



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

Schlussbericht 29.07.2015

---

# **Industrietauglicher Prototyp eines thermo- magnetischen Motors (TMM) zur Stromer- zeugung**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Ko-Finanzierung:**

Swiss Blue Energy AG, CH-5330/Bad Zurzach

**Auftragnehmer:**

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Institut für Thermo- und Fluid-Engineering ITFE  
Klosterzelgstrasse 2  
CH-5210/Windisch  
[www.fhnw.ch](http://www.fhnw.ch)

**Autoren:**

Prof. Dr. K. C. Heiniger, Fachhochschule Nordwestschweiz, [kurt.heiniger@fhnw.ch](mailto:kurt.heiniger@fhnw.ch)  
Daniel Wymann, Fachhochschule Nordwestschweiz, [daniel.wymann@fhnw.ch](mailto:daniel.wymann@fhnw.ch)  
Raphael Brunner, Fachhochschule Nordwestschweiz, [raphael.brunner@fhnw.ch](mailto:raphael.brunner@fhnw.ch)

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Dr. Michael Moser
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Roland Brüniger
<b>BFE-Vertragsnummer:</b>	SI/500948-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Zusammenfassung

Trotz grossem Marktpotential, gibt es bisher noch keine kommerzielle Maschine, welche Niedertemperaturabfallwärme nach dem thermomagnetischen Prinzip in elektrische Energie umwandeln kann. Deshalb wurde in diesem Projekt – ausgehend von einer kleinen, bereits bestehenden Versuchsanlage der Swiss Blue Energy AG – der Bau eines industrietauglichen Prototyps mit einer Nennleistung von 1 kW bis 3 kW angestrebt. Dazu sind die bestehende Versuchsanlage analysiert und Konzepte für einen Prototyp mit grundsätzlich gleicher Technologie, d.h. noch ohne Wirkungsgradziel, erarbeitet worden. Eine zentrale Rolle spielte dabei der “thermische Schalter”, bestehend aus dem magnetokalorischen (“thermomagnetisch schaltenden”) Material und der Fähigkeit, das Material möglichst effizient erhitzen und kühlen zu können. Verglichen und evaluiert worden sind die verschiedenen Konzepte durch ein eigens erstelltes Berechnungsmodell zur Bestimmung von Leistung und Wirkungsgrad. Nach dem Abschluss der Konzeptphase wurde einerseits der Bau des Prototyps vorangetrieben und andererseits mit nationalen und internationalen Partnern ein optimal geeignetes thermomagnetisches Material gesucht. Dieses konnte während dem Projekt noch nicht eindeutig bestimmt werden, weshalb im Prototyp – analog zur Versuchsanlage – schliesslich wieder Gadolinium verbaut worden ist. Aufgrund laufender Optimierungen konnten zum Zeitpunkt des Projektabschlusses erst Tests mit einer halbbestückten Maschine gemacht werden (50% Segmente in Betrieb). Ein Betrieb und das Erzielen von Messresultaten ist damit bei verminderter Leistung möglich. Gegenüber der ersten Versuchsanlage (Demonstrator) zeigen die mit der teilbestückten Maschine erzielten Messresultate eine Leistungssteigerung um Faktor 1.75 pro Magnetspalt, was einer Gesamtleistung von 680 W (mit Teilbestückung) entspricht. Dafür musste zwar der Kaltwasservolumenstrom um 86% erhöht werden, der Warmwasservolumenstrom jedoch lediglich um 20%. Bei vollbestückter Anlage darf somit mit einer Gesamtleistung von 1.2 kW bis 1.4 kW gerechnet werden. Der isentrope Wirkungsgrad<sup>1</sup> konnte gegenüber dem Demonstrator um den Faktor 5 verbessert werden, obwohl die Verbesserung des Wirkungsgrades zu keinem Zeitpunkt dieses Projekts im Fokus stand. Das Mindestleistungsziel wird somit erreicht, womit ein erster grosser Schritt in die kommerzielle Nutzung der Abfallwärme getan sein wird.

Die laufenden Optimierungen und umfassenden Messreihen sollten bald abgeschlossen werden können, womit anschliessend die Erprobung der Industrietauglichkeit während 5'000 Betriebsstunden in einem Zementwerk in Angriff genommen werden kann.

---

<sup>1</sup> Der isentrope Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis zwischen der effektiven Leistung der Maschine und der Leistung einer reversibel betriebenen Maschine, d.h. dessen was gemäss des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik maximal möglich ist.

## Summary

Despite its market potential, there is hitherto no commercially available machine for thermo-magnetically converting low grade thermal “waste” energy into high grade electrical energy. Hence the motivation for this project which – based on a small, already existing, experimental facility built by Swiss Blue Energy AG – aims at developing and manufacturing an industrial scale prototype with a nominal output power in the range between 1 kW to 3 kW. In order to narrow down the task, the first prototype was determined to be based on the same technology as the existing experimental facility and, in addition, not yet given any specific thermal efficiency requirements. Consequently the existing machine was analysed and concepts for achieving a larger scale devised. Of crucial importance for optimal performance on a large scale is the “thermal switch” consisting of the magnetocaloric (“thermo-magnetically switching”) material and the ability to efficiently transfer heat in and out of that material. Evaluating the different concepts involved working out a mathematical model of the underlying physics for determining machine output power and thermal efficiency. After completing the conceptual phase a two-tier approach of designing and building the prototype in detail, and selecting the best possible thermo-magnetic material, was taken. Although promising materials exist, they are still under development and not yet available in the necessary quantity and quality. Therefore the prototype presently uses Gadolinium (Gd), i.e. just as in Swiss Blue Energy’s small scale machine. At the project’s end date only half of the final number of segments were available for operating the machine. This is mainly due to the typical learning curve and subsequent evolutionary adaptations occurring during the development of a prototype. When compared to Swiss Blue’s first experimental facility (demonstrator), the measurement results obtained with the partial segment assembly reveal a 75 % increase in power output per magnet gap, giving an overall (partial assembly) power output of 680 W. Although this required increasing the cold water volume flow by 86% the required hot water flow increased by only 20%. Compared to the demonstrator, the isentropic efficiency<sup>2</sup> was increased by a factor of 5, despite the project having no specific efficiency targets. Extrapolating the measurements to the full number of segments shows that a power output of 1.2 kW to 1.4 kW will be reached, consequently fulfilling the power output target and concluding a first major step in the commercial use of thermal “waste” energy by thermo-magnetic means.

Once the presently running optimisations and in depth characterisation measurements have been completed, the prototype will be ready for testing and judging of its industrial ability during 5’000 hours of operation in a cement plant.

---

<sup>2</sup> The isentropic efficiency is defined as the ratio between the machine’s power output and the power output of a reversibly operated machine (i.e. the maximum possible output as limited by the second law of thermodynamics).

## Résumé

En dépit d'un important marché potentiel, il n'existe pour l'instant aucune machine commercialisable qui puisse convertir en énergie électrique la chaleur résiduelle à basse température selon le principe thermomagnétique. C'est pourquoi, dans le prolongement d'une petite station d'essai de Swiss Blue Energy AG actuellement en fonction, on ambitionne dans le présent projet de construire un prototype industrialisable d'une puissance nominale de 1 à 3 kW. Dans ce but, on a analysé la station d'essai actuelle et développé des concepts pour un prototype basé sur la même technologie, sans viser un degré d'efficacité pour l'instant. L'"appareil de réglage thermique", avec sa constitution en matériaux magnétocaloriques (à transitions thermomagnétiques) et sa capacité à chauffer et refroidir le matériau le plus efficacement possible, a joué ici un rôle central. Les différents concepts ont été comparés et évalués à travers un modèle de calcul spécifiquement élaboré pour déterminer la puissance et le degré d'efficacité. A l'issue de la phase de conception, on a d'une part poursuivi la construction du prototype, et d'autre part, on a recherché avec des partenaires nationaux et internationaux un matériau thermomagnétique optimal. Celui-ci n'a pas pu être déterminé au cours du projet, c'est la raison pour laquelle on a finalement à nouveau utilisé du gadolinium dans le prototype, comme dans la station d'essai. Du fait des optimisations en cours, les tests qui ont été réalisés au moment de la clôture du projet n'ont pu être faits qu'avec une machine à demi équipée (50% des segments en fonctionnement). Il est possible d'obtenir un fonctionnement et des résultats de mesure avec une machine partiellement équipée et à puissance réduite. En comparaison de la première station d'essai (le démonstrateur), les résultats de mesure obtenus avec un équipement partiel montrent une augmentation de puissance de 75% par fente magnétique, ce qui correspond à une puissance totale de 680W (sous équipement partiel). Pour cela, il a certes fallu augmenter le flux de volume d'eau froide de 86%, mais celui d'eau chaude de seulement 20%. En comparaison du démonstrateur, et bien que cette amélioration n'ait jamais été visée au cours de ce projet, le degré d'efficacité isentropique <sup>3</sup> a pu être amélioré d'un facteur 5. Avec une installation entièrement équipée, on peut tableer sur une puissance totale de 1,2 à 1,4 kW. Il en résulte que l'objectif de puissance minimum sera atteint, ce qui permettra un grand pas dans l'utilisation commerciale de la chaleur résiduelle.

Dès que les optimisations en cours et les vastes séries de mesure seront achevées, on pourra lancer l'expérimentation appliquée à l'industrie durant 5000 heures de service dans une cimenterie.

---

<sup>3</sup> Le degré d'efficacité isentropique est défini comme le rapport entre la puissance fournie par la machine en réalité, et la puissance théorique indiquée par la deuxième loi de la thermodynamique fournie par une machine opérée de façon réversible.

# Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage .....	1
2	Ziel der Arbeit .....	1
3	Vorgehen / Methode .....	1
3.1	Konzeptphase .....	1
3.1.1	Thermischer Schalter .....	1
3.1.2	Magnetokalorisches Material .....	2
3.1.3	Berechnungsmodell .....	2
3.1.4	Hydrodynamik .....	2
3.1.5	Numerische Simulationen & experimentelle Validierung der Wärmeübertragung .....	3
3.1.6	Gesamtkonzept TMM Prototyp .....	3
3.2	Auslegung TMM- Prototyp .....	3
3.3	Konstruktion und Bau des Prototyps .....	3
3.3.1	Magnetokalorisches Material .....	4
3.3.2	Thermischer Schalter .....	4
3.3.3	Berechnungsmodell .....	5
3.3.4	Aufbau Rotor .....	5
3.3.5	Vorbereitung des Prüfstands für den Dauertest .....	5
3.4	Inbetriebnahme .....	7
3.5	Messreihe .....	8
3.6	Industrienaher Dauertest .....	8
4	Erkenntnisse .....	9
5	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	9

# 1 Ausgangslage

Einen kommerziellen thermomagnetischen Motor, welcher im Stande ist, Energie aus Niedertemperaturabfallwärme zu gewinnen, gibt es gemäss einer im Jahr 2012 erstellten Studie [1] nicht. Dies, obwohl in einer neuen BfE-Studie [2] ein ausreichend grosses Marktpotenzial – selbst nur für Kaltwassertemperaturen  $< 15\text{ °C}$  – für die Schweiz und Deutschland erkannt wurde, welches die Weiterverfolgung der Technologie rechtfertigt.

Ein vor dem Projektbeginn bestehender "Demonstrator" der Swiss Blue Energy AG zeigt, dass das bereits im Jahre 1889 von Nikola Tesla in einem Patent [3] beschriebene Prinzip eines thermomagnetischen Motors auch praktisch umgesetzt werden kann.

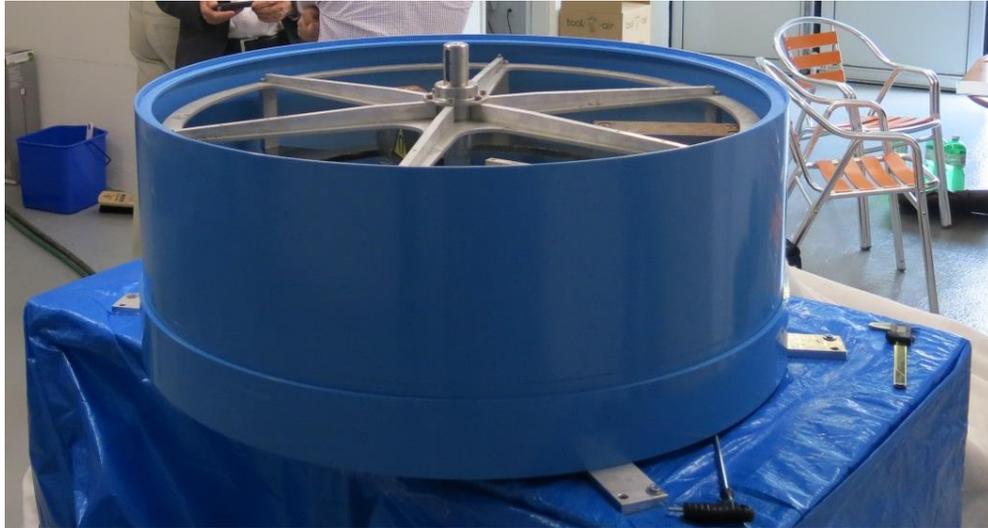


Abbildung 1: Demonstrator der Swiss Blue Energy AG

## 2 Ziel der Arbeit

Ziel dieses Projektes ist es, einen Prototyp eines thermomagnetischen Motors für eine industrielle Umgebung zur Verfügung zu haben, der es erlaubt, aufzuzeigen, dass mithilfe dieser Technologie elektrische Energie aus "wertloser" industrieller Abwärme ( $< 100\text{ °C}$ ) gewonnen werden kann. Der Prototyp mit einer geplanten Leistung im Bereich von ca. 1 kW bis 3 kW soll mindestens 5'000 h im Dauerbetrieb laufen. Dabei soll die mögliche Stromproduktion aufgezeichnet werden. Für diesen ersten Prototyp im Bereich von wenigen Kilowatt ist der Wirkungsgrad explizit noch keine Zielvoraussetzung, da die Anforderungen an Leistung sowie Dauerfestigkeit und der Wissensgewinn im Vordergrund stehen.

## 3 Vorgehen / Methode

Das Projekt wurde in *vier Phasen* aufgeteilt. Diese sind i) die Konzeptphase, ii) Konstruktion und Bau des Prototyps, iii) die umfassende Messreihe und iv) der Dauertest.

### 3.1 Konzeptphase

Während der Konzeptphase wurde der bestehende Demonstrator der Swiss Blue Energy AG analysiert und daraus Konzepte für den geplanten Prototyp abgeleitet. Dabei galt das Hauptaugenmerk den nachfolgenden *Problemstellungen*:

#### 3.1.1 Thermischer Schalter

Ein zentrales Element eines thermomagnetischen Motors ist der sogenannte thermische Schalter. Damit ist gemeint, unter welchen Betriebsbedingungen und vor allem, wie schnell das magnetokalori-

sche<sup>4</sup> Material vom ferromagnetischen in den paramagnetischen Zustand und wieder zurück geschaltet werden kann. Die Stoffeigenschaften des magnetokalorischen Materials, die Erwärmungs- und Abkühlungsphase, sowie die Betriebsdynamik der Kraftmaschine spielen dabei die zentrale Rolle, da die Temperaturrandbedingungen (warm-kalt-Niveau) möglichst passend auf den thermo-magnetischen Schaltbereich abgestimmt werden müssen.

Zur Untersuchung dieses thermischen Schalters wurde ein *Prüfstand für transiente Messungen* entwickelt und gebaut, welcher im Labor der Fachhochschule Nordwestschweiz betrieben wird.

### 3.1.2 Magnetokalorisches Material

Im Rahmen der Konzeptphase zeigte sich, dass das bisher verwendete Material (Gadolinium) einen Schaltbereich<sup>5</sup> aufweist, bei welchem die zu- und abgeführte Wärme bei den vorliegenden Randbedingungen (Warm-Kaltwassertemperaturen) nicht optimal ausgenutzt werden kann. Deshalb wurde der Entschluss gefasst, bereits für den Bau des Prototyps nach einem besser geeigneten Material zu suchen. Die daraus entstandenen Fragestellungen waren zu Beginn nicht Teil dieses Projekts.

Die Suche nach geeigneten Materialien führte zu zwei deutschen Herstellern von magnetokalorischen Materialien (BASF, VAC). Da diese Materialien zum Zeitpunkt der Kontaktaufnahme (Anfang 2014) praktisch nur in Pulverform zur Verfügung standen<sup>6</sup>, musste für den geplanten Prototyp vorerst ein geeignetes Herstellungs-bzw. Verarbeitungsverfahren erarbeitet werden, mit welchem das Material in eine für die erarbeiteten Konzepte brauchbare Form gebracht werden kann. Dabei muss das Herstellungsverfahren ein Material hervorbringen, welches vielfältigen Anforderungen wie beispielsweise thermische / magnetische Stoffeigenschaften, Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Widerstand gegen biologische Einflüsse (z.B. Widerstand gegen Biofilmbildung) genügt.

Zur Unterstützung in Verarbeitungs- und Materialfragen wurden deshalb zwei Spezialisten der Fachhochschule Nordwestschweiz beigezogen. Prof. Dr. A. Wahlen vom Institut für Produkt- und Produktionsengineering unterstützte das Projekt in Werkstoff- und Werkstoffprüfungs- Fragestellungen, während Prof. Dr. E. Kramer vom Institut für Kunststofftechnik Hilfe im Hinblick auf Herstellung und Verarbeitung des gewünschten Materials leistete. Zusammen mit diesen Werkstoffspezialisten konnte ein mögliches neues Herstell- und Verarbeitungsverfahren definiert werden. Aus diesem Grund wurde zum Abschluss dieser Projektphase damit gerechnet, dass die Materialproblematik parallel zur Konstruktion des Prototyps gelöst werden könnte. Deshalb wurde die Geometrie des gewünschten magnetokalorischen Materials so ausgelegt, dass Erwärmung und Abkühlung, sowie gewünschte Kraftwirkung möglichst optimal sind.

### 3.1.3 Berechnungsmodell

Zur Erarbeitung der Konzepte wurde ein erstes Berechnungsmodell erstellt, welches die Zusammenhänge von Geometrie, Hydrodynamik, Wärmeübertragung, zusammen mit den Stoffeigenschaften des magnetokalorischen Materials und die daraus resultierenden Prozessparameter bis hin zur erzeugten mechanischen Leistung beschreibt. Dieses Berechnungsmodell wurde in einer ersten Phase mit Mess-Ergebnissen vom Demonstrator validiert. Das Modell diente als Grundlage für die Auslegung des Prototyps und wurde später weiterentwickelt und zur Optimierung herangezogen. Neben Messungen am Demonstrator konnten auch Ergebnisse aus dem Prüfstand zum thermischen Schalter zur experimentellen Validierung herangezogen werden. Weitere Verbesserungsschritte werden aus künftigen Messungen am Prototyp erwartet.

### 3.1.4 Hydrodynamik

Die Hydrodynamik der angestrebten magnetokalorischen Kraftmaschine ist ein weiteres zentrales Element. Dadurch wird die Einbringung und Abführung der Wärme sichergestellt, was die thermische Schaltung des magnetokalorischen Materials und der damit verbundenen magnetischen Eigenschaf-

---

<sup>4</sup> „Thermomagnetisch schaltend“ wäre eigentlich der bessere Begriff als magnetokalorisch, denn der kalorische Anteil des Schalt-Effekts ist aus Sicht eines „thermomagnetischen Motors“ unerwünscht. Da in der Literatur idR. trotzdem der Begriff magnetokalorisch verwendet wird, wird dies auch in diesem Bericht beibehalten (siehe u.a. Kapitel 8.6 in [4]).

<sup>5</sup> Gd-Curie-Temperatur: 19.3 °C

<sup>6</sup> Vacuumschmelze GmbH (VAC) bot schon gesinterte Formen an; allerdings waren diese noch extrem spröde und zerbrechlich.

ten ermöglicht. Die starke Kopplung der Hydrodynamik mit der Güte des thermischen Schalters und mit der Betriebsdynamik der Anlage wurde während der Konzeptphase deutlich. Darauf aufbauend konnten erste örtliche und zeitliche Definitionen zur Hydrodynamik des Prototyps bestimmt werden.

### **3.1.5 Numerische Simulationen & experimentelle Validierung der Wärmeübertragung**

Bereits in der ersten Projektphase wurden numerische transiente Conjugate Heat Transfer (CHT) Simulationen<sup>7</sup> erstellt und zu deren Validierung als auch zum Erstellen und Abgleichen von empirischen Korrelationen ein Prüfstand zur experimentellen Bestimmung der transienten Wärmeübergänge aufgebaut. Diese dienten zur Verbesserung der Modellierung im Berechnungsmodell (Kapitel 3.1.3), zum besseren qualitativen und quantitativen Verständnis und zur Optimierung der Geometrie im Hinblick auf die Wärmeübertragung. Ferner sind gegen Ende des Projekts noch weitere transiente Temperaturmessungen am Prototyp selber durchgeführt worden, welche weitere Rückschlüsse auf die Vorgänge in der echten Maschine geben.

Der Aufwand für komplexe transiente numerische CHT-Simulationen ist erheblich und nur dank dem an der Fachhochschule Nordwestschweiz vorhandenen Rechencluster und Expertenwissen realisierbar.

### **3.1.6 Gesamtkonzept TMM Prototyp**

Die einzelnen Konzepte konnten zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt werden. Das erarbeitete Gesamtkonzept sieht grundsätzlich einen *modularen Aufbau* der Anlage vor, so dass genügend Spielraum für Anpassungen und Optimierungen in den nachfolgenden Phasen ermöglicht wurde. Der modulare Aufbau soll auch umfassende Untersuchungen im Laborumfeld zulassen, wobei die daraus resultierenden Anpassungen am Prototyp noch vor dem Dauerbetrieb im industriellen Umfeld gemacht werden können. Weiter wurde eine Anlagensteuerung mit umfassender Instrumentierung vorgesehen, mit welcher die Anlage wahlweise direkt am Prüfstand oder mittels Remote-Betrieb bedient und vor allem überwacht werden kann. Dies im Hinblick auf den geplanten Dauertest in einer Industrieanlage, bei welcher der Eingriff in die Anlagensteuerung nicht immer direkt vor Ort möglich sein wird.

## **3.2 Auslegung TMM- Prototyp**

Gemäss den in Abschnitt 2 definierten Zielen wurde anhand der Erkenntnisse aus Demonstrator und Berechnungsmodell die definitive Auslegung des TMM Prototyps gemacht.

Der Fokus wird "nur" auf ein Leistungsziel gelegt. Die angestrebte Leistung bei den Randbedingungen Warmwasser mit 60°C und Kaltwasser mit 12°C beträgt 1kW. Damit muss eine Skalierung der Demonstrator Technologie um den Faktor 13 gemacht werden, was bereits beträchtlich ist. Es wurde bewusst die untere Leistungsgrenze gemäss den Zielen angestrebt, da gleichzeitig eine Dauerbetriebsfestigkeit (>5000h) realisiert werden muss. Bei Technologie-Entwicklungen dieser Art entsteht rasch ein starker Zielkonflikt zwischen Leistungsvorgaben und Dauerfestigkeiten.

## **3.3 Konstruktion und Bau des Prototyps**

Nach Abschluss der Konzeptphase resultierte eine erste Idee für den Prototyp. Auf dieser Grundlage wurde ein kompletter Prüfstand, bestehend aus der eigentlichen magnetokalorischen Maschine und der Belastungseinrichtung (Dynamometer) als CAD-Modell konstruiert und gefertigt. Vor allem für den thermischen Schalter konnte zu Beginn auf nur wenig Erfahrung zurückgegriffen werden, weshalb dieser parallel zum Bau iterativ und mit vielen Tests entwickelt worden ist. Dieser Lernprozess war nur aufgrund der maschinellen Ausstattung und Möglichkeiten der FHNW-eigenen Werkstatt sowie dem an der FHNW vorhandenen fertigungstechnischen Wissen möglich.

---

<sup>7</sup> CHT: Conjugate Heat Transfer (gekoppelte Strömungs- und Wärmeübergangssimulationen)



Abbildung 2: Prüfstands Aufbau mit TMM (links) und Belastungseinheit (rechts)

### 3.3.1 Magnetokalorisches Material

Nach dem Abschluss der Konzeptphase wurde als machbar eingestuft, dass für dieses Projekt ein neuartiger Fertigungsprozess für ein passendes magnetokalorisches Material erarbeitet werden könnte. Dies hat sich jedoch als deutlich zeitintensiver und komplexer herausgestellt als von allen Beteiligten erwartet, weshalb im Verlauf der Prototyp-Konstruktion darauf verzichtet werden musste. Als Alternative musste deshalb wieder auf Gadolinium zurückgegriffen werden. Dieses Material wurde bereits im Demonstrator eingesetzt, wo erste Erfahrungen gesammelt werden konnten. Leider kann dieses Material die zu- und abgeführte Energie nicht optimal nutzen und weist zudem sehr kritische Korrosionseigenschaften auf. Da jedoch in der zur Verfügung stehenden Zeit kein anders Material die zwingenden Eigenschaften erfüllen konnte, wurde die nochmalige Verwendung von Gadolinium unumgänglich. In Zusammenarbeit mit internationalen Lieferanten und nationalen Fertigungsspezialisten wurde es schliesslich möglich, Gadolinium in geeigneter Form für den Prototyp bereit zu stellen. Allerdings waren der Fertigungsaufwand und die damit verbundenen Kosten bisher ausserordentlich hoch. Aus Sicht der aktuellen Entwicklungen im Bereich der Formgebung magnetokalorischer Pulver (BASF & VAC)<sup>8</sup> sowie erstmalig auch gezielter Forschung<sup>9</sup> an optimierten Materialien, welche Wärme bei hohem Wirkungsgrad thermomagnetisch in mechanisch / elektrische Energie umwandeln können, ist zu erwarten, dass deutlich bessere Materialien auf den Markt kommen werden. Dies wiederum dürfte das Kosten / Nutzenverhältnis und das Einsatzgebiet des TMM deutlich verbessern.

### 3.3.2 Thermischer Schalter

Wie bereits in der Konzeptphase ersichtlich wurde, ist die Gestaltung des thermischen Schalters ein sehr wesentliches Element. Nach der Wahl von Gadolinium als magnetokalorisches Material konnte der Schalter in einem iterativen Prozess konstruiert und optimiert werden. Dazu gehören sowohl die Aufnahme des magnetokalorischen Materials als auch die Wassereindüsungen. Im Rahmen zweier Semesterarbeiten und einer Bachelor-Thesis wurden umfassende Untersuchungen am neu errichteten Prüfstand durchgeführt und die Messergebnisse gemäss Kapitel 3.1.5 mit Prozessrechnungen sowie transienten CHT-Strömungssimulationen<sup>7</sup> verglichen. Die Resultate dieser Untersuchungen flossen einerseits in die konstruktive Auslegung des thermischen Schalters, andererseits in die Verbesserung der Berechnungsmodelle ein. Trotz aller Bemühungen waren zeitliche Verzögerungen unumgänglich, da sowohl die Erarbeitung des finalen Designs als auch die aufwändige Fertigung deutlich mehr Zeit als geplant in Anspruch nahmen.

Aufgrund der konstruktiven Auslegungen ist es beim vorliegenden Prototyp noch nicht möglich, die beiden zugeführten Medien (Warm,- und Kaltwasser) komplett zu trennen. Aus diesem Grund treten Mischverluste auf. Bei der Verfügbarkeit von anderen magnetokalorischen Materialien muss später

<sup>8</sup> Bei einem Besuch bei BASF und Vacuumschmelze (VAC) im Juni 2015 wurden den Autoren neuartige Formgebungsverfahren für magnetokalorische Materialien vorgestellt (Pulververbindungen mit hauchdünner Epoxidschicht). Ferner hat die VAC Fortschritte im Bereich „elastischerer“ Sinterverbindungen gemacht.

<sup>9</sup> Prof. Dr. Ekkes Brück (Uni Delft) – STW Open Technology Programme grant: "Novel magneto-caloric materials for efficient waste heat conversion in thermomagnetic generators".

das Design des Schalters für einen Betrieb ohne Mischverluste modifiziert werden.

### 3.3.3 Berechnungsmodell

Um die Aussagekraft des Berechnungsmodells zu verbessern, wurden verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen Herangehensweisen ausgearbeitet. Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem die verwendeten Stoffeigenschaften und Korrelationen für den Wärmeübergang die Ergebnisse sehr stark beeinflussen. Bereits während dem Aufbau des TMM-Prototyps konnten kleinere Messserien durchgeführt werden. Diese dienten, zusammen mit den Prüfstands-Ergebnissen für den thermischen Schalter und denjenigen des Demonstrators, der Validierung und permanenten Weiterentwicklung des Berechnungsmodells.

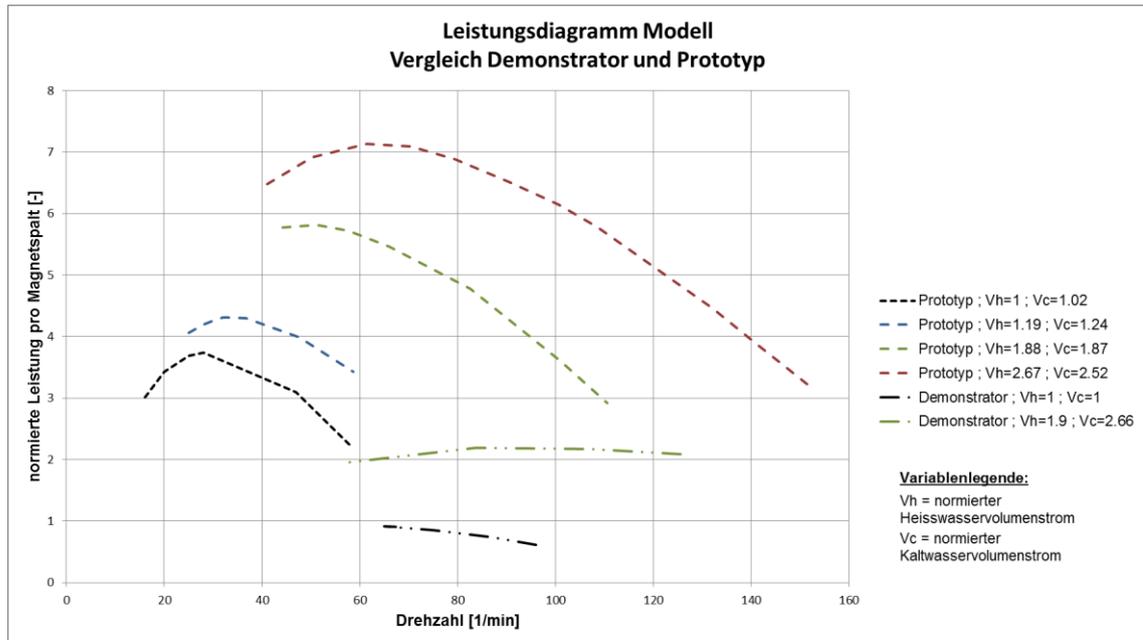


Abbildung 3: Leistungskurven TMM (Berechnung), normierte<sup>10</sup> Leistung pro Magnetspalt Vergleich Prototyp und Demonstrator

Die Resultate des Berechnungsmodells prognostizieren für den Prototyp eine rund drei Mal höhere Leistung pro Magnetspalt als beim Demonstrator, was einen sehr grossen Entwicklungsschritt darstellen würde.

Im Kapitel 3.5 werden die Berechnungen durch Messdaten (Demonstrator und Prototyp) validiert. Dabei zeigt sich, dass das Berechnungsmodell einige signifikante Effekte abbildet, jedoch noch weiter verbessert werden muss. Mit den gewonnenen Messdaten sind weitere Rückschlüsse möglich. Die stetige Verbesserung der physikalischen „Korrektheit“ des Modells soll es schlussendlich ermöglichen eine Grundauslegung für weitere Skalierungen von Anlagen vornehmen zu können.

### 3.3.4 Aufbau Rotor

Der Aufbau des Rotors mit der Aufnahme des magnetokalorischen Materials für den thermischen Schalter gestaltete sich deutlich aufwändiger als geplant. Vor allem die radialen und axialen Kraftwirkungen der Permanentmagnete auf das magnetokalorische Material erwiesen sich als deutlich stärker als erwartet, weshalb die Konstruktion des Rotoraufbaus bezüglich der Materialfestigkeit und Steifigkeit überarbeitet werden musste. Primär umfasste dies die Auswahl und Evaluation eines geeigneten Werkstoffes zur Aufnahme des magnetokalorischen Materials kombiniert mit dem Auffinden fertigungstechnischer Lösungen zur rationellen Bearbeitung dieses Werkstoffes zur endgültigen Form.

### 3.3.5 Vorbereitung des Prüfstands für den Dauertest

Um die Industrietauglichkeit des Prototyps zu belegen, konnte mit der Firma Holcim ein Projektpartner gewonnen werden, welcher die geforderten Rahmenbedingungen (vor allem die Versorgung mit aus-

<sup>10</sup> Als Referenz für alle Normierungen wurden die Messdaten des Demonstrators bei tiefen Volumenstrom und einer Drehzahl von  $\approx 68 \text{ min}^{-1}$  verwendet.

reichend Warm- und Kaltwasser) erfüllen kann. Um den Produktionsprozess bei Holcim mit dem Hin- und Her einer Aufbauphase nicht zu tangieren, wurde beschlossen, den Prototyp in einem Standard-Container unterzubringen, in diesem aufzubauen, zu testen und nachher fixfertig an der Holcim-Anlage aufzustellen. Die nötigen Prozessmedien werden mittels Anschlüssen an der Containerwand zu- bzw. abgeführt, während der komplette Prüfstand im Innern des Containers betrieben werden kann. Dieses System, vergleichbar mit einer Plug-and-Play-Lösung, ist auch für zukünftige Anlagen denkbar.



**Abbildung 4: Container und Prototyp für den Dauerbetrieb**

Bedingt durch den Industrieprozess bei Holcim, weist das Wärmeträger- Fluid für den Betrieb des Prototyps kritische Eigenschaften auf. Diese sind i) ein schwankender pH-Wert im sauren Bereich sowie ii) ein nicht unbedeutender Feststoffanteil. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die Wärme mittels eines *Wärmetauschers* vor der Einspeisung in den TMM auf sauberes Wasser übertragen, womit auch ein Korrosionsschutz<sup>11</sup> möglich wird. Um die angestrebte "Plug-and-Play"-Lösung zu erreichen, ist der Wärmetauscher ebenfalls in den Container verlegt worden, was in der Systemskizze (Abbildung 5) zu erkennen ist.

<sup>11</sup> Opferanode, korrosionshemmende Zusätze etc.

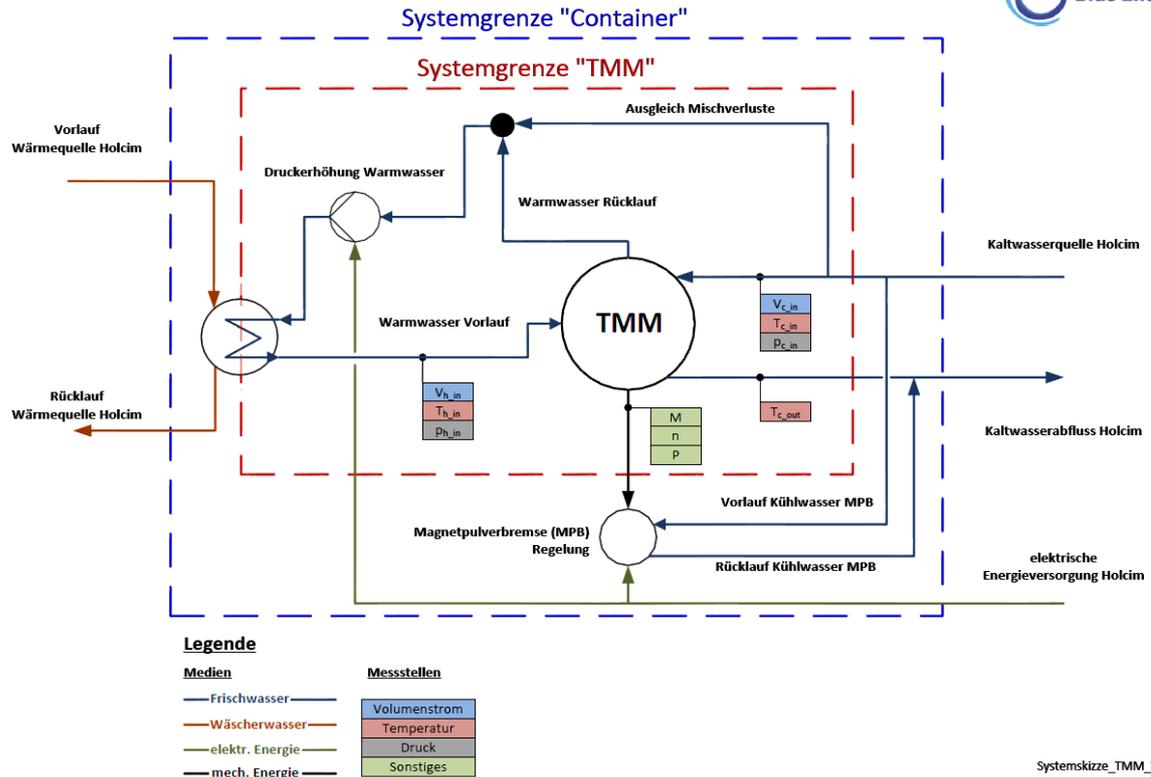


Abbildung 5: Systemskizze des TMM-Containers sowie der effektiv analysierten Systemgrenze

### 3.4 Inbetriebnahme

Durch die flexible Konstruktion des Prüfstands gelang es schon in sehr frühen Phasen den Prototyp mit einem teilbestückten Rotor in Betrieb zu nehmen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen wiederum direkt in Konstruktionsverbesserungen und den laufenden Fertigungsprozess ein, was sich als sehr wertvoll erwies und Zeitverluste signifikant reduzierte.<sup>12</sup>

Nach vielen weiteren Optimierungen, hauptsächlich am Rotor, gelang es einen Rotorring<sup>13</sup> bis zum jetzigen Zeitpunkt vollständig aufzubauen. Damit konnten erste Messungen durchgeführt werden. Positiv aufgefallen ist bei allen Versuchen, dass ein enorm schnelles An- und Abfahren der Anlage möglich ist. Eine *Inbetriebnahme ab Stillstand* kann *innert wenigen Sekunden* realisiert werden

<sup>12</sup> Diese Versuche führten unter anderem zu der im Kapitel 3.3.4 erwähnten Überarbeitung des Rotors

<sup>13</sup> Dies entspricht einer Bestückung von 50% der Gesamtanlage

### 3.5 Messreihe

Während der ersten Messreihe mit einem Rotorring wurden Volumenstromvariationen durchgeführt und daraus die Leistungskennlinien erstellt. Die maximal gemessene Leistung beträgt dabei 680 Watt bei den Temperaturniveaus  $T_c = 14^\circ\text{C}$  und  $T_h = 53^\circ\text{C}$ . Um die gewonnenen Daten sinnvoll darstellen zu können, sind sowohl die beiden Volumenströme als auch die Leistung auf einen repräsentativen Betriebspunkt des Demonstrators normiert worden.

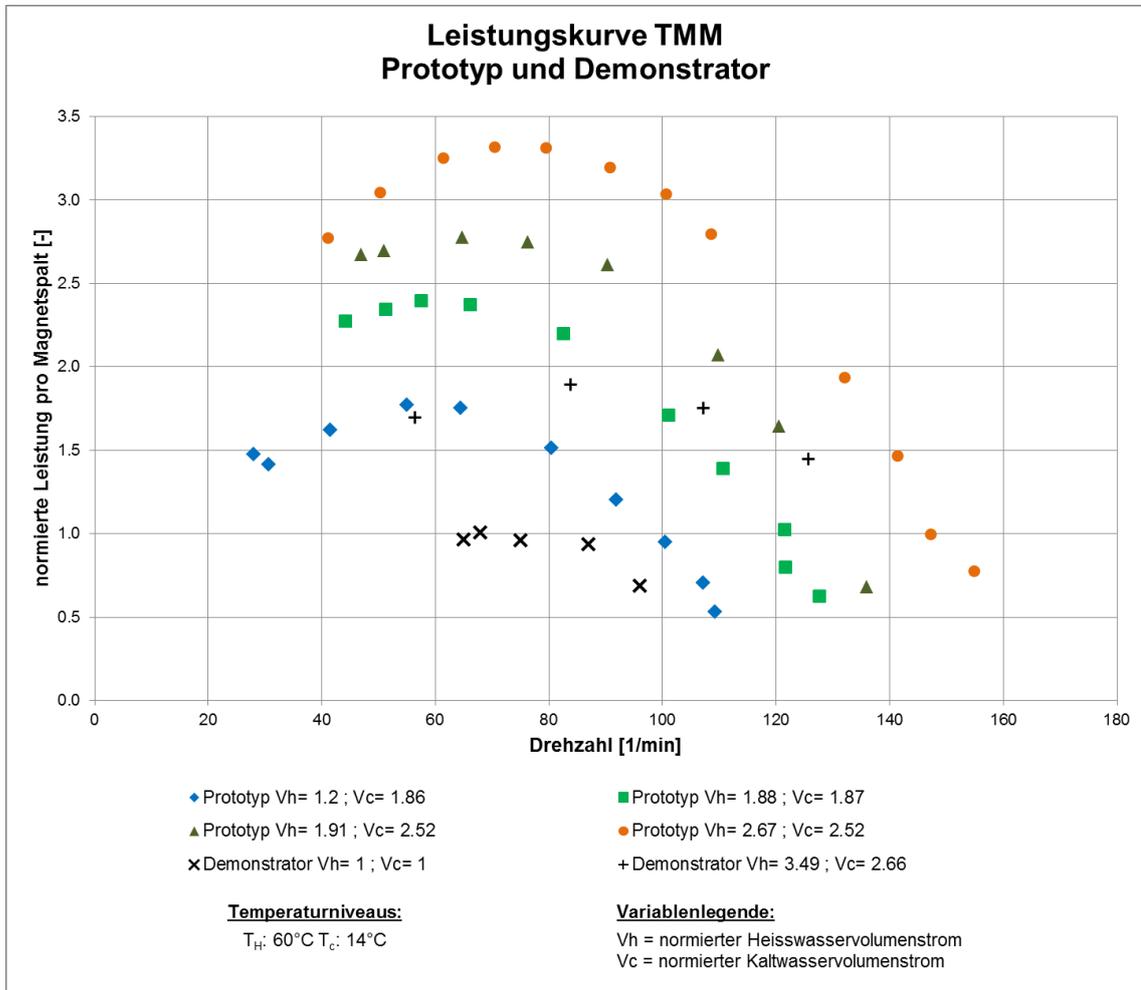


Abbildung 6: Leistungskurven TMM (Prototyp und Demonstrator), Leistung pro Magnetspalt<sup>10</sup>

Es wird deutlich, dass mit dem Prototyp gegenüber dem Demonstrator eine deutliche Leistungssteigerung pro Magnetspalt erreicht werden konnte. Wichtigstes Vergleichsmerkmal sind die dazu benötigten Volumenströme des Wärme- und Kühlmediums. Eine Leistungssteigerung um den Faktor 1.75 wurde möglich bei 1.2-fachem Warmwasser und 1.86-fachem Kaltwasser-Verbrauch. Der isentrope Wirkungsgrad konnte gegenüber dem Demonstrator um den Faktor 5 verbessert werden ohne konkrete Optimierung dazu.

Während dem Projekt hat sich bei genauer Untersuchung des thermomagnetischen Motorprozess gezeigt, dass die Definition des Wirkungsgrades nicht trivial ist. Im Projektteam, mit Unterstützung von weiteren Fachkräften, werden aktuell sinnvolle Definitionen entwickelt. Aufgrund dieser Komplexität, sowie der damals expliziten Ausklammerung des Wirkungsgrades im Projektvertrag, wird die Analyse des Wirkungsgrades in diesem Bericht nicht weiter diskutiert.

### 3.6 Industrienaher Dauertest

Aufgrund der aufgetretenen Projektverzögerungen konnten bisher lediglich Messdaten in der Infrastrukturumgebung der FHNW aufgenommen werden, wobei erst einer von zwei Rotorringen in Betrieb ist. Die Daten dürfen jedoch entsprechend skaliert werden. Der industrienaher Dauertest wird nach der

vollständigen Fertigstellung des Prototyps in Angriff genommen. Wie im Kapitel "Vorbereitung des Prüfstands für den Dauertest" beschrieben, wurde die Implementierung des Prüfstands in die Produktionsumgebung der Firma Holcim bereits vorbereitet. Auch wurden seitens Holcim alle Leitungen und Anschlüsse zur Versorgung des Containers vorbereitet. Dem Dauertest steht nach dem Abschluss aller Montage- und Inbetriebsetzungsarbeiten, sowie umfassenden Messungen und Analysen in Labormgebung, nichts mehr im Weg.

## 4 Erkenntnisse

In den verschiedenen Phasen hat sich gezeigt, dass die komplette Entwicklung eines Prototyps mit einem *Skalierungsfaktor von ca. 13* gegenüber dem zur Verfügung stehenden Demonstrator herausfordernd und aufwändig ist. Zur Lösung der zahlreichen Schwierigkeiten und Herausforderungen fand ein reger Austausch mit nationalen und internationalen Experten statt, was zu einem enormen Zuwachs an Wissen führte. Dies, zusammen mit vielen Experimenten, Entwicklungsschritten und Optimierungssiterationen hat schlussendlich zum vorliegenden Resultat geführt. Die ersten Messreihen (mit halber Rotorbestückung) zeigen, dass das Leistungsziel erreicht wird und dass sich die getätigten Entwicklungsarbeiten auszahlen. Um das Potential weiter auszuschöpfen ist eine gezielte Weiterentwicklung anzustreben.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ist die finale Fertigung des Rotors (zweiter Ring) noch in vollem Gange. Diese sollte rund einen Monat nach Projektabschluss abgeschlossen sein, wodurch erste Messungen und Analysen der Gesamtanlage unter Belastung möglich werden. Parallel werden diverse Komponenten weiterentwickelt und optimiert. Nach allen detaillierten Messkampagnen vor Ort wird die Anlage in das Holcim Werk transportiert, wo der Dauertestlauf stattfindet.

Abschliessend ist noch zu erwähnen, dass der bisher häufig verwendete Begriff "*magnetokalorische Kraftmaschine (MKK)*" für Anlagen vorbehalten ist, welche den magnetokalorischen Effekt in der entgegengesetzten Richtung ausnutzen (Zufuhr von elektrischem Strom und dem magnetokalorischen Effekt zum Heizen bzw. Kühlen). Aus diesem Grund wird in diesem Bericht und für die weitere Verwendung der entwickelten Maschine zukünftig der Begriff "*thermomagnetischer Motor (TMM)*" verwendet, ganz im Sinne des Patents [3] von Nikola Tesla.

### Referenzen

- [1] Vurnoz D et al., «Quantitative feasibility study of magnetocaloric energy conversion utilizing,» *Applied Energy*, 2012.
- [2] Helbling et al, «Schlussbericht - Magnetokalorische Kraftmaschine zur Stromerzeugung - Marktchancen- und Potenzialanalyse,» BfE (Vertragsnummer SI/501018-01), 2014.
- [3] N. Tesla, «THERMO-MAGNETIC MOTOR». US Patent 396,121, 15 Januar 1889.
- [4] A. Kitanovski, J. Tušek, U. Tomc, U. Plaznik, M. Ozbolt und A. Poredoš, «Magnetocaloric Energy Conversion,» Springer, 2015.