd.ch,
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101776 / 152191
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Oktober 2006 - 31. Dezember 2007
Datum	1. November 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde vor kurzem eine Studie begonnen, welche den Stand der magnetischen Kältetechnik zusammenfasst und ihre Vor- und Nachteile auflistet. Es wird der heutige Stand der Entwicklung der magnetokalorischen Materialien, der Permanentmagnete und der magnetischen Kältesysteme beschrieben.

Dann werden eine Vielzahl möglicher Anwendungen der Kältetechnik aufgelistet und deren spezifische Anforderungen erörtert. Dies wird im wesentlichen für die folgenden Bereiche gemacht: Haushaltgeräte, Gebäude-Klimatisierung, Distrikt-Heizungs- und Kühlungs-systeme, Transport, Lebensmittelindustrie, Prozessindustrie, Medizin, und Elektronik.

Für spezifische Datensätze (eine Leistung und zwei Temperaturniveaus) werden dann je ein Kaskaden- oder Regenerations-Prototyp-System vorgeschlagen. Für alle Geräte und Anlagen der magnetischen Heiz- und/oder Kühltechnologie sollen deren Betriebsweisen physikalisch modelliert und mit der Optimierungsgrösse „Coefficient of Performance“ approximativ berechnet werden. Diese Prototypen werden auf den Patentanmeldungen der HEIG-VD basierend entworfen werden.

Mit Beratung von Ökonomen sollen approximative Kostenschätzungen durchgeführt werden und Vergleiche mit bestehenden Geräten, respektive Anlagen gemacht werden.

Die Studie wird mit einer Beurteilung all der aufgelisteten Fälle und einer Auswahl besonders geeigneter Systeme für die magnetische Kühlung abgeschlossen werden. Zur Beurteilung werden vor allem der „Coefficient of Performance“ und die Gerätekosten zu Hilfe genommen. Für die ein bis zwei geeignetsten Anwendungen werden dann etwas detailliertere numerische Berechnungen durchgeführt werden. Es wird dann aber auch ein Folgeprojekt vorgeschlagen werden, wo diese Arbeiten fortgesetzt und konkrete Prototypen gebaut werden sollen.

Projektziele

Die magnetische Kühlung, von Emil Warburg 1881 entdeckt [1] - zu einer Zeit als noch keine Nobelpreise vergeben worden sind - , wurde von Peter Debye und William Giauque mit der Anwendung von paramagnetischen Salzen zu einer Tieftemperatur-Kühltechnik weiterentwickelt, wo sie sich bewährt und noch heute Anwendung findet. Die magnetokalorische Heiz- und Kältetechnik hat weltweit viel Aufsehen erregt, als Pecharsky und Gschneidner Mitte der Neunzigerjahre des letzten Jahrhunderts den „Giant Magnetocaloric Effect“ entdeckt haben [2], der dazu noch bei Raumtemperatur auftritt. Diese Entdeckung eröffnet die Perspektive in nützlicher Frist einen Kühlschranks, der bei Raumtemperatur arbeitet, konstruieren zu können. Erste Prototypen wurden von der Astronautics Corporation in den USA, der Firma Chubu-Toshiba in Japan, der University of Victoria in Kanada vorgestellt. Es gibt heute weltweit etwa ein Dutzend solcher Prototypen und laufend werden neue Patente für diese Technologie eingereicht. Eine Maschine, die in einer Testanlage auf dem Markt installiert worden ist, besteht bis heute nach dem besten Wissen der Autoren noch nicht. Ähnliche Material-Entwicklungen wie jene von Gschneidner und Pecharsky - aber mit Mangan-Legierungen - wurden am Van-der-Waals-Zeeman-Institut der Universität Amsterdam in der Gruppe des Physikers Ekkes Brück gemacht [3]. Die Verantwortlichen für dieses Projekt besitzen gute Kontakte zu diesen Fachleuten. Es handelt sich bei der Technologie der magnetischen Heiz- und Kältetechnik um einen physikalischen Effekt mit Analogien zum gewohnten Heiz- und Kälteprozess, welcher in konventionellen Kältemaschinen und Wärmepumpen realisiert wird. Das „Department of Energy“ in den USA hat das AMES Laboratory von Gschneidner und Pecharsky mit einem Preis von 1.25 Mio Dollar ausgezeichnet um Materialuntersuchungen, aber auch entsprechende Maschinen-Entwicklungen effizienter und schneller vorantreiben zu können. In den USA, Kanada, Frankreich, Japan und China werden zurzeit massiv Projekte unterstützt, um die Technik zu entwickeln und näher an den Markt zu bringen. Das wissen die Autoren durch ihre Mitarbeit in der Arbeitsgruppe „Magnetische Kältetechnik“ des „International Institute of Refrigeration“ [4]. In Frankreich ist die Firma Cooltech mit zirka zwölf Spezialisten (Mechanik-Ingenieure, Thermodynamiker, Elektroingenieure, Physiker, Ökonomen, usw.) und einer großen Finanzierung durch eine Investorengruppe mit einer sehr ambitionierten Zielsetzung daran in drei Jahren eine Maschine auf den Markt zu bringen. Die Schweizer-Gruppe hat durch interessante Patentanmeldungen einige erfolgsversprechende Möglichkeiten erwirkt. Sie ist aber personell noch zu schwach bestückt um in dem weltweiten Wettlauf längerfristig erfolgreich mithalten zu können. Dieses Projekt hat auch – nebst den eigentlichen definierten Forschungsaufgaben – zum Ziel, die magnetische Kältetechnik in der Schweiz weiter zu entwickeln.

Die Zielsetzung des vorgeschlagenen Projekts ist eine Studie über die Technologie der magnetokalorischen Kältetechnik. Sie soll eine Ergänzung zur „Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz“ [5], finanziert durch das Bundesamt für Energie, darstellen. Diese Studie soll darüber Auskunft geben, welche Gebiete der Kältetechnik - von der kleinströmigen Kühlung elektronischer Komponenten bis hin zur großen Kälteproduktion in der Prozessindustrie - sich heute vor allem für die Anwendung der magnetischen Kältetechnik eignen.

Die erwarteten Ergebnisse werden in Kürze aufgelistet:

- 1) Überblick über die Technologie „Magnetische Kältetechnik“
- 2) Vor- und Nachteile der Technologie
- 3) Gegenüberstellung mit anderen Kälteproduktionsverfahren
- 4) Liste und kurze Beschreibung der möglichen Anwendungen
- 5) Technische Charakterisierung der ausgewählten praktischen Anwendungen
- 6) Vorschlag je eines geeigneten Prototyps
- 7) Numerische Modellierung mit Vereinfachungen der Maschinen
- 8) Numerische Energieverbrauchsrechnungen
- 9) Kostenabschätzungen
- 10) Weltmarkt (Anzahl produzierte Apparate oder Anlagen, charakteristische Preise)
- 11) Vergleiche des neuen Systems mit der konventionellen Technologie
- 12) Vorschlag für weiterführende Arbeiten.

Aufgrund dieser Studie sollten finanzielle Ressourcen für die Forschung und Entwicklung in Zukunft optimal eingesetzt werden können. Für die ausgewählten Systeme sollen rechnerisch Energieverbrauchsrechnungen und System-Kosten-Abschätzungen erarbeitet werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

In einer ersten Phase wurden die Gebiete definiert für die magnetische Heiz-, respektive Kühlsysteme in Frage kommen könnten. Es sind dies die folgenden fünfzehn Domänen:

- 1) Haushalt-Kühlschränke mit und ohne Gefrierfach
- 2) Weinschränke
- 3) Klimageräte
- 4) Split-Kühlgeräte
- 5) Zentrale Kühlsysteme
- 6) Wärmepumpen
- 7) Kühlung im medizinischen Bereich
- 8) Kühlung im Lebensmittelbereich
- 9) Industrielle Kühlsysteme mit Speicherung
- 10) Kühlung in automotiven Objekten (Auto, Lastwagen, Wohnwagen, Zug, Schiff, Flugzeug, usw.)
- 11) Kühlung in Distrikt-Heizungs- und Kältesystemen
- 12) Kühlung in Polygenerationssystemen
- 13) Kühlung von Industrieprozessen
- 14) Kühlung in Supermärkten
- 15) Kühlung von Elektronikkomponenten.

Danach wurden für jede dieser Gebiete eine Recherche in der Fachliteratur und auf dem Internet gemacht um je ein charakteristisches Gerät, respektive eine repräsentative Anlage zu definieren. Für diese Fälle wurden dann die erforderlichen Leistungsbereiche ermittelt und das untere und obere Temperaturniveau festgelegt. Diese drei Daten sind die wichtigsten Eckdaten für den Entwurf eines Prototypen. Es ist zum Beispiel die maximale Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und unteren Temperaturniveau zu dem man noch zwei Temperaturdifferenzen für den Wärmeübergang zwischen der Wärmequelle und dem Gerät sowie der Wärmesenke und dem Gerät addieren muss. Andernfalls könnte ja zum Beispiel ein Kühlschrank die angefallene Wärme gar nicht an die Raumluft abgeben. Diese finale Temperaturdifferenz - zusammen mit der adiabatischen maximalen Temperaturdifferenz des vorgesehenen magnetokalorischen Materials - bestimmt nun die Anzahl Kaskaden-, respektive Regenerationszyklen, die eingeplant werden müssen.

Aus der Vielzahl von Geräten und Systemen der bereitgestellten Liste sollen drei Beispiele kurz dargestellt werden:

1) *Der Haushalt-Kühlschrank ohne Gefrierfach*

Ein typischer Haushalt-Kühlschrank, wie er fast in jeder Wohnung steht, ist in der Figur 1 gezeigt. Im Innern wird Wärme von der Luft des Innenraums durch freie oder durch eine schwach erzwungene Strömung durch eine große Oberfläche an eine Kupferschlange abgegeben. Die Wärme gelangt dann an das Kühlfluida in den Kupferleitungen, welches im Kühlschrank ohne Gefrierfach manchmal das primäre Kältemittel selbst (heute vielfach R134a) ist. Dieses wird im Kälteprozess verwendet um Kälte zu produzieren. Die vier Grundfunktionen:

- 1) Kompression des Kältemittels
- 2) Wärme abführen
- 3) Expansion des Kältemittels
- 4) Wärme zuführen

werden kontinuierlich und zyklisch ausgeführt. Wenn ein sekundäres Kälte transportmittel eingesetzt wird, so wird über einen Wärmetauscher die „Kälte“ an ein normalerweise umweltfreundlicheres Fluida abgegeben und weiter transportiert. Ein solches Fluida ist meistens Wasser, welches manchmal zur Sicherheit mit einem Antifrogen-Mittel versehen ist. Dieses transportiert die Wärme aus dem Kühlschrank, meist auf die Rückseite, wo es durch mit Blechlamellen versehene Kupferschlangen strömt. Diese Bleche sind nötig, da Luft - das mit kleinen Geschwindigkeiten strömt - kleine Wärmeübergangskoeffizienten hat. Um die Wärme übertragen zu können, muss deshalb die Oberfläche groß sein. Hier wird die Wärme ebenfalls durch freie Konvektion an den Raum abgegeben.



Figur 1: Ein Beispiel eines modernen Gas-Kompressions-Haushalt-Kühlschranks mit verschiedenen Frischhaltefächern für Käse, Fleisch, Gemüse, usw. (Quelle: www.gorenje.si).

Die tiefste Temperatur der Wärmesenke ist gerade oberhalb der Nullgradgrenze. Wir wollen 2 °C ansetzen. Die Temperatur der Wärmequelle beträgt je nach Anwendungsfall 16 bis 32°C. Somit kann man mit einer Temperaturdifferenz von 30 °C rechnen. Wird ein magnetischer Kühlschrank vorgesehen, welcher mit porösen Wärmetauschern bestückt ist, so sind die Wärmeübertragerflächen derart groß, dass sich die Temperaturdifferenz sogar noch verkleinern ließe. Die Kühlleistung ist in den letzten Jahren stark reduziert worden und ist bei guten Geräten weniger als 100 W. Der „Coefficient of Performance“ ist eher gering und erreicht Werte um 3,0.

Physikalische Größe	Numerische Größe
Leistung	40 W - 100 W
Unteres Temperaturniveau	2 °C
Oberes Temperaturniveau	32 °C
Temperaturdifferenz	30 K
„Coefficient of Performance“	≅ 3,0

2) Labor-Kühlgeräte

Viele dieser Geräte haben eine transparente Türe. Dies ist aber nicht immer der Fall. Normalerweise werden Innenraumtemperaturen von 0 °C bis 10 °C verlangt. Diese Geräte sind wie gewöhnliche Kühlschränke konzipiert. Sie haben einen luftgekühlten Kondensator und einen Verdampfer mit Luft, welcher meistens mit erzwungener Strömung funktioniert. Es werden meist hermetische Kompressoren eingesetzt um diese Geräte zu bestücken.



Figur 2: Ein Beispiel eines Kühlgerätes für Laboranwendungen, wie zum Beispiel für die Chromatographie. Durch die transparente Türe sind die verschiedenen Fächer für die Aufbewahrung z.B. medizinischer Proben zu sehen.

Quelle:

<http://www.rtfmanufacturing.com/healthcare/products/plus4degree/bloodbank.html>

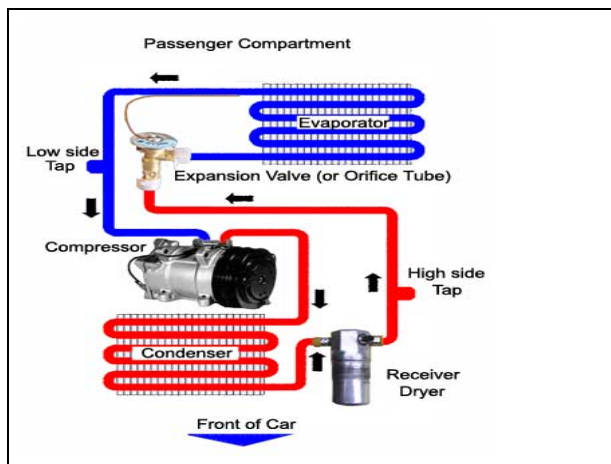
Ein ähnliches Gerät für die Lagerung von Blutplasma erfordert eine Innenraumtemperatur bis zu -40 °C. Das führt zu sehr hohen Temperaturdifferenzen.

Physikalische Grösse	Numerische Grösse
Leistung	50 W - 200 W
Unteres Temperaturniveau	-3 °C
Oberes Temperaturniveau	32 °C
Temperaturdifferenz	35 K
„Coefficient of Performance“	2,5 - 3,0

3) Kühlung in automotiven Objekten (Auto und Busse)

Klimaanlagen für Fahrzeuge sollen die Funktionen Heizen und Kühlen wahrnehmen. In einigen Fällen wird auch eine Entfeuchtung über den Kühlprozess (Taupunktunterschreitung) erreicht. Die Kühlleistung eines Autos kann gut 5 kW betragen. Die hohe Leistung ist erforderlich, da zum Beispiel ein im Sommer auf 80°C aufgeheizter Fahrzeug-Innenraum innert Minuten auf komfortable 22 °C gekühlt werden soll. Urbane Busse mit zirka fünfzig Plätzen verlangen Kälteleistungen von etwa 20-35 kW. Da im Winter schon mal Temperaturen von -15 °C auftreten können, wird der Betriebstemperaturbereich extrem groß: -15 °C bis zu 80 °C. Für den Sommerfall muss mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 60 K gerechnet werden.

Heute ist auch in den Fahrzeugen das Kältemittel 134a sehr häufig anzutreffen. Die Automobilbranche gibt zurzeit Millionen für die Erforschung von CO₂-Kälteanlagen aus. Wegen der hohen Drücke sind auch solche Anlagen nicht die optimalste Lösung. - Interessante Fälle sind auch die Klimatisierung von Fahrerkabinen von Lastwagen. Die magnetische Kälteanlage ist absolut lautlos!



Figur 3: Konventionelle automotiv Klima- respektive Kälteanlage. Wer kennt nicht den Kühlerrost (im Fachjargon: Kondensator) der Auto-Klimaanlage, welcher sich zu vorderst unter der Kühlerhaube befindet? Dieser wird aber auch zur Kühlung des Motors verwendet. Weiter ist der Verdampfer, der Kompressor, das Expansionsventil und vor diesem im Kreislauf angeordnet ein Trocknungsgerät zu sehen.

Quelle: <http://www.familycar.comac1.htm>

Physikalische Grösse	Numerische Grösse
Leistung	3 kW – 5 kW
Unteres Temperaturniveau	Sommerfall: 20 °C
Oberes Temperaturniveau	Sommerfall: 80 °C (Startbedingungen)
Temperaturdifferenz	60 K
„Coefficient of Performance“	2 - 3

Wir haben nun die Listen der zu untersuchenden Geräte und Systeme erstellt (siehe obige drei Beispiele). Eine Bewertung dieser Systeme im Hinblick auf eine Anwendung der magnetischen Kältetechnik hat aber noch nicht stattgefunden und gehört zu einer unserer nächsten Aufgaben. Bewusst wurden noch nicht die geeignetsten Fälle für die magnetische Kühlung vorgestellt.

Nationale Zusammenarbeit

Die Gruppe SIT (Simulation des Systèmes Thermique), welche vor fünf Jahren mit der Untersuchung von magnetischen Kältesystemen begonnen hat, arbeitet mit Thermodynamik-Gruppen zusammen, welche Prototypen bauen können und eine hohe Fachkompetenz im Durchführen von Messungen haben. Zwei Prototypen wurden in diesem Kontext bereits für uns von der Gruppe TIS (Thermique Industrielle et des Systèmes) gebaut. Eine weitere Gruppe der HEIG-VD, Departement „Électricité“, welche von Prof. Ch. Besson geleitet wird, hat in einer Zusammenarbeit Optimierungs-Berechnungen von Magnet-Konfigurationen vorgenommen.

Die Gruppe SIT verfügt über ein grösseres Projekt, finanziert durch die Gebert Rüt Stiftung. Dieses Projekt garantierte eine Initialfinanzierung, mit der diese Tätigkeiten aufgenommen werden konnten.

Das Bundesamt für Energie gab eine „Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz“ [5] in Auftrag. Der Schlussbericht wird Ende 2006 veröffentlicht werden.

Es bestehen viele Firmenkontakte zu Firmen, welche sich für die magnetische Heiz- oder Kältetechnik interessieren. Mit wenig Ausnahmen müssen Zusammenarbeiten noch weiter konkretisiert werden.

Internationale Zusammenarbeit

Die beiden erstgenannten Autoren dieses Jahresendberichtes sind Präsident und Vize-Präsident der Arbeitsgruppe „Magnetic Cooling“ des „International Institute of Refrigeration“. Diese organisiert zurzeit die „Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature“, welche vom 11.-13. April 2006 in Portoroz, Slovenien, stattfinden wird (siehe www.thermag2007.si).

Die HEIG-VD, Gruppe SIT, arbeitet auf dem Gebiete der magnetischen Kühlung eng mit der Universität von Ljubljna zusammen. So betreuen die zwei erstgenannten Autoren dieses Berichts zum Beispiel auch einen Doktoranden (Alen Sarlah) während seiner Dissertationszeit, der in der Gruppe von Prof. Alojz Poredos tätig ist.

Auf einer Reise durch die USA, welche von Michel Rochat im Rahmen eines Swissex-Auftritts in San Francisco organisiert worden ist, haben er, Osmann Sari und Peter W. Egolf mit Robert Shull („National Institute of Standard and Technology, NIST“) in Gaithersbourg und mit Karl Gschneidner und Vitalji Pecharski an der „IOWA University (AMES Laboratory)“ den Willen zusammenzuarbeiten bekundet. Absichtserklärungen zwischen den Instituten wurden auf einer höheren administrativen Ebene ausgetauscht.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Die Arbeiten wurden erst kürzlich begonnen; es ist noch zu früh um eine Bewertung vorzunehmen.

Referenzen

- [1] E. Warburg, **Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Koerzitivkraft**, Ann. Phys. **13**, pp. 141–164, 1881.
- [2] V.K. Pecharsky V.K. Gschneidner Jr., **Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~ 20 to ~ 290 K**, Applied Physics Letters **70** (24), pp. 3299-3301, 1997.
- [3] E. Brück, O. Tegus, X.W. Li, F.R. de Boer, K.H.J. Buschow, **Magnetic refrigeration towards room-temperature applications**, Physica B **327**, pp. 431-437, 2003.
- [4] **Internet: www.iifir.org**
- [5] P.W. Egolf, F. Gendre, A. Kitanovski, O. Sari. **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz**, Schlussbericht eines Projekts des Bundesamtes für Energie, Forschungsprogramm: Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Dezember 2006.

DANKSAGUNGEN

Die Autoren danken dem BFE, insbesondere den Herren Felix Frey und Ronald Brüniger für ihre Unterstützung.