



ANWENDUNGEN DER MAGNETISCHEN „POWER PRODUCTION“ 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 / 152190
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Oktober 2006 - 31. Dezember 2007
Datum	1. November 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine Studie über eine Technologie erarbeitet, welche den inversen magnetokalorischen Effekt oder die temperaturabhängige Magnetisierung von Magneten verwenden soll, um Niedertemperaturwärme (zwischen 50 °C und 300 °C) in mechanische oder elektrische Energie umzuwandeln.

Das Interessante an dieser Systemidee ist, dass Energie niedriger Temperatur in mechanische und über einen elektrischen Generator in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

Dies ist insbesondere in Anwendungen, wo sehr viel Wärme anfällt und die Transportwege für eine Verteilung dieser Wärme zu Endverbrauchern von großer Länge sind, von speziellem Interesse. Ein thermisches Verteilsystem hat erhebliche Verluste und ist teuer in der Anschaffung (z.B. Distrikt-Heizsystem). Wenn am Orte der Entstehung der Wärme Elektrizität produziert werden kann, so können die wesentlich günstigeren elektrischen Verteilnetze genutzt werden.

Es werden mögliche Anwendungsgebiete dieser Technologie aufgelistet und diskutiert. Dies sind zum Beispiel solare Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturanlagen, die geothermischen Anlagen und verschiedenste Abwärme-Nutzungs-Systeme industrieller Fabrikations- und Kraftwerks-Technologien.

Für solche Anwendungsfälle werden Systeme - basierend auf HEIG-VD Patentanmeldungen - vorgeschlagen und deren Systemeffizienzen (numerisch) berechnet werden. Aufgrund der erhaltenen Resultate wird dann - falls sie ermutigend sind - ein allfälliges Folgeprojekt mit Prototypenbau empfohlen.

Projektziele

Die Erforschung der magnetokalorischen „Power-Production“ begann im 19-ten Jahrhundert, als zwei Wissenschaftler, Tesla [1] und Edison [2], ihre Ideen über den pyromagnetischen Generator patentieren liessen. Einstein [3] schlug vor, eine magnetokalorische Suspension zu verwenden um thermische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. In den Jahren 1947 und 1967 folgten weitere Patente von Hindle [4] und Guilden [5]. Resler and Rosensweig (siehe Ref. [6] und [7]) waren die ersten, welche einen Regenerationsprozess bei dieser Energiekonversion vorschlugen. Rosensweig ist sehr bekannt für seine Pionier-Arbeiten über die Ferro-Fluid-Dynamik. Sein Buch „*Ferrohydrodynamics*“ ist ein Standardwerk des Magnetismus [8]. Er war diesen Sommer Gastprofessor an der HEIG-VD in der Gruppe von P.W. Egolf und wird weiterhin als „Consultant“ oder Mitarbeiter für Projekte zur Verfügung stehen. Van der Voort [9] machte Verbesserungsvorschläge und 1984 publizierte Kiorl und Mills [10] verschiedene Möglichkeiten diese Technologie anzuwenden und machte thermodynamische Systemanalysen. Er kam zum Schluss, dass (*zur damaligen Zeit*) höchstens Gadolinium ein potentiell interessantes Material für solche Anwendungen sein könnte. Doch die Curie-Temperatur von Gadolinium liegt für gewisse Anwendungen zu tief. Deshalb machte er eine Energie-Analyse mit einem hypothetischen Material mit einer Curie-Temperatur von 400 °C.

Ein sorgfältiger „Review-Prozess“ zeigt, dass seit 1985 keine weiteren Entwicklungen publiziert worden sind. Einige Schwierigkeiten verhinderten den Durchbruch dieser Technologie; die wichtigsten sind:

- 1) Das Nichtvorhandensein von Materialien mit Curie-Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur
- 2) Der „Giant magnetocaloric effect“ wurde erst 1996 publiziert. Er führt approximativ zu einer Verdopplung der Leistungsfähigkeit der zuvor bekannten magnetokalorischen Materialien
- 3) Das Nichtvorhandensein von günstigen Permanentmagneten mit grösseren Feldstärken. Heute sind preiswerte Permanentmagnete auf dem asiatischen Markt erhältlich
- 4) Die Limitation der Untersuchungen auf rein theoretische Studien, da keine geeigneten Materialien verfügbar waren
- 5) Die hohen Preise, welche für Gadolinium verlangt werden.

Die neuste wissenschaftliche Arbeit, welche sich mit dieser Technologie beschäftigt, ist jene von Love *et al.* [11]. Diese Gruppe entwickelte eine Pumpe für ein Fluida, welches magnetokalorische Partikel - mit charakteristischen Durchmesser in der Nähe der Nano-Skalen-Grenze - enthält.

Rapide Fortschritte in den Materialtechnologien haben neue magnetokalorische Materialien (mit dem „Giant Magnetocaloric Effect“) hervorgebracht, welche auch Curie-Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur aufweisen. Dies führt zwangsläufig zu einer großen Attraktivität diese alten Ideen - mit einem Ursprung bei den drei bereits genannten berühmten Wissenschaftlern (vgl. [1], [2], [3]) - wieder aufleben zu lassen. Auch Fortschritte beim Magnet-Design lassen höhere magnetische Felder von Permanent-Magneten zu. Heute sind in speziellen Ausführungen, sogenannten Halbach-Arrays, magnetische Induktionen B von Permanentmagneten bis zu 6-7 Tesla erreichbar. Doch solche Anordnungen sind zu aufwändig und massiv um in praktisch realisierbaren Maschinen eine Anwendung zu finden. Praktisch realisierbare Induktionen werden 2-3 Tesla sein!

Ein Grossprojekt (nicht so diese erste Machbarkeitsstudie) über diese faszinierende Technologie sollte unbedingt multi-disziplinär behandelt werden, weil es Materialwissenschaftler, Spezialisten des Elektro-Magnetismus, der Thermodynamik, der Fluidodynamik, aber auch Systemingenieure dazu braucht. Die Technologie ist eine potentielle Alternative zur Photovoltaik oder Windenergienutzung. Sie kann auf Sonnenenergie, geothermischer Energie, oder Abwärme basiert werden. Wenn sie als Kombisystem für die elektrische und thermische Energiebereitstellung konzipiert wird, kann sie zu einer speziell rationellen Energieverwertung führen. Wenn ein Kraftwerk Abwärme produziert, lohnt es sich oft nicht ein thermisches Energietransportnetz zu bauen, wegen der Verluste. Eine Rückgewinnung von elektrischer Energie hat den Vorteil, dass das wesentlich effizientere elektrische Verteilnetz Verwendung finden kann. Eine ideale Verwendung von Wärme tiefer Exergie zusammen mit der Anwendung von Regenerationszyklen kann Wirkungsgrade bis zu 80 % des Carnot-Wirkungsgrades ergeben. Dies sind bessere Werte als jene von heute eingesetzten Systemen, welche mit ähnlichen Temperaturniveaus arbeiten.

Das Ziel der Studie ist interessante Anwendungen zu identifizieren und mit (numerischen) Berechnungen deren Rentabilität aufzuzeigen. Die erarbeiteten Resultate sollen dann helfen zu entscheiden, ob es Sinn macht eine Anwendung weiter zu untersuchen und ein Prototyp-System zu bauen.

Die erwarteten Ergebnisse werden in Kürze aufgelistet:

- 1) Review der Technologie „Magnetic Power Production“
- 2) Vorteile und Schwierigkeiten der Realisierung dieser Technologie
- 3) Liste und kurze Beschreibung der möglichen Anwendungen
- 4) Technische Charakterisierung der ausgewählten praktischen Anwendungen
- 5) Vorschlag je eines geeigneten Prototyp-Systems
- 6) Numerische Modellierung mit Vereinfachungen der Maschinen.
- 7) Numerische Berechnungen der Energierückgewinnung (thermisch → mechanisch → elektrisch)
- 8) Kostenabschätzungen der Geräte und Systeme
- 9) Kleine Marktanalyse für die verschiedenen Anlagen
- 10) Vorschlag für weiterführende Arbeiten.

Sollte es zu einem grösseren Folgeprojekt kommen, so würde ein in dieser Machbarkeitsstudie als sehr geeignetes System für die magnetische „Power Production“ identifiziertes System in grösserer Tiefe untersucht werden. Die Geräte und Gesamtanlage würden durch numerische Simulationen optimiert werden und es würde ein Prototyp gebaut werden. Eine solche Anlage sollte im Erfolgsfalle eventuell auch als Demonstrationsanlage für die neu umgesetzte Technologie für das Ausstellen an einer Messe geeignet sein.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Das Projekt ist erst vor anfangs Oktober diese Jahres begonnen worden. In einer ersten Phase wurden die Gebiete definiert für die die magnetische „Power Production“ überhaupt in Frage kommen könnte. Es sind dies die folgenden Anlagen:

- 1) Solare Kleinanlagen
- 2) Solare Großanlagen
- 3) Erdsonden- und Erdregister-Kleinsysteme
- 4) Größere geothermische Systeme
- 5) Verbrennungsmotoren im Verkehrswesen (Auto, Schiffe, Flugzeuge, usw.)
- 6) Verbrennungskraftwerke (Kohle, Gas, Oel)
- 7) Polygenerations-Kraftwerke
- 8) Nukleare Kraftwerke
- 9) Brennstoffzellen
- 10) Abwärme von chemischen exothermen Reaktionsprozessen
- 11) Abwärme von Kehrlichtverbrennungen
- 12) Abwärme in der Lebensmitteltechnik
- 13) Abwärme in der Prozesstechnik.

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 anfallenden Leistungsbereichsintervalle ermittelt und das untere und obere Temperaturniveau ausfindig gemacht. Diese drei Daten sind die wichtigsten Eckdaten für den Entwurf eines Prototypen.

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

1) Minergiehaus mit Solarkollektoren

Minergiehäuser mit Niedrigtemperatur-Solar-Kollektoren und Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung werden zusehends attraktiver und deren Anzahl ist in der Schweiz stark im Steigen begriffen (siehe Figur 1). Die Solarkollektoren bedienen die Warmwasser-Aufbereitung und eine Niedertemperatur-Fussbodenheizung mit Wärme. Schon in den Übergangszeiten, besonders aber in den Sommermonaten, fällt sehr viel thermische Energie an, welche nicht genutzt werden kann. Hier würde sich ein magnetischer „Power-Production-Generator“ betreiben lassen, der die anfallende Wärme nutzt um zusätzlich elektrische Energie zu „produzieren“.

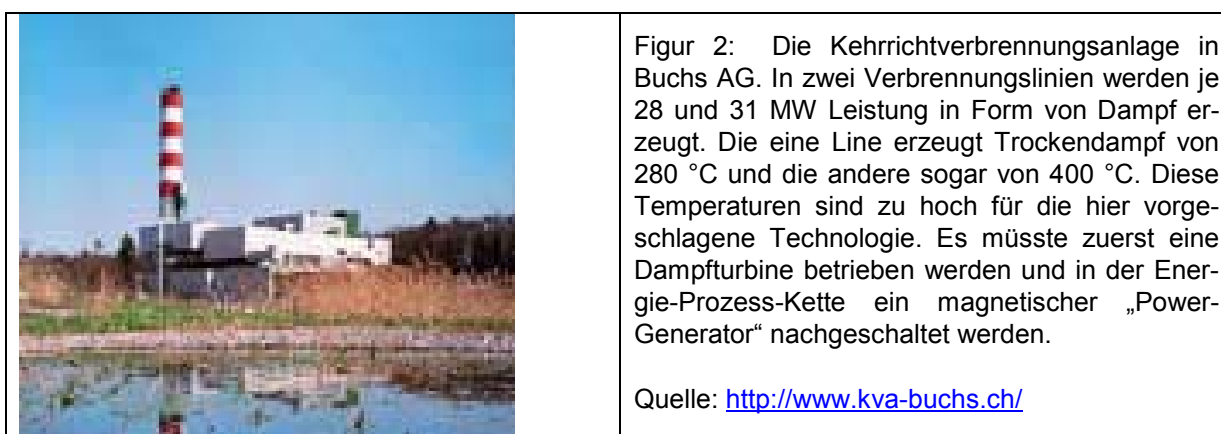


Physikalische Grösse	Numerische Grösse
Leistung	6 kW anfallende Wärme
Wärmequellen-Temperatur	65 °C – 75 °C
Wärmesenken-Temperatur	> 15 °C (hängt von der Anwendung ab)
Temperaturdifferenz	$5 \leq \Delta T \leq 60$ K (hängt von der Anwendung ab)

An der HEIG-VD haben die drei Autoren eine Diplomarbeit im laufen (Student: Thierry Mattenberger). In dieser Arbeit - welche auf numerischen System-Simulationen basiert - wird für eine solche Anlage abgeschätzt werden, wie viel elektrische Energie mit einem magnetischen Generator in einem Jahr produziert werden könnte. Dazu werden stündliche meteorologische Daten (solare Einstrahlung, Außentemperatur, usw.) als Randbedingungen für die Berechnungen verwendet.

2) Kehricht-Verbrennungs-Anlage

Orte, wo landauf und landab größere Mengen Abwärme anfallen, sind die Kehrichtverbrennungsanlagen (Figur 2). Üblicherweise werden mit der Abwärme Turbomaschine betrieben, welche bei etwa

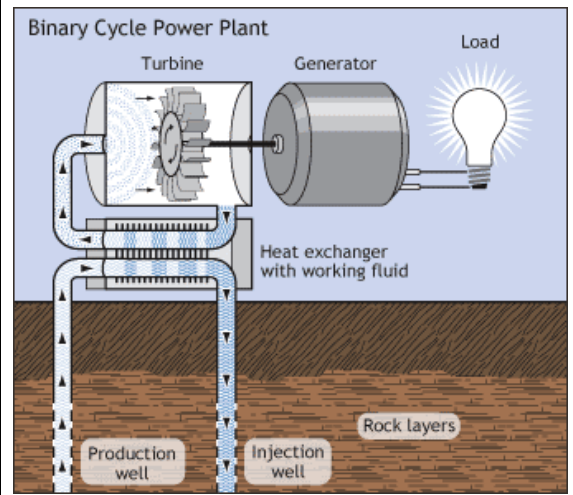


400 °C betrieben werden. Es soll untersucht werden, ob zum Beispiel das Nachschalten eines magnetischen Generators für eine solche größere Anlage von Bedeutung sein könnte.

Physikalische Grösse	Numerische Grösse
Leistung	4 MW (geschätzt)
Wärmequellen-Temperatur	60 °C (abhängig von der eingesetzten Turbine und dessen Kondensationstemperatur)
Wärmesenken-Temperatur	z. B. Umgebungstemperatur, z. B. -10°C bis 30°C
Temperaturdifferenz	30°C bis 70 °C

3) Geothermisches Kraftwerk

Es existieren drei Typen von geothermischen Kraftwerks-Technologien um hydrothermische Energie in Elektrizität umzuwandeln. Diese sind in der englischen Sprache die „Dry-Steam-, die Flash- und die Binary Cycle-Technology“. Es hängt von der Wärmequelle ab, welche Technologie die beste ist. Manchmal steht warmes oder heißes Wasser zur Verfügung, in anderen Fällen sogar Dampf.



Figur 3: Es ist eine konventionelle geothermische Kraftwerksanlage zu sehen. Eine magnetische würde analog funktionieren. Anstatt eines Turbinenrades würde ein magnetokalorisches Rad räumlich partiell durch ein Magnetfeld rotieren. Temperaturunterschiede im magnetokalorischen Rad würden azimuthale Richtungsableitungen der Magnetisierung erzeugen, welche ein Kraftfeld, respektive ein resultierendes Moment zur Folge hätten. Es könnte analog auch mit der magnetischen Anlage ein Generator betrieben werden.

Quelle: <http://www.eere.energy.gov>.

Physikalische Grösse	Numerische Grösse
Leistung	Einige MW
Wärmequellen-Temperatur	≥ 50 °C
Wärmesenken-Temperatur	z. B. Umgebungstemperatur, z. B. -10°C bis 30°C
Temperaturdifferenz	Hängt von Umgebungstemperatur und der Temperatur der Wärmequelle ab

Geothermische Gebiete haben meistens Quellen von mässiger Temperatur, das heißt solche unter 200 °C. In solchen Fällen wird gewöhnlicherweise die „Binary-Cycle-Technology“ angewendet (siehe Figur 3). Ein Sekundärfluida wird eingesetzt, welches eine tiefe Verdampfungstemperatur hat. Somit kann die Turbine mit Dampf betrieben werden. Magnetokalorische Anlagen könnten bei tieferen Temperaturen betrieben werden. In diesem Falle könnte die Untergrundinstallation weniger tief ausgeführt werden. Als Folge dessen könnten Kosten eingespart werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die Gruppe SIT (Simulation des Systèmes Thermique), welche vor fünf Jahren mit der Untersuchung von solchen magnetischen Systemen 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 Optimisierungs-Berechnungen von Magnet-Konfigurationen vorgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Die beiden erstgenannten Autoren dieses Berichts 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 magnetische „Power Production“ kann als inverser Prozess der magnetischen Heiz- und Kühltechnik angesehen werden und ist somit auch ein Thema dieser Konferenz.

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] N. Tesla, **Pyromagneto-electric generator**, US patent 428,057, May 18, 1890.
- [2] T.A. Edison, **Pyromagnetic generator**, US patent 476,983, June 14, 1892.
- [3] A. Einstein, **On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular kinetic theory of heat**, Annalen der Physik **17**, p. 549, 1906, and **19**, p. 371, 1911.
- [4] J.A. Hindle, **Pyromagnetic motor**, US patent 2,391,313, 1943.
- [5] P. Guilden, **Pyromagnetic motor**, GB patent 1,226,983, 1967.
- [6] E.L. Resler Jr, R.E. Rosensweig, **Magnetocaloric power**, AIAA Journal, Vol. 2, **8**, pp. 1418-1422, 1964.
- [7] E.L. Resler Jr, R.E. Rosensweig, **Regenerative thermomagnetic power**, Journal of Engineering for Power **89**, pp. 399-406, 1967.
- [8] R.E. Rosensweig, **Ferrohydrodynamics**, Cambridge University Press, 1985.
- [9] E. Van der Voort, **Ideal magnetocaloric conversion**, Appl. Sci. Res. **20**, pp. 98-114, 1969.
- [10] L.D. Kirol, J.I. Mills, **Thermomagnetic generator**, Proc., Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf., Vol/Issue: 3; Intersociety Energy Conversion Engineering Conference; 19 Aug 1984; San Francisco, CA, USA, pp. 1361-1368.
- [11] L.J. Love *et al.*, **A magnetocaloric pump for lab-on-a-chip technology**: Phase 1 Report, Oct.2003, ORNL/TM-2003/245, DOE document.
- [12] 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.