

**Neuartige magnetokalorische Maschine für  
Kühl- und Heizanwendungen**

# MagKal

---

Schlussbericht  
IFW Dresden

Version	Version 2.0
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2012 – 30.06.2015
Zuwendungsempfänger	IFW Dresden
Förderkennzeichen	03V0157
Vorhabenskennzeichen	VIP0122
Verbreitung	Öffentlich
Fälligkeitsdatum	31.12.2015
Erstellungsdatum	15.12.2015

---

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Förderkennzeichen 03V0158

**Autoren**

Dieses Dokument wurde erstellt vom Leibniz- Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW)

Die Beiträge wurden verfasst von

Dirk Lindackers

Ralf Voigtländer

Samuel Grasmann

Torsten Seidemann

Projektkoordination

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Steinplatz 1ö

10623 Berlin

Germany

Mail: [vip@vdivde-it.de](mailto:vip@vdivde-it.de)

## Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellungen .....	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	8
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
II.	Eingehende Darstellung.....	13
II.1	Verwendung der Zuwendung .....	13
II.1.1	Voruntersuchungen.....	13
II.1.2	Auslegung des Magnetfeldes (AP 2.1, 2.2) .....	15
II.1.3	Konzeptentwicklung (AP 4.1) .....	18
II.1.4	Konstruktion und Bau von Testanlagen (AP 4.2) .....	21
II.1.5	Konstruktion und mechanischer Aufbau des MC-Demonstrators (AP4.3, 4.4) .	24
II.1.6	Elektrotechnik (AP 4.5).....	29
II.1.7	Messdatenerfassung und elektrischer Aufbau (AP 4.5, 4.6).....	32
II.1.8	Testläufe, Messungen und Funktionsdemonstration .....	33
II.1.9	Weiterführende Arbeiten.....	41
II.1.10	Technologietransfer .....	41
II.1.11	Zusammenfassung.....	42
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	44
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	45
II.4	Voraussichtlicher Nutzen.....	48
II.5	Fortschritt bei anderen Stellen .....	48
II.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	48

Anhang:       Erfolgskontrollbericht  
              Kurzfassung zum Verwertungsplan VN

## I. Kurze Darstellungen

### I.1 Aufgabenstellung

An Kälteanlagen werden heute immer höhere Erwartungen, wie etwa hohe Verfügbarkeit und Lebensdauer, minimaler Wartungsaufwand, maximale Energieeffizienz, hoher Bedienkomfort, ökologisch vertretbare Kältemittel sowie geringe Investitionskosten gestellt. Ein weltweit wachsender Bedarf an technisch erzeugter Kälte (Vervierfachung innerhalb der nächsten 3 Jahrzehnte, ca. 7 TWh/a) motiviert die Wissenschaft an technischen Alternativen zu forschen. Hierbei ist in den letzten Jahren besonders die Ausnutzung des sogenannten „magnetokalorischen Effektes (MCE)“ in den Fokus von Forschungsarbeiten gerückt.

Während des Vorhabens MagKal stellt die Entwicklung eines Demonstrators, der auf dem Prinzip des MCE-Effektes nahe Umgebungstemperatur beruht und die Temperatur eines Trägermediums im Kühlbetrieb erniedrigt oder im Wärmepumpenbetrieb erhöht, das wesentliche Projektziel dar.

In enger Kooperation mit den Verbundpartnern TU Dresden und TU Darmstadt wurde in der betrachteten Leistungsklasse der Gesamtwirkungsgrad der neuartigen Maschine gegenüber den weit verbreiteten thermoelektrischen Elementen und Kompressionskältemaschinen verbessert und auf konkrete Anwendungsgebiete nahe der Umgebungstemperatur validiert werden. Die kommerzielle Einführung der MCE-Technologie wird sich daher zunächst auf Anwendungsfelder beschränken, in denen Kompressionsanlagen bisher nicht energieeffizient eingesetzt werden können.

Die für die Bearbeitung einbezogenen drei Kooperationspartner weisen sich als wissenschaftliche Expertengruppen für magnetokalorische Materialforschung (TU Darmstadt), den Bau anspruchsvollster Forschungstechnik (IFW Dresden) und die Optimierung thermohydraulischer Systeme (TU Dresden) aus. Ein Innovationsmentor unterstützte das Projektteam u.a. im Validierungsprozess. Die Aufteilung der jeweiligen Arbeitsfelder erfolgte nach Eignung und ist in Tabelle 1 dargestellt. Das IFW Dresden unterstützte die Projektpartner in der Fertigung aller apparativen Aufbauten während des gesamten Vorhabens und übernahm in der Entwicklung des Demonstrators aufgrund der vielfältigen fertigungstechnischen Möglichkeiten und eines umfangreichen Erfahrungsschatzes im Bereich des Sondermaschinenbaus eine führende Rolle ein. Besonders die Problemstellungen bezüglich der Auslegung des Magnetfeldes, Auswahl geeigneter mechanischer und elektrischer Komponenten, die Entwicklung von Apparaturen für die Voruntersuchungen als auch den Demonstrators selbst konnten am IFW erfolgreich bearbeitet werden. Zudem werden für den Betrieb notwendige Soft- und Hardware sowie Messtechnik vom IFW erstellt bzw. eingerichtet.

Tabelle 1: Übersicht der Kooperationspartner und wesentliche Arbeitspakete

	Material- optimierung	Auslegung Magnetfeld	Thermische Auslegung	Bau des Demonstrators	Technologie- transfer
TU Darmstadt					
IFW Dresden					
TU Dresden					

## I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Gegensatz zu fast allen anderen bekannten Aktivitäten auf dem Gebiet der Magnetokalorik lassen sich mit dem durchgeführten Projekt realistische Aussagen über die Effizienz der Gesamtanlage sowie idealer Prozessfenster ermitteln und nachweisen. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu den meisten bislang bekannten Projekten: hier wird im Allgemeinen lediglich über die magnetokalorisch aktive Substanz, das Magnetsystem und das Antriebsprinzip o.ä. allein bilanziert, unter Vernachlässigung der notwendigen thermischen Auskopplung und aller notwendigen Kreislaufkomponenten.

Das oben formulierte Ziel ist äußerst anspruchsvoll, zumal weltweit von keiner anderen Arbeitsgruppe bislang gezeigt werden konnte, dass eine MCE-Maschine gebaut werden kann, die den Ansprüchen an eine echte Alternative zur Kompressormaschine genügt. Dabei stehen neben den technischen Parametern wie Temperaturdifferenz, Kühlleistung, Energieverbrauch und Lebensdauer auch Kostenaspekte und die Verfügbarkeit von Rohstoffen im Vordergrund. Aus unserer Sicht liegt dieser Umstand darin begründet, dass es zwar einige vielversprechende Einzelansätze gibt, eine Zusammenführung und Integration der gewonnenen Erkenntnisse zu einem Gesamtsystem bisher jedoch nicht erfolgt ist. Im Rahmen des durchgeführten Verbundprojektes konnte diese Lücke geschlossen werden. Ein systematischer Projektansatz, die Einbindung der zur Lösung aller Teilprobleme erforderlichen Expertisen und eine stringentes Projektmanagement bildeten die Grundlage des hier vorgestellten Vorhabens. Weltweit erstmalig konnte eine MCE-Maschine im Rahmen eines interdisziplinär angelegten Projektansatzes entwickelt werden, welche das Ziel verfolgte, keine auf Effizienz getrimmte Konkurrenz eines konventionellen Haushaltskühlschranks darzustellen, sondern vielmehr die Parameter und Einsatzgebiete von MCE-Anlagen zu erforschen und Empfehlungen für den jeweiligen Einsatz herauszuarbeiten. Ein signifikanter Vorteil dieser Anlage stellt die unabhängige Parametrisierung des MCE-Prozesses dar. Alle Betriebsdaten werden dabei erfasst und mit dem gemessenen Werten des MCE-Effektes korreliert.

So stellen die Optimierung des magnetokalorischen Materials, des notwendigen Magnetsystems und des Wärmetransports, der bei der Magnetisierung/Entmagnetisierung des MCE-Materials auf ein geeignetes Trägermedium zu erfolgen hat, die wesentlichen wissenschaftlichen Schwerpunkte des Projektes dar. Auf den gewonnenen Ergebnissen

aufbauend, erfolgten die ingenieurtechnische Umsetzung und schließlich der Bau der MCE-Maschine. Trotz der großen fachlichen Unterschiede zwischen den Disziplinen Materialwissenschaft, Thermodynamik, Maschinenbau und Elektrotechnik sind sie im Zusammenhang des Gesamtvorhabens eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich im Entwicklungsprozess gegenseitig.

Das IFW Dresden ist mit seinen jahrelangen Expertisen im Sondermaschinenbau für die Materialforschung bestens dafür geeignet, dem anspruchsvollen Ziel gerecht zu werden. Maßgeblich dafür steht die hohe technische Ausstattung am IFW als auch qualifizierte Mitarbeiter.

- Moderne Rechnerstrukturen mit leistungsfähigen Simulations- und Entwicklungsprogrammen
- Ingenieurtechnische Expertise hinsichtlich Auslegung von Antriebssystemen, Geräten und Apparaturen, von Fluidiksystemen und Druckgefäßen als auch Probenpräparationen
- Fertigung anspruchsvoller Komponenten in der hauseigenen mechanischen Werkstatt mit umfangreichen Maschinenpark auf höchstem technischen Niveau
- Fertigung von Proben unterschiedlicher Materialien mit additiven Verfahren
- Eigene IT –und Elektrotechnik-Abteilung zum Aufbau diskreter Mess-, Steuer- und Rechentechnik
- Anpassung geeigneter Messdatenerfassung durch umfangreiche Programmiererfahrungen
- Bereitstellung fundierter Erfahrungen über Magnete, Magnetwerkstoffe und deren Anwendung und Verarbeitung
- Verfügbarkeit von Laboreinrichtungen und notwendigen Medien für Vorversuche



## I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zur Erarbeitung der einzelnen Teillösungen werden gemäß der Arbeitspakete folgende Schwerpunkte betrachtet:

### *Maximierung der Magnetfeldstärke*

Die Verwendung von Dauermagneten für magnetokalorische Prozesse gilt in der Literatur als Standard und weist gegenüber Elektromagneten einen wesentlich geringeren Energieaufwand zur Erzeugung eines Magnetfeldwechsels auf. Das IFW Dresden verfügt über langjährige Erfahrung im Umgang mit Magnetwerkstoffen und deren Wechselwirkungen.

### *Festlegung der Geometrie*

Moderne Simulationssoftware erlaubt es heutzutage, die Auswahl eines geeigneten Magnetmaterials, der optimalen Größe und Geometrie gemäß den Anforderungen an eine Zielkonstruktion rechenstechnisch zu darzustellen. Das IFW Dresden hat weitreichende Erfahrungen auf diesem Gebiet und wird zugleich eine Kostenoptimierung des eingesetzten Magnetsystems vorzunehmen.

### *Konzeptentwicklung*

Die Entwicklung von neuen, bis dato nicht bekannten Anlagen und unikalenen Geräten ist in der Forschungstechnik am IFW die wesentliche Aufgabenstellung. Hier findet ein reger ingenieurtechnischer Gedankenaustausch statt. Zudem kann auf einen reichhaltigen Erfahrungsschatz in dieser Abteilung aufgebaut werden.

Bisher bekannte magnetokalorische Maschinen stellen für sich nach außen abgeschlossene Geräte oder Vorrichtungen dar. Ein Novum auf diesem Forschungsgebiet könnte eine modulare, offene Bauweise darstellen. Dieser neue Konzeptansatz wird in der Projektbearbeitung intensiver betrachtet.

### *Konstruktion und Bau von Testanlagen für AP1 und AP3*

Für die umfangreichen Vorversuche bezüglich Materialerprobung und thermischer Auslegung entstehen während der Projektlaufzeit verschiedene Apparaturen zur Erlangung von Zwischenergebnissen. Diese sind notwendig um zunächst im kleinen Maßstab Aussagen über Funktionsweise, Effektivität und Materialeigenschaft, Verhalten gegenüber Magnetfeldern und thermische Spezifikationen zu erhalten. Mit diesen gesammelten Erfahrungswerten wird der Demonstrator entsprechend ausgelegt. Der Entwurf und die sukzessive Entwicklung bis hin zur Umsetzung von Prozessen und Messaufgaben ist eine sehr gut beherrschte Aufgabe am Institut.

### *Konstruktion*

Für eine Nutzbarmachung des magnetokalorischen Effektes ist stets ein schneller und betragsmäßig hoher **Wechsel des Magnetfeldes** gegenüber dem aktiven Material notwendig. Dazu sind generell zwei Bewegungsabläufe möglich: alternierend oder rotierend. Ein rotierendes System ist hier zu bevorzugen, da der für die Bewegung aufgebrauchte Energieaufwand stets geringer ausfällt. Obgleich sich ein Magnetsystem bewegt, oder das aktive Material wird Gegenstand ingenieurtechnischer Einschätzung und Abwägung verschiedener Konzepte sein.

Für eine Ausnutzung der im aktiven Material entstandenen Temperaturdifferenz ist eine **Anbindung mit einem Wärmeträgerfluid** die beste Möglichkeit. Um weitgehend verlustfreie Übergänge in das Trägermedium zu gewährleisten, sind Aspekte der Regeneratorgeometrie, Größe, Einbaulage, Isolation und Strömungseigenschaften zu erarbeiten. Hierbei tragen verschiedene Entwürfe der MCE-Integration zur Entscheidungsfindung bei.

Die Relativbewegung zwischen Magnetfeld und aktivem Material erfolgt wie oben beschreiben vorzugsweise rotatorisch. Dazu wird ein geeignetes elektrisches **Antriebskonzept** vorgeschlagen. Die Mitarbeiter der Abteilung Elektrotechnik des IFW verfügen dabei über äußerst umfangreiche Expertisen auf diesem Gebiet.

Das Wärmeträgermedium muss, nachdem es mittels des MCE am aktiven Material erwärmt bzw. abgekühlt worden ist, zu einer Stelle geleitet werden, an der die Wärme entzogen bzw. die Kälte genutzt werden kann. Hierzu erweist es sich als signifikanter Vorteil, vielfältige Strömungsszenarien im Demonstrator zu ermöglichen. Bisher bekannte MCE-Anlagen verfügen über fest eingestellte **Fluidmanagementsysteme**. Schnell schaltende elektrische Ventile können diesem Nachteil entgegensteuern und erlauben gleichzeitig beliebig flexible Anpassungen der Fluidströmungen in zeitlicher Abhängigkeit der Magnetfeldwechsel.

Der magnetokalorische Effekt bewirkt eine geringe Temperaturerhöhung bzw. – Erniedrigung im aktiven Material. Um diesen vergleichsweise geringen Effekt von wenigen Kelvin Unterschied möglichst effektiv zu verwenden, muss eine **hocheffiziente Isolation** erfolgen. Das IFW greift dabei auf handelsübliche Isolationsprodukte zurück, beachtet in der Entwicklung aber zusätzlich auf eine geeignete Materialauswahl der umgebenden Komponenten. Zudem werden Anstrengungen unternommen, zusätzlich eingeleitete Energien so gering wie möglich zu halten.

Damit die entstandene **Kühlleistung ausgekoppelt** werden kann, werden individuelle Wärmetauscher aufgebaut. Hierbei wird auf ein fundiertes Wissen der Ingenieure und der Werkstatt am IFW aufgebaut.

Unterstützend zum Konstruktionsprozess werden besonders zu beachtende Komponenten mithilfe Simulationssoftware der FEM-Methodik auf ihre Eignung geprüft.

### *Mechanischer Aufbau*

Nach Erstellung aller notwendigen Fertigungsunterlagen und nach Zulieferung von Komponenten (z.B. Antriebsmotor) erfolgt die mechanische Fertigung zum großen Anteil in der Werkstatt des IFW. Hier erweisen sich die kurzen und direkten Wege zur individuellen Absprache als äußerst vorteilhaft. Auch der umfangreiche Maschinenpark ermöglicht es, dass nur wenige Komponenten extern beschafft werden müssen.

### *Elektrotechnik*

Die Wechselwirkung zwischen dem rotierendem Magnetfeld und dem aktiven Material resultiert aus einer eingebrachten **Antriebsleistung**. Diese muss hinreichend groß ausgelegt werden, damit auftretende Drehmomentspitzen keine beeinträchtigende Wirkung entwickeln können. Alle natürlich vorkommenden als auch die erforschten neuen Ersatzmaterialien zeigen neben dem magnetokalorischen Effekt zusätzlich eine magnetische Anziehungskraft auf.

Die gezielte, aber variable Steuerung des **Wärmeträgerfluides** mithilfe von elektrischen Ventilen bedarf einer angepassten Ansteuerung. Damit jeglicher Wärmeeintrag der elektrischen Spulen in den Ventilen auf das direkt angrenzende Fluid möglichst gering ausfällt, sind geeignete Maßnahmen zu ergründen. Ein Beispiel hierfür kann eine Leistungsabsenkung in den Ventilen darstellen.

### *Messdatenerfassung*

In einem thermodynamischen Gerät mit geringen zu erwartenden **Temperaturänderungen** im Inneren bedarf die Erfassung dergleichen die höchste Aufmerksamkeit. Das Auslesen auch von sehr geringen Temperaturänderungen unter 1K gibt Auskunft über die ablaufenden Prozesse und wird durch mehrere Messstellen nahe der Probenkörper umgesetzt. Hierzu kann das IFW Dresden auf die eigene Fertigung hochempfindlicher, magnetfeldunabhängiger Thermosensoren zurückgreifen. Eine Anbindung an messtechnische Datenerfassungssysteme ermöglicht die wissenschaftliche Auswertung. Am IFW besteht die Möglichkeit, hochempfindliche, magnetfeldunabhängige Thermosensoren dafür bereit zu stellen und an messtechnische Datenerfassungssysteme anzubinden.

Um eine Aussage über die gesamte thermische Leistungsfähigkeit der Anlagen zu erhalten, ist es unabdingbar zu wissen, wie hoch die (zumeist elektrische) **Leistungsaufnahme** des jeweiligen Gerätes zu Buche schlägt. Gezielt auf unterschiedliche Betriebsmodi abgestimmte Versuchsdurchführungen werden dazu ausgeführt.

Die Kenntnis über die Verteilung und **Durchflüsse** der eingesetzten Fluiden lässt einen Rückschluss auf Mengen- und damit Wärme-Mengen-Transport in dem Gerät zu. Zusätzlich können mithilfe von **Drucksensoren** entsprechende Zustände in den Leitungen und Probenkanälen eruiert werden. Aussagen über Druckverluste an bestimmten Punkten vervollständigen die wissenschaftliche Kenntnis über die inneren

Vorgänge und helfen, bestimmte Betriebszustände gegebenenfalls nicht zu überschreiten und Risiken auszuschließen.

Aus den oben genannten separat aufgezeichneten Messwerten lassen sich die thermischen Kennzahlen  $\Delta T$  und  $P_{\text{kühl}}$  rechnerisch ermitteln. Dies kann für unterschiedliche Materialien und Arbeitspunkte, -modi erfolgen.

#### *Elektrischer Aufbau*

Neben dem elektrischen Anschluss der Ventile, Thermoelemente und Drucksensoren sowie der Antriebsaggregate stellt die Bereitstellung jeweils notwendiger Versorgungsspannungen, und die gewünschte Ansteuerung dieser Komponenten die wesentliche Aufgabe an die Elektrotechnik dar. Hierbei ist ein sicherer Aufbau in einer zu entwerfenden kompakten Steuerbox gegenüber einzelnen Komponenten zu bevorzugen. Für die Auswertung aller wichtigen Daten wird ein Rechner ins System integriert.

#### *Testläufe, Messungen und Funktionsdemonstration*

Nach Fertigstellung des mechanischen und elektrischen Aufbaus des Demonstrators sollen zunächst Testläufe durchgeführt werden. Hierbei spielen Messungen des anliegenden Magnetfeldes und Wärmeverlustmessungen ohne aktivem Material / ohne Magnetfeldeinfluss eine wesentliche Rolle.

Die Charakterisierung der eingesetzten Proben erfolgt anschließend mit zunächst in den Vorversuchen ermittelten Parametern. Die einzigartige Stärke des Demonstrators beweist sich anschließend in der Variation einzelner Parameter oder ganzer Parametersätze. Somit können ideale Arbeitspunkte gezielt herausgefunden und Abhängigkeiten aufgezeigt werden.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des MagKal-Vorhabens ergaben sich intensive Zusammenarbeiten mit den beiden Projektpartnern. Dies geschah zumeist in Treffen, in denen der aktuelle Fortschritt ausgetauscht und Fragestellungen diskutiert, sowie weitere Schritte festgelegt wurden. Die Entwicklung und der apparative Aufbau verschiedener Anlagen und Geräte durch das IFW unterstützten die Projektpartner umfangreich bei der Untersuchung von thermischen und materiellen Teilaspekten.

Tabelle 4: Übersicht über die Zusammenarbeit mit anderen Stellen

AP	UAP	Titel / Meilenstein	TU Darmstadt	TU Dresden
1		Materialoptimierung	x	
	1.5	Entwicklung von Fertigungsmethoden	x	
3		Thermische Auslegung		x
	3.1	Thermische Ankopplung MCE Material		x
	3.2	Festlegung Wärmeträgerfluid		x
	3.3	Aufzeigen thermischer Verluste		x
	3.4	Therm. und fluiddyn. Optimierung	x	x
4		Bau des MC Demonstrators		x
	4.1	Konzeptentwicklung	x	x
	4.2	Konstruktion und Bau von Testanlagen	x	x

Weiterhin konnte die Forschungstechnik des IFW zu speziellen entwicklungstechnischen Fragestellungen hinsichtlich Beratung und Komponentenauswahl auf langjährige Kontakte aus der Industrie zurückgreifen.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Verwendung der Zuwendung

Die Definition der einzelnen Arbeitspakete stellt sich während des Projekt-Verlaufes als weitgehend zutreffend heraus. Es haben sich daran angelehnt einige Aufgabenstellungen herauskristallisiert, deren Bearbeitung nachfolgend überblickartig dargelegt werden soll. Die personelle Aufwendung ist gemäß Abschnitt I.3 dokumentiert. Eine Zuordnung der wichtigsten Anschaffungen im Projektverlauf ergibt sich aus der Tabelle 6 in Abschnitt II.2.

#### II.1.1 Voruntersuchungen

##### SLM

Eine vergleichsweise neue und äußerst vielversprechende Fertigungsmethode stellt das sogenannte "Selective Laser Melting" -Verfahren dar. Hierbei wird feines Pulver mithilfe einer energiereichen Laserstrahlung gemäß der gewünschten Konturen aufgeschmolzen und erstarrt anschließend zu einem festen Materialverbund. Nach Überdeckung mit einer neuen Pulverschicht und erneutem Aufschmelzen entsteht somit schichtweise ein Körper, der geometrisch äußerst komplex aufgebaut sein kann. Herkömmliche spanabhebende Verfahren erlauben keine derartige Bearbeitung.

In den erfolgten Untersuchungen konnten mehrere Materialien hierzu getestet und die additiv erstellten Wärmetauscher thermisch sowie fluiddynamisch optimiert werden. Als herausragend im Bereich der additiven Probenherstellung zählt hier die Verarbeitung von Lanthan-Eisen-Silizium-Pulvern zu hochkomplexen magnetokalorisch aktiven Wärmetauschern mit feinen inneren Strukturen. Die Abbildung 1 zeigt zwei solche Wärmetauscher mit den äußeren Abmessungen  $10 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$ .

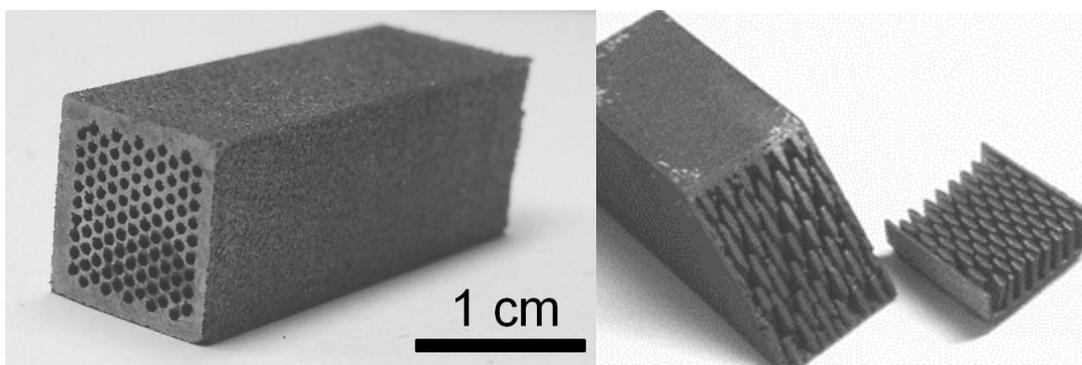


Abbildung 1: Mit dem SLM-Verfahren additiv gefertigte magnetokalorisch aktive Wärmetauscher

### Zyklerteststand

Zur Untersuchung kleiner Materialproben hinsichtlich mechanischer und magnetokalorischer Lebensdauer in wechselnden Magnetfeldern wurde am IFW ein Zyklrier-Gerät entwickelt, dessen wesentliches Konstruktionsmerkmal zwei Paar schnell rotierende Dauermagneten auf einer Achse darstellt. In einem variablen Luftspalt zwischen den Magneten konnten Proben bis zu 10x je Sekunde einem Magnetfeldwechsel unterzogen werden. Die wichtigsten erlangten Erkenntnisse waren u.a. Aussagen über die Stabilität des Materials nach mehreren Millionen Magnetfeldwechseln als auch der magnetische Einfluss auf den magnetokalorischen Effekt zu Beginn und zum Ende der Messungen. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Zyklriers. Blau dargestellt sind die Dauermagneten, rot abgebildet ist eine Probe im Luftspalt.

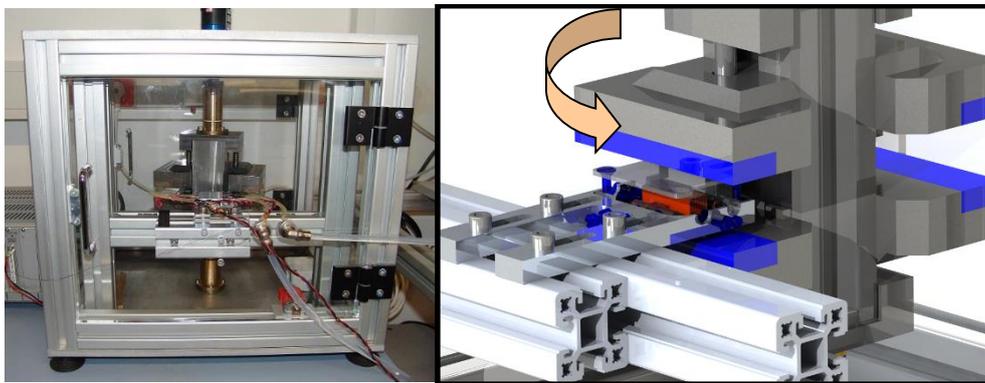


Abbildung 2: Prüfstand zur Charakterisierung von MCE Werkstoffen, CAD-Ansicht

Abbildung 3 zeigt ein Ergebnis der Untersuchungen mit SLM-gedruckten Wärmetauschern im Zyklerteststand. Der MCE bleibt über eine Million Zyklen nahezu konstant, die mechanische Stabilität hat sich bei dieser Probe jedoch nicht herausgestellt. Erst nach Überzug der Probe mit einem Lack konnte die Korrosion an Luft und Risse wirksam verhindert werden. Die Materialwahl als auch Präparation erwiesen sich als bestens geeignet für intensivere Untersuchungen.

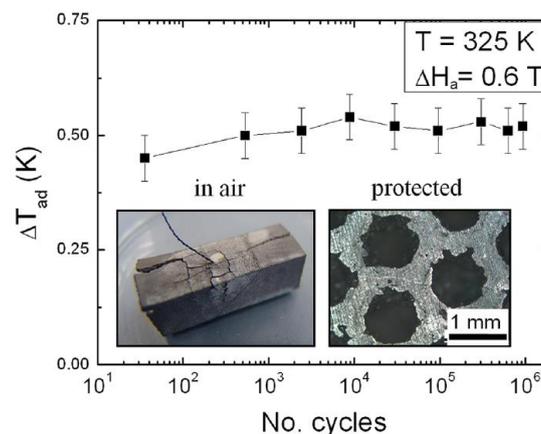


Abbildung 3: SLM-gedruckte Probe vor und nach Beschichtung mit Lack. Magnetokalorischer Effekt über 1 Mio Magnetzyklen

Überdies ergaben sich in diesen Vorversuchen nützliche Erkenntnisse in der Verwendung und Auslegung von starken Dauermagneten.

## II.1.2 Auslegung des Magnetfeldes (AP 2.1, 2.2)

### Ziel der Untersuchungen

Die Magnetfeldstärke und der schnelle und scharfkantige Wechsel zwischen Bereichen mit hohen und niedrigen Feldstärken, (idealerweise  $B=0$ ) stellen einen entscheidenden Anteil an einem magnetokalorischen Vorgang dar. Eine geschickte Abstimmung zwischen Geometrie, Material und im ökologischen Sinne auch Kosten mündet in einer geeigneten und nach oben genannten Punkten optimierter Magnetaanordnung.

### Ablauf der Untersuchungen

Mit Hilfe der Simulationssoftware „Amperes“ und „FEMM 2.0“ werden vielfältige Geometrien und Materialien auf ein Optimum hin untersucht. Da mit steigender Leistungsfähigkeit eines MCE-Gerätes zwangsläufig das Magnetfeld, und damit die felderzeugenden Komponenten skaliert werden müssen, ist eine Betrachtung der anteiligen Mengen und Kosten der Dauermagnete vorgenommen worden.

Ein am IFW Dresden vorhandener Elektromagnet wurde für thermische Vorversuche herangezogen. Hierbei werden Aussagen über Temperaturänderungen im umströmenden Wasser als auch das Verhalten der elektrisch erzeugten Magnetfelder erwartet. Dieser Vergleich soll bestätigen, dass elektrisch erzeugte Felder hinsichtlich Energieeffizienz nicht für MCE-Anlagen zu bevorzugen sind.

### Ergebnisse der Untersuchungen

Für den magnetokalorischen Effekt spielt es zu nächst keine Rolle, ob ein Magnetfeld über einer feststehenden Probe aktiven Materials rotiert, oder umgekehrt. Als wesentlicher Vorteil konnte sich in der Konzeptfindung jedoch der rotierende Dauermagnet durchsetzen, da hier eine ortsfeste Anbindung der Fluidik gewährleistet werden kann. Es sind weiterhin bogenförmige Geometrien gegenüber den üblichen runden Dauermagneten zu bevorzugen. Dadurch erhöht sich die scharfe Abgrenzung und maximale zeitliche Ausnutzung des Magnetfeldes während der Drehbewegung. In Abbildung 4 sind Simulationsergebnisse zur Magnetgeometrie dargestellt.

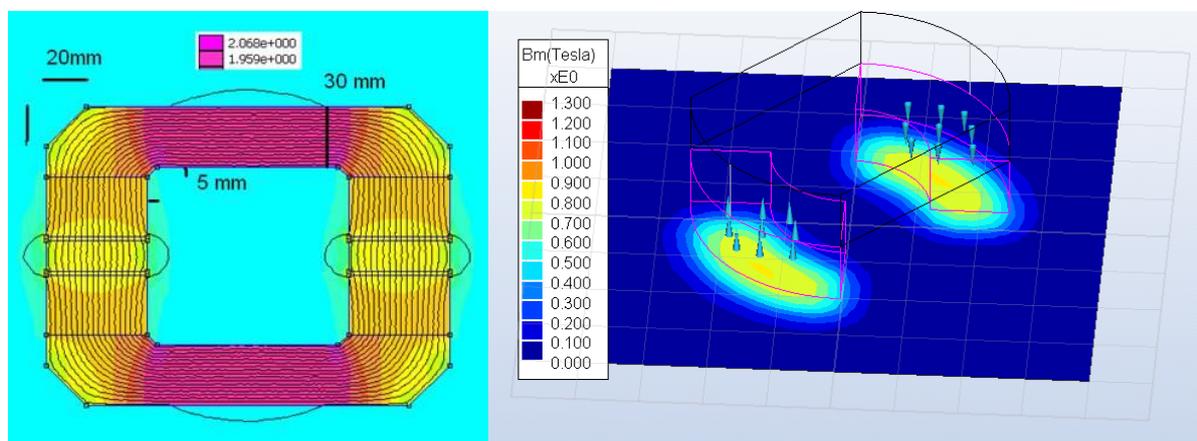


Abbildung 4: 2D und 3D Simulation der Magnetaanordnung im Demonstrator

Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Verlauf zwei unterschiedlicher Magnetanordnungen (runde Magneten gegenüber bogenförmigen) über eine volle Umdrehung. Trotz des zahlenmäßig geringer ausfallenden Magnetfeldes der bogenförmigen Anordnung wurden diese bevorzugt, da hier die Bereiche hoher und niedriger Felder stärker ausgeprägt erwartet werden.

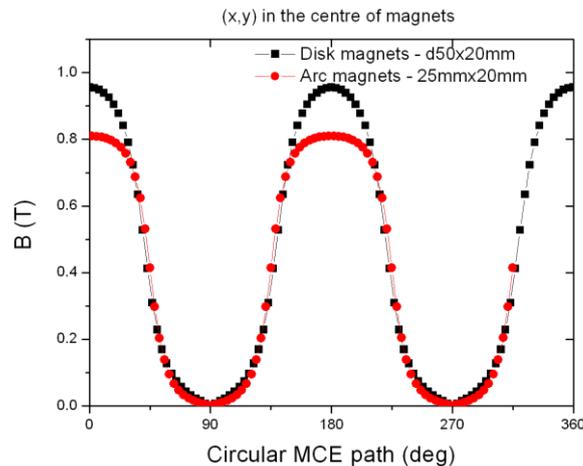


Abbildung 5: Simulierte Magnetfeldstärke über einer vollen Umdrehung

Für die spätere Montage derartig starker Dauermagnete ist die Kenntnis über auftretende Anziehungs- und Abstoßungskräfte von zentraler Bedeutung. Auch hierzu wurden im Vorfeld Aussagen entwickelt und eine angepasste Konstruktion zur Aufnahme dieser Kräfte angestrebt. Das Ergebnis in Abbildung 6 weist für den Luftspalt von 20mm eine Anziehungskraft auf, die der Gewichtskraft von ungefähr einer halben Tonne entspricht.

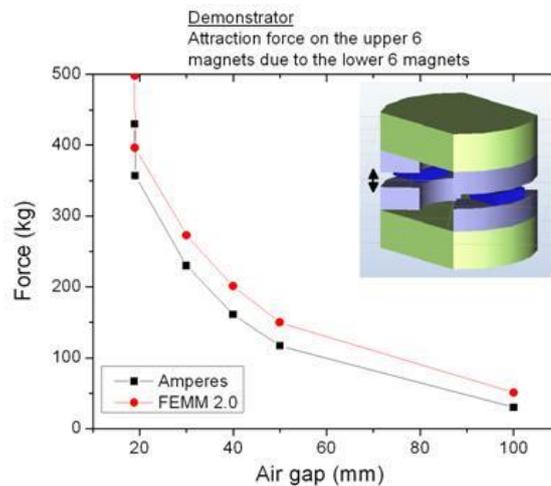


Abbildung 6: Darstellung der zu erwartenden auftretenden Kräfte zwischen den Magnethalbschalen

Um in späteren Entwicklungsstadien leistungsfähige Kühlgeräte umsetzen zu können, ist die eingebrachte Magnetmasse nicht zu vernachlässigen. Am IFW wurden daher rechnerisch optimale Verhältnisse von Kosten zu Magnetmassen und deren Anordnung aufgestellt. Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse.

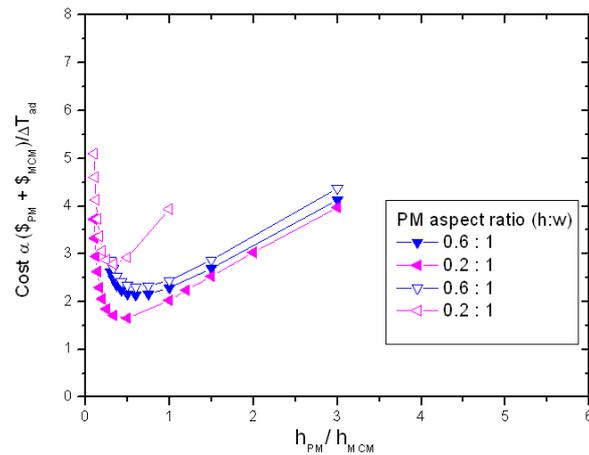


Abbildung 7: Gegenüberstellung von Magnetkosten zu Kühlleistung

In Zusammenarbeit mit dem Magnetlieferanten IBS Magnet Berlin konnte ein starker Neodym-Eisen-Bor-Magnet mit hoher Feldliniendichte, namentlich Vacodym 722HR, ausgewählt und am IFW Dresden zur Formgebung final bearbeitet werden.

Der Forderung nach sich scharf abgrenzenden und über den jeweiligen Bereichen nahezu konstanten Magnetfeldwerten konnte im Demonstrator zur vollen Zufriedenheit entsprochen werden. Die simulierten Ergebnisse konnten dabei sogar übertroffen werden. Abbildung 8 verdeutlicht dies.

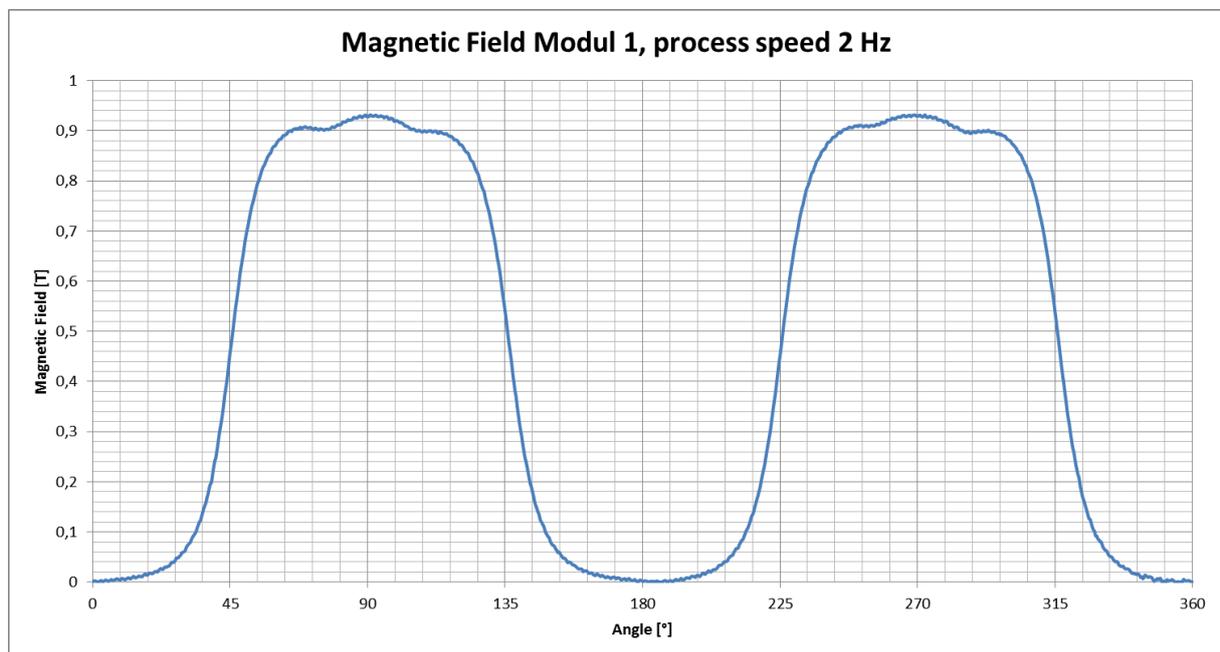


Abbildung 8: Messung des Magnetfeldes über einer vollen Umdrehung der Magnetanordnung

Das Magnetfeld wird dabei über einen Luftspalt von 20mm über einer Fläche von 471cm<sup>2</sup> erzeugt. Die geringen wellenartigen Plateauerhöhungen deuten auf die Unterteilung in je 3 Einzelmagnete je Magnetpol hin. Ausschlaggebend für den MCE sind hier jedoch die scharfkantigen Wechsel der Bereiche.

### II.1.3 Konzeptentwicklung (AP 4.1)

#### *Ziel der Untersuchungen*

Die im Vorhaben MagKal angestrebte Lösung soll sich von den bekannten Arbeiten abheben und zugleich die Lücke zwischen vielen bekannten Einzelansätzen hin zu einer Integration aller technischen Parameter in einem Gerät schließen. Hierzu sind unterschiedliche Konzeptansätze zu diskutieren und nach Machbarkeit auszuwerten. Basierend auf Erkenntnissen aus Literatur-, Patentrecherche und Simulationsmodellen sollen wesentliche Parameter des geplanten Demonstrators festgelegt und gemeinsam die Zielkonstruktion überführt werden.

#### *Ablauf der Untersuchungen*

Um sich von bekannten Entwicklungen weltweit zu unterscheiden ist zunächst der Stand der Technik auszuarbeiten. Dies geschah in Zusammenarbeit mit der TU Dresden und mündete in einer exzellenten Übersicht über vorhandenen MCE-Maschinen mit den wichtigsten Kenndaten. Regelmäßige Treffen der Projektpartner gaben über den Fortgang des Vorhabens Auskunft. Gleichzeitig konnten die wesentlichen Konzeptideen fachlich diskutiert und festgeschrieben werden.

#### *Ergebnisse der Untersuchungen*

Als Novum auf dem Gebiet der Magnetokalorik erwies sich ein modularer Aufbau. Die aktiven magnetokalorisch arbeitenden Module werden dabei von einem gemeinsamen Motor angetrieben. Der Demonstrator lässt sich durch äußere frei wählbare Verbindungen in unterschiedlichen Betriebsmodi betreiben.

Die konzeptionelle Ausführung eines MCE-Moduls sieht eine drehende Welle mit je zwei gegenüberliegenden Magnetpaaren vor. In deren Luftspalt befindet sich die konstruktiv anspruchsvollste Komponente in Form einer Probenträgerplatte mit zwei sich kreuzenden Strömungskanälen, an deren äußere Positionen je zwei Wärmetauscher aus aktivem Material sitzen. Das feststehende innenliegende Fluidmanagement wird komplettiert durch außen angeordnete elektrische Ventile und eine Pumpeneinheit sowie Wärmetauscher und Filter.

Das fluiddynamische Konzept eines Moduls ist in Abbildung 9 verdeutlicht.

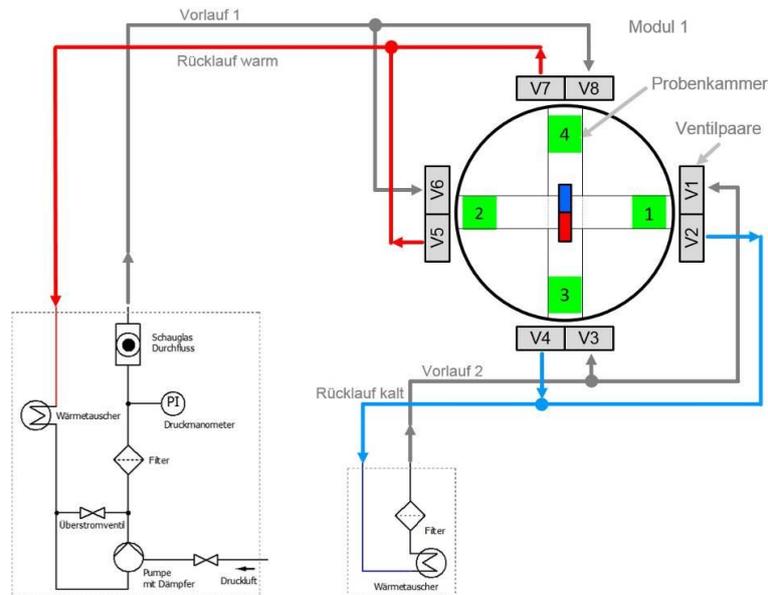


Abbildung 9: Strömungskonzept eines aktiven Moduls mit Peripherie

Dieser Aufbau garantiert eine hohe Flexibilität der Anlage durch individuell einstellbare Parameter, und ist primär nicht auf hohe Nutzleistungen ausgelegt. Zur Darstellung des modularen Konzeptes wird der Aufbau von mindestens zwei identischen Modulen gefordert. Diese lassen sich gemäß den nachfolgenden Abbildungen 10 und 11 je nach Betriebsmodus parallel oder seriell zusammen schalten. Dadurch lässt sich gegenüber einem Einzelmodul eine hohe Kälteleistung (Parallelbetrieb mit gleichartigen Materialien, gleiche Temperaturänderung) erzielen. Dem entgegen steht eine serielle Verschaltung zur Erzeugung hoher Temperaturunterschiede mit zwei Materialien unterschiedlicher Arbeitstemperaturen.

Das Konzept sieht zudem eine per Software initiierte Umkehrbarkeit des Wirkprinzips von der Kältemaschine zur Wärmepumpe und vice versa vor.



## II.1.4 Konstruktion und Bau von Testanlagen (AP 4.2)

### Ziel der Untersuchungen

Um breit aufgestellte Informationen zu den Materialien als auch den Vorgängen der Magnetokalorik zu erhalten sollen eine Anzahl Voruntersuchungen durchgeführt werden.

Hierfür liefert das IFW durch seine ingenieurstechnischen und Fertigungs-Möglichkeiten für die Projektpartner die notwendige Ausrüstung. Als wesentliche Anlage sei hier ein thermischer Versuchsstand genannt, der unter realen Bedingungen die Performanz verschiedener Materialien untersucht. Es sollen darüber hinaus Erkenntnisse hinsichtlich Verlustabschätzung, optimalen Betriebs- und Leistungsparametern sowie Isolation und Druckverhältnissen aufgezeigt werden.

### Ablauf der Untersuchungen

Für diese thermische Testanlage steht am IFW ein leistungsstarker Elektromagnet Typ Walker HV-7V zur Verfügung. Nach Diskussion mehrerer Ansätze konnten die Projektpartner sich auf eine Probengeometrie (stehende Plattenanordnung) als auch auf das Verdrängerkolbenprinzip für den fluidischen Antrieb festlegen. Ergänzend soll ein Kälte-Umwälzthermostat und Messtechnik für Temperatur- und Druckverhältnisse installiert werden. Den gesamten apparativen Aufbau vermittelt Abbildung 12.



Abbildung 12: Gesamtaufbau des Thermischen Teststandes mit dem Elektromagneten

### Ergebnisse der Untersuchungen

Es wurde ein fluiddynamisches System entwickelt, welches in den variablen Luftspalt der Magnetpole eingeschoben werden kann. Zwei parallel angeordnete Kolben verdrängen das Wärmeträgermedium auf der sogenannten „kalten“ Seite mit variablen Hub und Frequenz. Die Flüssigkeit wird dabei durch die Platten bewegt, welche sich direkt unter den Polschuhen des Magneten befinden. Dieser wird getaktet zu- und abgeschaltet. 5 Messpunkte zeichnen den Temperaturverlauf entlang der 120mm langen, längs durchströmten Probe auf. Ein nachgeschaltetes Kälte-Umwälzthermostat schließt den Fluidkreislauf ab.

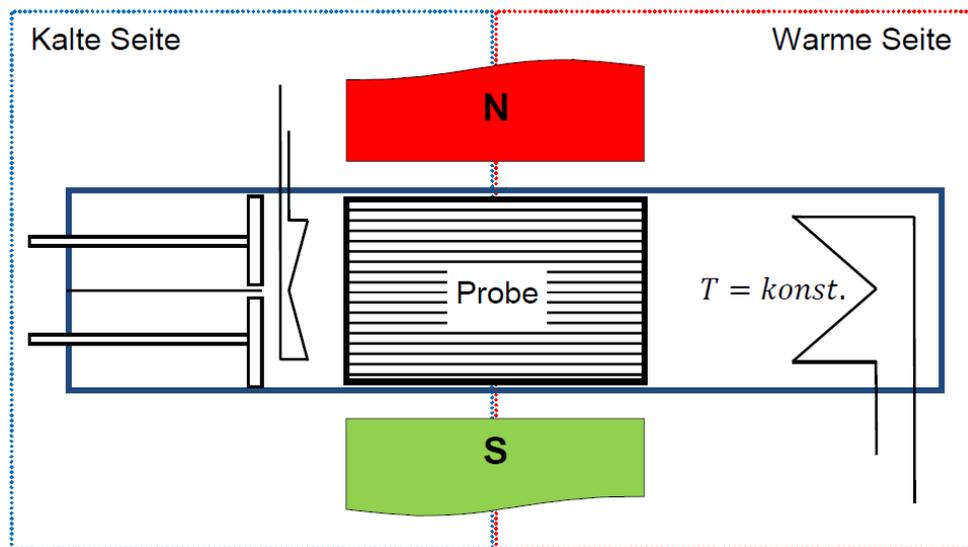


Abbildung 13: Schematische Darstellung des thermischen Versuchsaufbaus am IFW

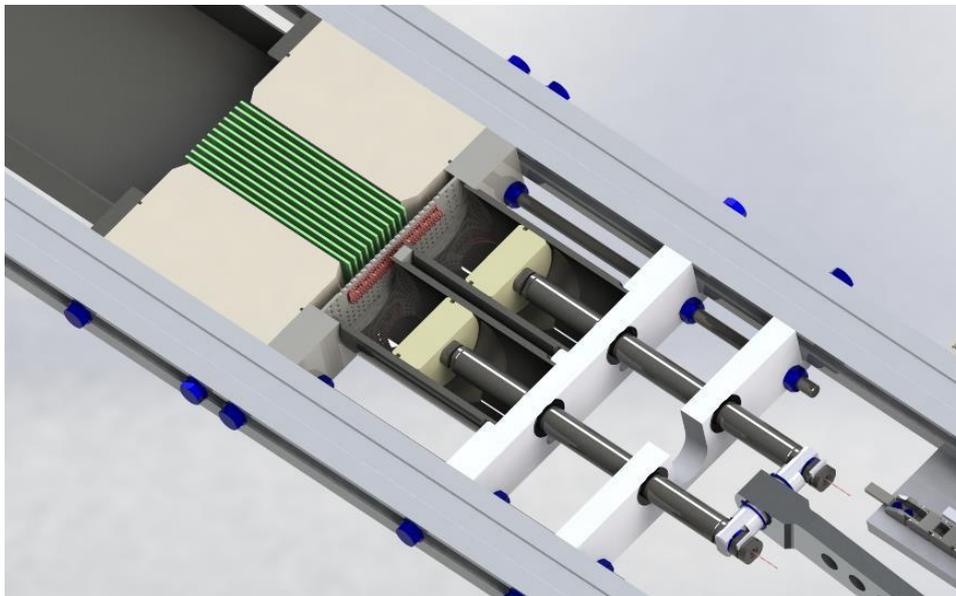


Abbildung 14: CAD-Schnittbild des thermischen Teststandes

In obigem CAD-Schnittbild werden wesentliche Komponenten für den Prozess aufgezeigt. Grün dargestellt sind schematisch die stehenden Probenplatten, auf der sogenannten „kalten“ Seite eine elektrische Widerstandsheizung (rot) und gelb eingefärbt sind die beiden parallelen Antriebskolben in Edelstahlzylindern. Die lineare Bewegung dieser resultiert aus einer rotatorischen Bewegung, welche über ein Pleuel übersetzt wird.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesem Vorversuch bestätigen die gewählte Probenanordnung: aufrechtstehende 1mm-Platten mit Distanzstücken. Der darüber auftretende Druckverlust fällt vergleichsweise gering aus (70mbar); somit wird diese Geometrie auch für den Demonstrator festgelegt. Weiterhin kristallisierte sich ein Volumenaustausch von 60% im Regenerator als optimaler Parameter heraus. Der entwickelte Versuchsaufbau ist in Abbildung 15 im Detail dargestellt.

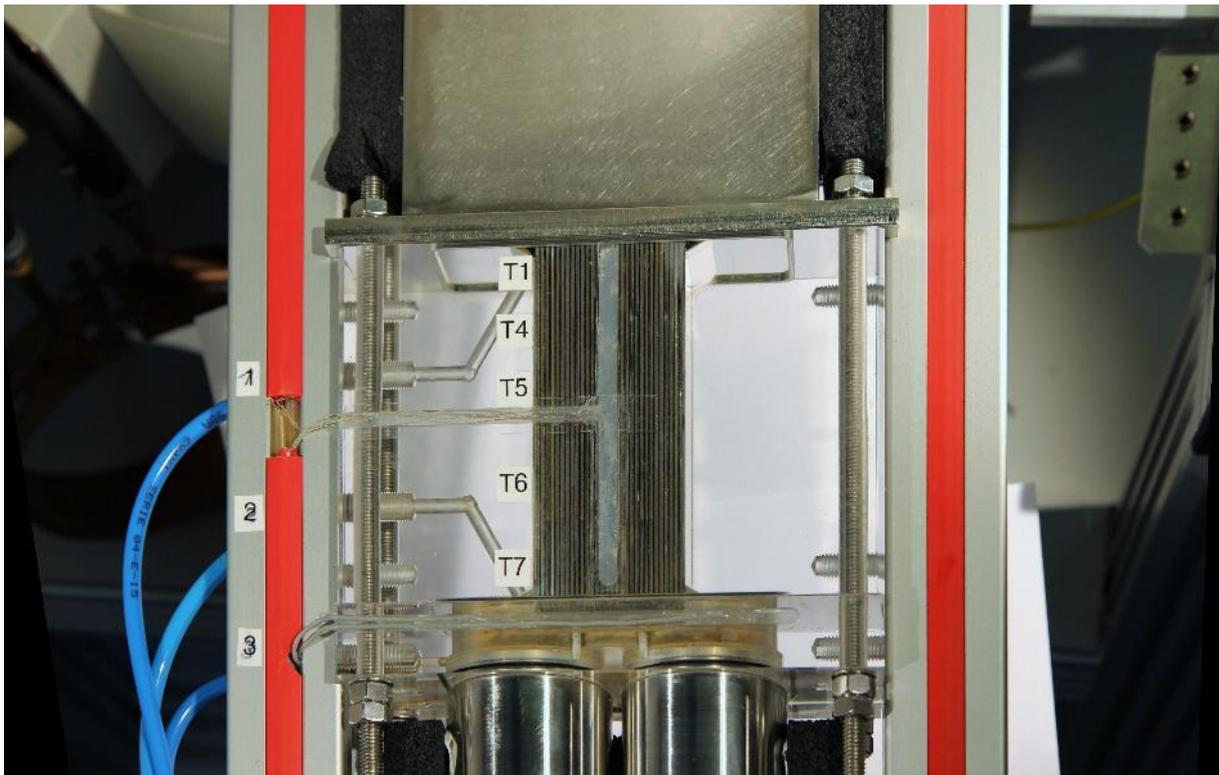


Abbildung 15: Draufsicht auf Probenkammer mit stehenden Platten in der thermischen Testanlage

Die signifikantesten Ergebnisse der Anlage stellten zum einen die maximal erreichten Temperaturdifferenzen von 3,5 Kelvin und die maximal zu erreichenden Kühl- bzw. Heizleistungen von knapp 140 W für Gadolinium dar. Zur Erlangung der Ergebnisse wurden unter Anderem folgende Kurven aufgezeichnet. Gut zuerkennen sind die Temperatursprünge jedes einzelnen Hubes und der gesamte Temperaturverlauf in der Anlage (Abb.16)

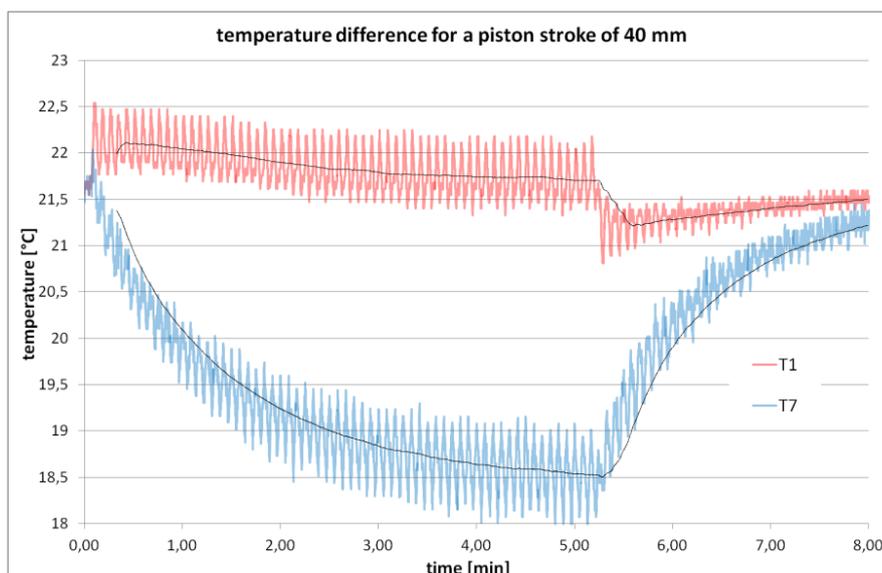


Abbildung 16: Temperaturverlauf in der thermischen Testanlage

Das Ergebnis der rechnerischen Ermittlung der Leistungsfähigkeit ist im Diagramm Abbildung 17 aufgezeigt.

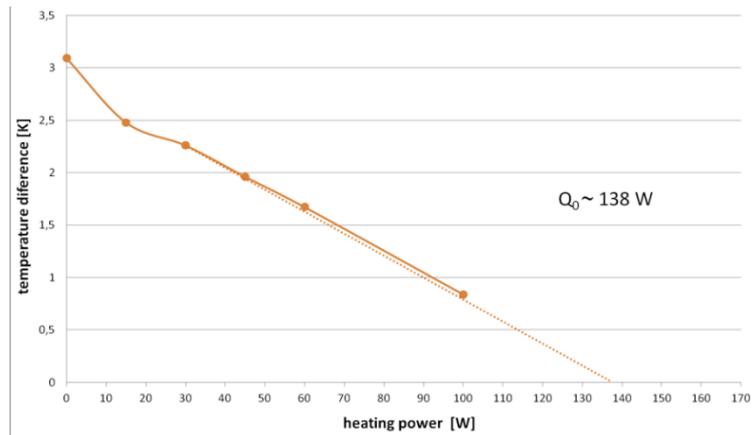


Abbildung 17: Erzielter Leistungswert der thermischen Testanlage

Ein massebezogener Vergleich zwischen dem Referenzmaterial Gadolinium und dem weiter entwickelten Lanthan-Eisen-Silizium- Komposit ergab, dass das LaFeSi durchaus leistungsfähiger ist, aufgrund der geringeren Dichte im Komposit jedoch die gesamte Anlage skaliert und damit auch die Magnetmenge drastisch erhöht werden müsste. Bei den hier verwendeten identischen Volumina schnitt das Gadolinium besser ab.

Zu den weiteren Arbeiten des IFW im AP 4.2 zählte zum einen die Entwicklung verschiedener Probenpressmatrizen für die Materialkomposition als auch die Verbesserung des vorhandenen Zyklustestgerätes für Lebensdaueruntersuchungen. In diesem Gerät wurden kleine Materialproben in kurzer Zeit mehreren Millionen Magnetfeldänderungen unterworfen. Eine fundierte Aussage über die mechanische Stabilität als auch den vorhandenen magnetokalorischen Effekt und damit über die Lebensdauer konnten getroffen werden.

Ausführlichere Beschreibungen sind in den jeweiligen Jahres-Zwischenberichten des IFW und der Projektpartner erläutert.

### II.1.5 Konstruktion und mechanischer Aufbau des MC-Demonstrators (AP4.3, 4.4)

#### *Ziel der Konstruktion*

Basierend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen und weiterer Verbesserungen soll das erstellte modulare Konzept des Demonstrators entwickelt und aufgebaut werden. Um die Lücke zwischen einer reinen Forschungsanlage zu einem Demonstrationsgerätes zu schließen soll trotz bekannter Parameter eine hohe Flexibilität einzelner Abläufe beibehalten werden. Dies erfordert eine geeignete mechanische Konstruktion mit überlegter Auswahl zuzukaufender Komponenten.

#### *Ablauf der Konstruktion*

Die Entwicklung des Demonstrators teilte sich in mehrere, gemäß den Unterarbeitspunkten gegliederte Teilaufgaben ein. Die zuvor lediglich simulierten **Magnethalbkreise** werden detailliert ausgearbeitet und auf einer zentralen Welle befestigt.

Eine **Integration des aktiven Materials** in das Magnetfeld erfordert die größte Entwicklungssorgfalt, da hier ein geringer Luftspalt von lediglich 20mm zur Verfügung steht.

Ein **Antriebsmodul**, welches die Drehbewegung für mehrere aktive Module zur Verfügung stellt ordnet sich lokal und optisch diesen unter und beinhaltet den elektrischen Motor sowie eine Sicherheitskupplung, die im Überlastfall die angetriebenen Achsen vom Motor trennt.

Die für den **Fluidkreislauf** notwendigen Bauteile, wie z.B. Ventile, Wärmetauscher und Verbindungselemente werden gemäß Simulationsergebnissen und Erkenntnissen der Vorversuche aufeinander abgestimmt und ausgewählt. Der diskrete Aufbau geschieht in Form einer Pumpeneinheit mit den Wärmetauschern.

### *Ergebnisse der Konstruktion*

Die wesentlichen Teilbaugruppen des Demonstrators sollen im folgenden Abschnitt kurz bildhaft dargestellt werden:

- **Magnetkreis:** Zentrale rotierend gelagerte Welle, welche die hohen Anziehungskräfte zwischen der oberen und unteren Magnethalbschale aufnimmt. Die magnetischen Pole bestehen aus  $3 \times 30^\circ$  bogenförmigen Neodym-Eisen-Bor-Segmenten. Im geringfügig einstellbaren Luftspalt von 20mm stellt sich ein magnetisches Feld von 0,9T ein. Eine Magnetkreishälfte sowie die gesamte Drehachse mit 20mm Luftspalt zwischen den Magnethälften ist in Abbildung 18 verdeutlicht. Gut zu erkennen sind die je drei Einzelmagnete je Magnetpol.

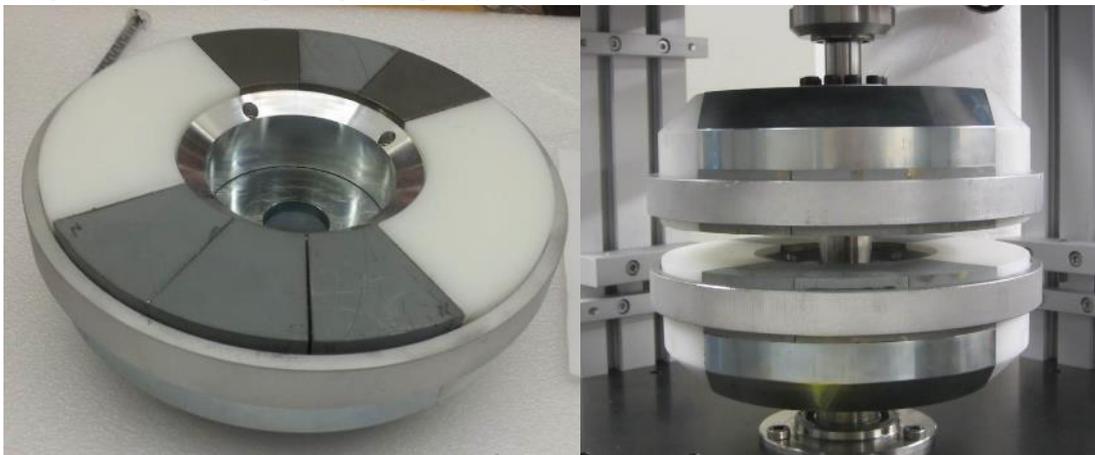


Abbildung 18: Eisenjoch mit  $3 \times 30^\circ$  Bogensegmenten je Pol, gegenüberliegende Pole auf drehbarer Welle

- **Antriebskonzept:** In gleicher Form ausgeführtes Basis-Modul nimmt einen leistungsstarken Elektromotor mit Getriebeuntersetzung auf. Eine ausrastende Sicherheitskupplung trennt im Überlastfall das Motormodul von den aktiven MC-Modulen. Eine inkrementelle Positionserfassung auf dem jeweils obersten Modul vervollständigt das Antriebskonzept. Das Motormodul sowie der inkrementelle Drehgeber sind in der Abbildung 19 aufgezeigt.

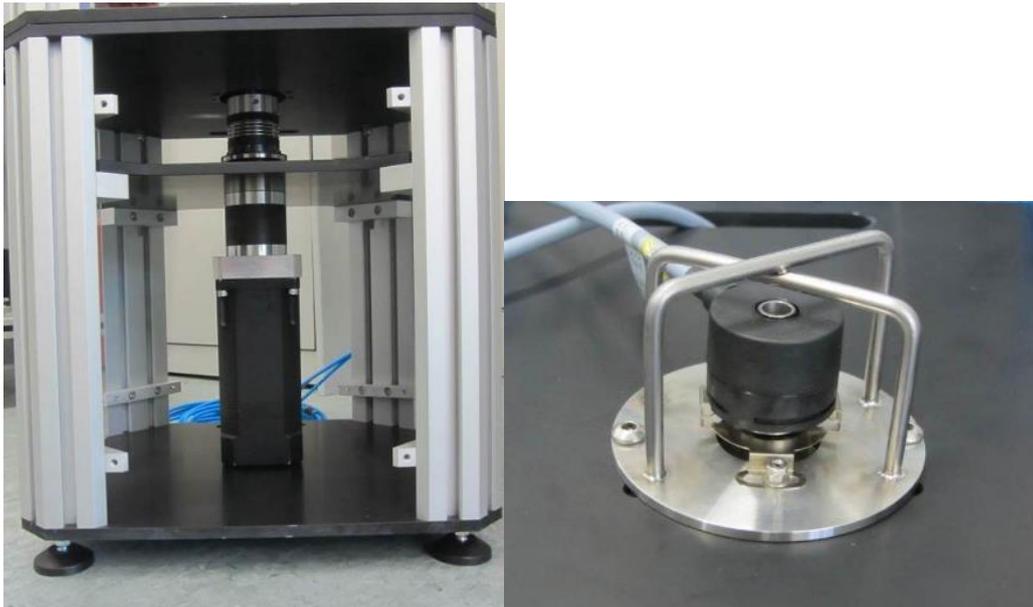


Abbildung 19: Basismodul mit Motor und Sicherheitskupplung, Positionsgeber

- MCE-Integration: Die zwischen den Magnethälften montierte Probenträgerplatte (Abb.20) vereint mehrere funktionelle Aspekte:
  - Aufnahme der aktiven Materialien in definierten Regeneratorbetten
  - Magnetfeldausnutzung durch zwei sich kreuzende Strömungskanäle
  - Isolation des Wärmeträgerfluids nach außen
  - Vorrichtung zur sicheren Montage und Justage bezüglich starken magnetischen Kräften
  - Anbindung der Fluidik an Peripheriegeräte
  - Druckfeste Abtrennung des Fluids nach außen
  - Integration von Druck- und Temperaturmesspunkten

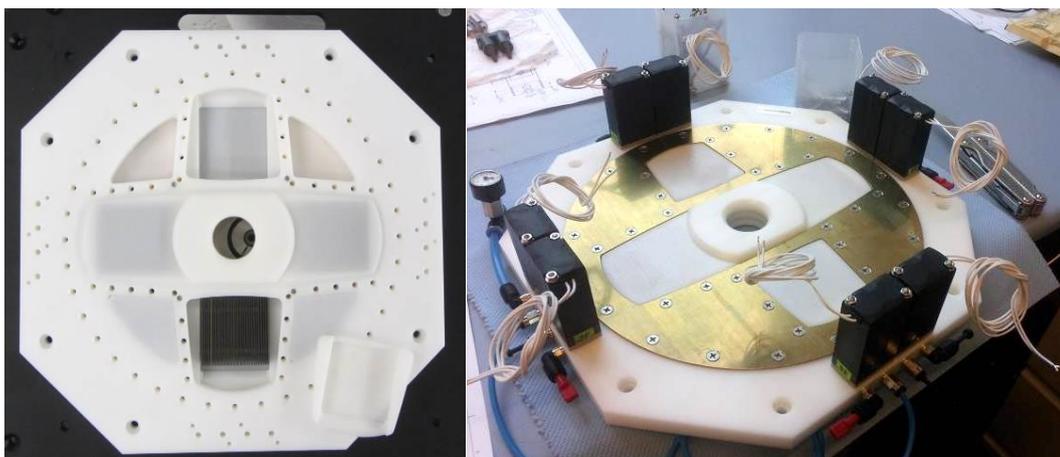


Abbildung 20: Probenträgerplatte mit einer von vier Proben; fertig montiert mit kleinen Ventilen



*Abbildung 21: Gadoliniumplatten zu Regeneratoren verbunden. Probengröße 50x50x15mm<sup>3</sup>*

Um einer stetigen Optimierung des Systems nachzukommen fanden anschließend Ventile größerer Bauart Verwendung.

- Zur Bereitstellung der fluidischen Strömung sowie Auskopplung der Kälteleistung entwickelte die Forschungstechnik ein Gestell, welches eine Druckluftmembranpumpe mit Pufferspeicher, isolierte Wärmetauscherbehälter, Messinstrumente und Regelventile aufnimmt. Die fluidische Verbindung zu den Ventilen am Demonstrator erfolgt mit isolierten Kunststoffschläuchen, je nach Betriebsmodus variabel.



Abbildung 22: links Fluidmanagement-Einheit, rechts angeschlossene MCE-Einheiten mit zwei aktiven Modulen

Zur Vervollständigung der gesamten Anlage wurden die Komponenten in ein Gestell aus Aluminiumprofilen eingefasst. Acrylglascheiben dienen dabei der Betriebssicherheit des Demonstrators (in Abb.22 und 23 entfernt zur besseren Sichtbarkeit). Ein Arbeitstisch mit der Steuerelektronik, einem Messrechner und der Datenerfassung ermöglicht die erfolgreiche Arbeit mit dem Demonstrator.



Abbildung 23: v.l.n.r.: Pumpeneinheit mit Wärmetauschern, MCE-Einheit mit zwei Modulen sowie Motormodul, Arbeitstisch mit Steuerbox und Messdatenverarbeitung

Der mechanische Aufbau erfolgte entsprechend den Fertigungsunterlagen ohne nennenswerte Einschränkungen. Weitreichende Erfahrungen der Mitarbeiter am IFW im Umgang mit Dauermagneten kam der Montage derselben trotz hoher auftretender Kräfte zugute. Die exzellente Fertigung der Einzelteile vereinfachte den Zusammenbau erheblich.

### II.1.6 Elektrotechnik (AP 4.5)

Um den zu erwartenden Drehmomentschwankungen während einer vollen Magnetdrehung begegnen zu können, nutzte die Abteilung Elektrotechnik zunächst ein Simulationsmodell zur groben Abschätzung. Auch konstruktiv wurden in den unmagnetischen Bereichen Eisenkerne vorgesehen, welche nicht aktiv am Prozess beteiligt sind, aber Drehmomentspitzen vermeiden. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Abbildung 24 dargestellt:

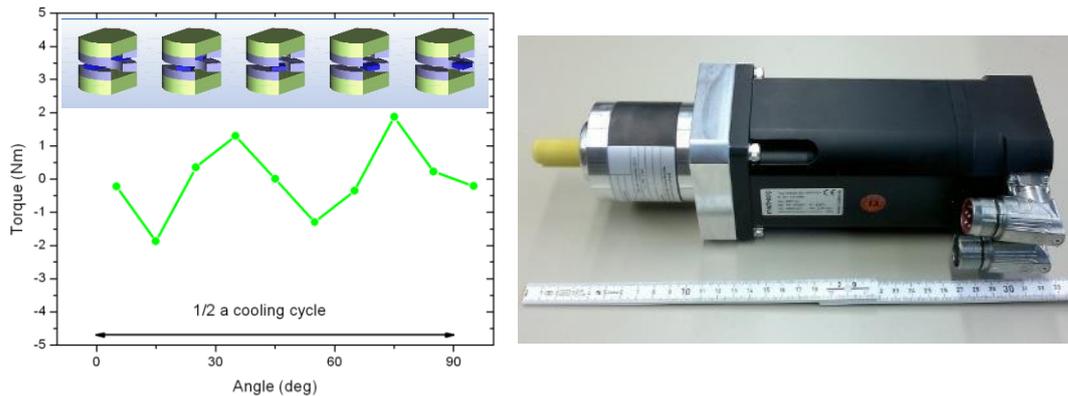


Abbildung 24: simulierter Drehmomentverlauf; Elektromotor mit Getriebe

Der gewählte Antriebsstrang wurde auf einen breiten Anwendungsbereich ausgelegt und die dazugehörige Steuerung in einer eigens dafür entwickelten Elektronik-Box untergebracht. Die softwareseitige Anbindung gewährleistet nun eine komfortable Bedienung des Motormoduls über den Messcomputer.

Neben der Bereitstellung verschiedener Steuer- und Betriebsspannungen nimmt die Elektronik-Box zusätzlich die neu entwickelte Leistungsabsenkung der Ventile auf. Dazu wurden Platinen diskret aufgebaut, welche die Erwärmung der schnell schaltenden Ventile im kontinuierlichen Betrieb auf ein Minimum reduzieren. Der Effekt ist in der Abbildung 25 deutlich zu erkennen: Der ursprüngliche Schaltstrom von 0,8A reduziert sich nach kurzer Zeit auf die Hälfte, solange das jeweilige Ventil geöffnet bleibt (hier über die Frequenzspanne von einem halben Hertz). Dadurch reduziert sich der gesamte elektrische Energieeintrag in das Ventil und damit die Erwärmung desselben. Das geschaltete Fluid wird infolgedessen thermisch kaum beeinflusst.

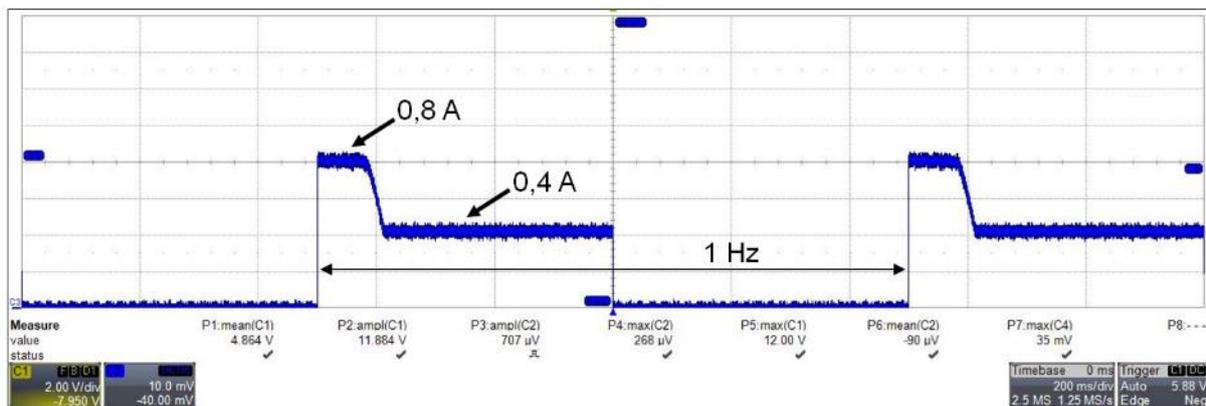


Abbildung 25: Stromverlauf eines Ventils während der Leistungsabsenkung bei 1Hz Prozessgeschwindigkeit

Die Umsetzung der vom Drehgeber auf dem oberen Modul zurückgemeldeten Rotation auf die richtige Schaltzeit und -dauer der einzelnen Ventile bedurfte umfangreichen Programmierarbeiten. Eine Eingabemaske (Abb. 26) stellt nun alle wichtigen Parameter übersichtlich dar und erlaubt vielfältige Einstellungen. Eine unmittelbare Einschätzung des laufenden Prozesses lässt Rückschlüsse auf die korrekte Arbeitsweise zu.

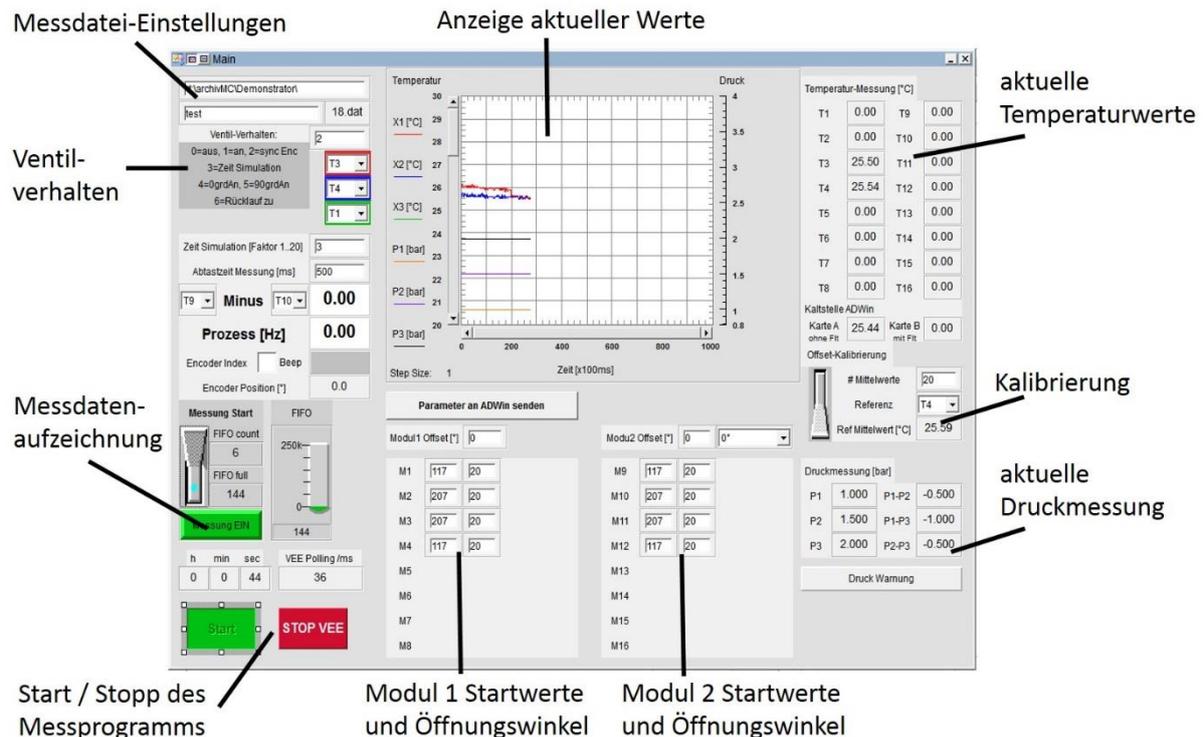


Abbildung 26: Steuersoftware: Eingabemaske und Anzeigen

Alle Betrachtungen zu Startpunkten (wann öffnet welches Ventil), Öffnungswinkel (wie lange bleibt ein Ventil offen) als auch Prozessgeschwindigkeiten sowie globale Ventilverhalten beziehen sich stets auf den aktuellen Drehwinkel eines Magnetpols zu einem definiertem Startpunkt. Diese einheitliche Nomenklatur ermöglicht gezielte Aussagen zu Flussmengen und Überschneidungen der Ventilöffnungszeiten. Eine Parametrisierung jedes Ventils ist somit unabhängig voneinander möglich.

Der Aufbau und die und Qualifizierung magnetfeldunabhängiger, schnell und präzise arbeitender Thermoelmente war ein weiterer Schwerpunkt für die elektrotechnische Umsetzung der aufgebauten Geräte.

## II.1.7 Messdatenerfassung und elektrischer Aufbau (AP 4.5, 4.6)

Zur Aufzeichnung aller Messdaten kommt eine Adwin-Echtzeit-Datenerfassung zum Einsatz. Diese wurde zunächst auf die Anforderungen angepasst. Neben Temperaturdaten werden die drei verbauten Druckmessumformer aufgezeichnet. Ein eingebundener Mess-Computer stellt dabei die Schnittstelle zum Benutzer dar.

Alle eingestellten Parameter und erzielten Messdaten werden in Textdateien abgespeichert und stehen einer Auswertung durch den Benutzer zur Verfügung. Ein Beispiel für eine solche Datei ist in Abbildung 27 dargestellt.

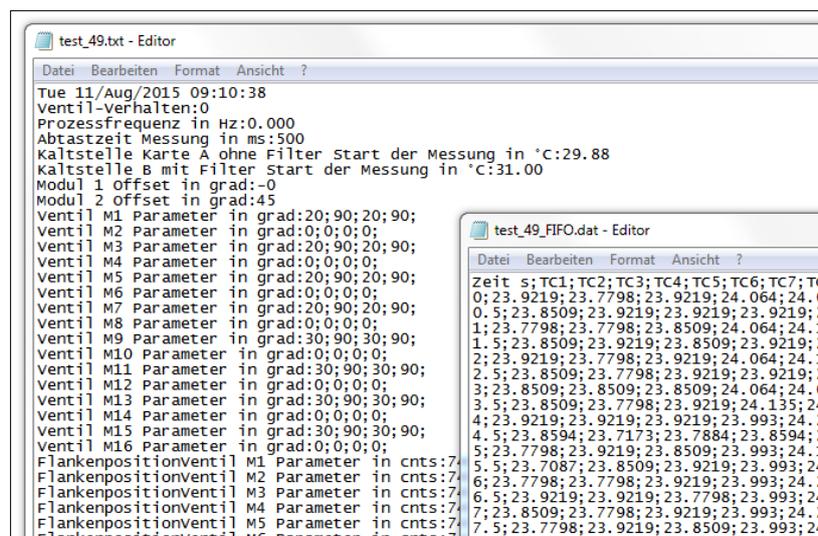


Abbildung 27: Parameterdatei und Messdaten

Zunächst wird eine Datei abgelegt, welche nützliche Informationen zu der jeweiligen Messung enthält. Hier werden die eingegebenen Ventilparameter sowie Temperatur und Druckwerte sowie deren Kalibrier-Offsets eingetragen. Eine zweite Datei enthält dann die eigentlichen Messwerte mit einem Zeitstempel.

Mithilfe von Excel oder anderen Programmen lassen sich nun gezielt Wertereihen auswerten und graphisch darstellen.

## II.1.8 Testläufe, Messungen und Funktionsdemonstration

### Abhängigkeit von Parametern

Um die in den Vorversuchen gewonnenen Betriebsparameter bewerten zu können, wurden diese zunächst als Startwerte verschiedener Messungen eingebracht. Einige Parameter erwiesen sich dabei als geräteabhängig und ließen sich nicht identisch übertragen. Beipielgebend seien hier das ausgetauschte Volumen je Hub sowie die eingestellte Arbeitsfrequenz genannt. Es wurden daraufhin Abhängigkeiten der Einzelparameter untereinander intensiver untersucht.

Um gleichbleibende Startbedingungen der Messungen zu gewährleisten, stand jeder Messung eine Ausgleichsphase voran. Hierbei wurde das Fluid für mindestens 10 Minuten ohne aktive magnetische Einflüsse durch den Demonstrator gefördert und dadurch gewährleistet, dass alle durchströmten Komponenten dieselbe Temperatur annehmen. Der MC-Effekt der eingesetzten Materialien zeigte seine höchste Performanz nahe Raumtemperatur.

### Arbeitsfrequenz

Zur Untersuchung der Prozessgeschwindigkeit und der jeweiligen Wärmeauskopplung wurde auf die erreichte Temperaturdifferenz in den Wärmetauscher-Gefäßen mit je 2l Wasser geachtet. Es ist für den Single-Shot-Betrieb (100% Volumenaustausch in den Proben) eine deutliche Abhängigkeit von der Prozessgeschwindigkeit erkennbar. Die optimale Prozessfrequenz blieb mit 0,1Hz hinter den eigenen Erwartungen zurück. Eine fluiddynamische Optimierung der ortsfesten Ventilanbindung ergab im Wesentlichen deutlich höhere Temperaturspreizungen sowie Prozessgeschwindigkeiten. Die nachfolgende graphische Darstellung beider Ausbaustufen verdeutlicht dies nachhaltig.

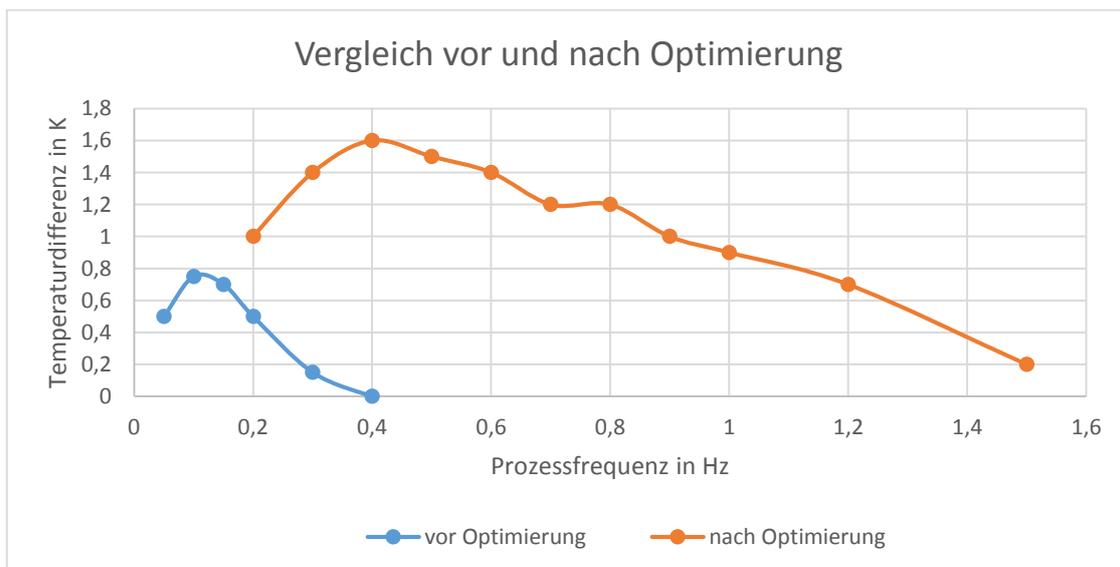


Abbildung 28: Gegenüberstellung der erzielten Temperaturdifferenzen zur Arbeitsfrequenz für Gadolinium

### Winkelversatz

Die Besonderheit des Demonstrators liegt darin begründet, flexibel in der Parameterauswahl zu sein. Unabhängig von der Magnetisierung der Proben lässt sich der Fluidstrom bezüglich Öffnungszeitpunkt, -dauer und der Volumenmenge je nach Fluidgeschwindigkeit unabhängig einstellen. Durch die Vielzahl von Parametrisierungen lassen sich somit Tendenzen erkennen und ideale Prozessfenster gezielter untersuchen.

Eine volle Umdrehung der Magnete entspricht 360 Winkelgrad und damit zwei Zyklen je Probenkanal. Für jeden Kanal mit den je zwei Proben ergeben sich daraus optimale Startwinkel. Diese bezeichnen den Versatz zwischen Probe und der aktuellen Magnetausrichtung. Der nachfolgende Graph in Abbildung 29 zeigt exemplarisch Tendenzen in Abhängigkeit vom Startwinkel.

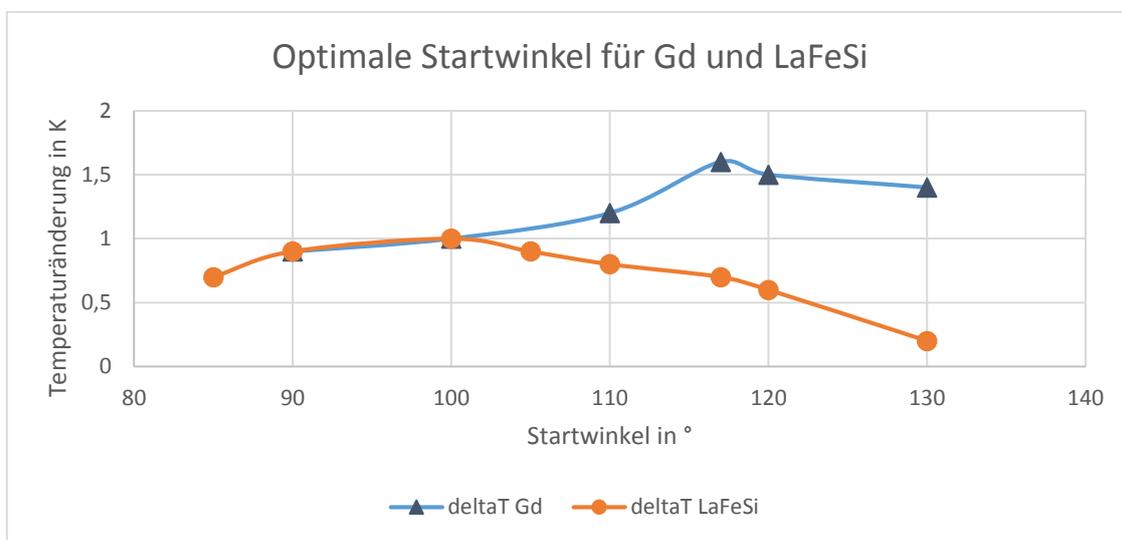


Abbildung 29: Untersuchung des optimalen Startwinkels

Für den derzeitigen Aufbau kann resümiert werden, dass zum einen der theoretisch errechnete Wert eines 117° Startwinkels für Gadolinium im Demonstrator den größten Effekt erzielt. Dieser Wert bezeichnet den Zustand, dass das Magnetfeld gerade die Probe vollständig verlassen hat und der Wärmeübergang in das Trägerfluid aufgrund der zeitlichen stoffseitigen Verzögerung nahezu vollständig erfolgt ist. Die Abbildung 30 verdeutlicht dies schematisch:

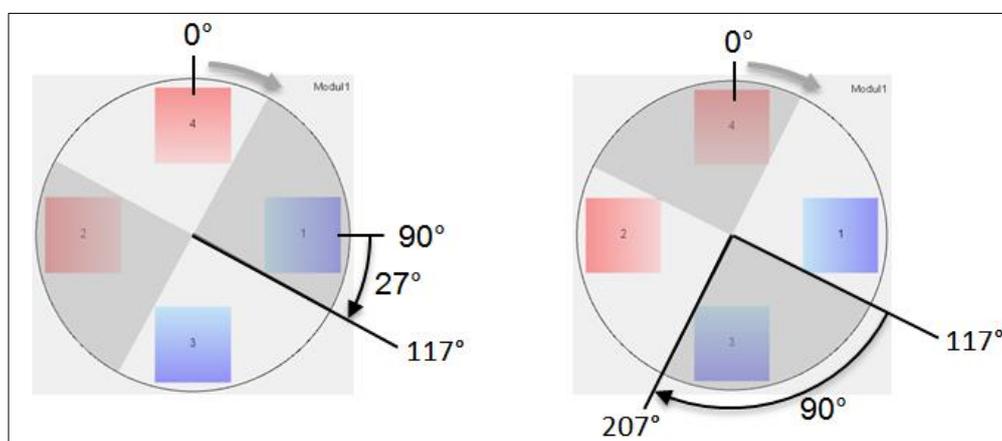


Abbildung 30: schematische Darstellung der Winkel-Verhältnisse.

Dieser optimale Wert kann als eine Art Materialkonstante für den vorliegenden Aufbau angesehen. Diese wurde in weiteren Messungen wiederholt bestätigt. Der geeignete Startwinkel für die eingesetzten Lanthan-Eisen-Silizium-Proben liegt im Kreislauf etwas früher (bei  $100^\circ$  Versatz zum Ursprung). Dies begründet sich durch eine leicht differierende Probenform als auch durch den Einsatz von Klebstoffen, welche das aktiven LaFeSi-Pulver binden. Das Gadolinium hingegen kommt ohne zusätzliche Stoffe zur mechanischen Stabilisierung aus. Die Mengenverhältnisse der aktiven Stoffe unterscheiden sich daher erheblich trotz annähernd gleicher Probengeometrie.

### Öffnungswinkel

Wie oben beschrieben lässt sich die Dauer der Kälte abführenden bzw. Wärme einbringenden steuern. Zu kurze Öffnungszeiten der Ventile verhindern einen vollständigen Temperatursausgleich; zu lange begünstigen eine nicht gewollte Vermischung mit nachfolgendem Fluid im Kreislauf. Für alle untersuchten Materialien erschlossen sich ähnliche Öffnungswinkel von  $35\text{--}45^\circ$  als ideal. Dieser Wert lässt sich je nach bekannter Prozessfrequenz und Strömungsgeschwindigkeit in einen anteiligen Volumenaustausch übertragen. Der hier in den Vorversuchen genannte ideale Wechsel der internen Flüssigkeit von ca.  $60\%$ vol wurde im Demonstrator bestätigt. Hierbei musste das Totvolumina zwischen den Proben in einem Kanal als auch zur Peripherie zugewandten Fluidseite mit einberechnet werden. Für die Probe selbst ergaben sich geringere Austauschverhältnisse von  $30\text{--}40\%$ vol.

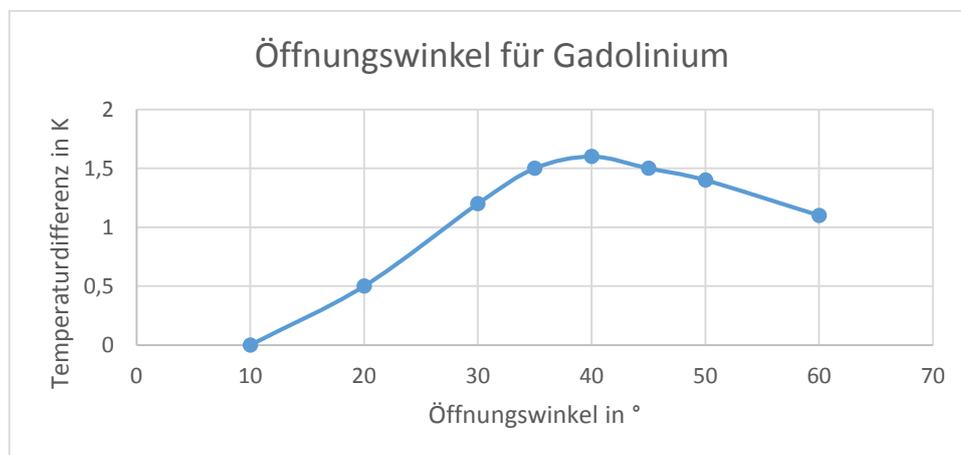


Abbildung 31: Abhängigkeit der Temperaturdifferenz vom Öffnungswinkel

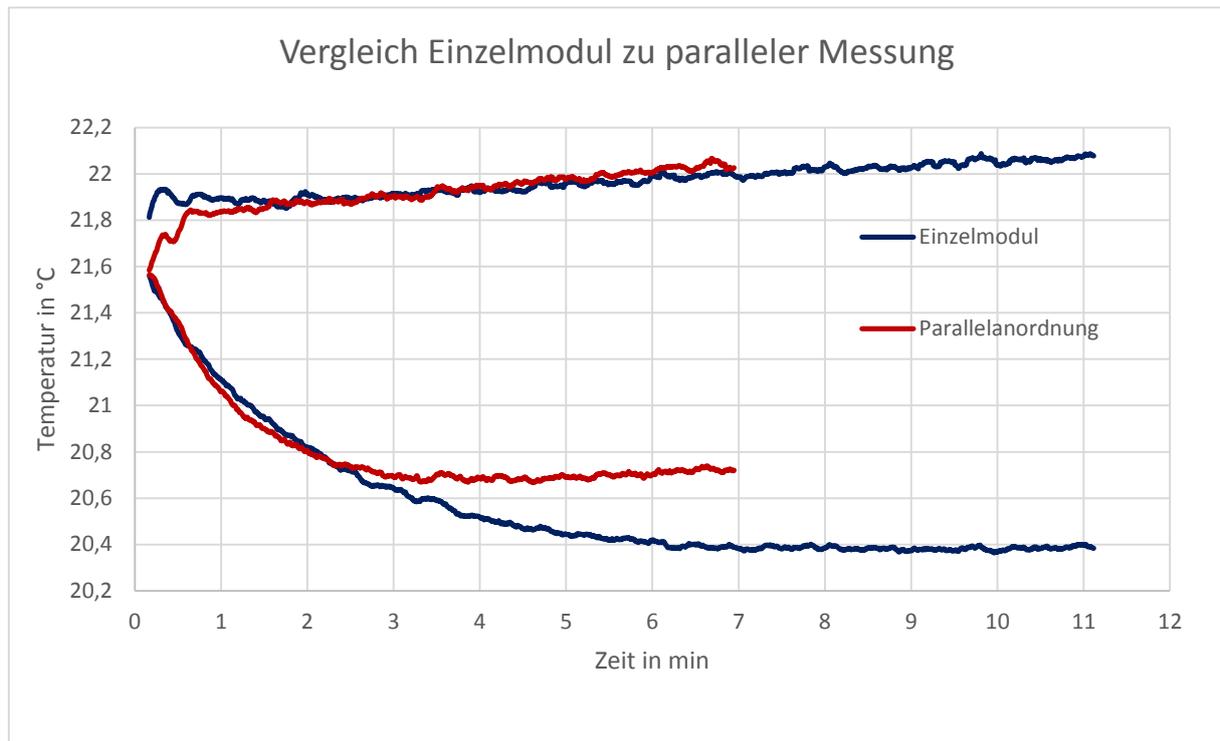
*Paralleler Betrieb von zwei Modulen*

Abbildung 32: Vergleich zwischen Einzelmessung und paralleler Modulanordnung

Es lässt sich aus Abbildung 32 feststellen, dass der Wärmeeintrag in den warmen Wärmetauscher zwar schneller erfolgt und sich ein Gleichgewicht einstellt (bereits nach 3 Minuten) ,der nominelle Wert der Temperaturänderung jedoch hinter der Einzelmodulmessung um ungefähr 0,3K zurückbleibt. Diese stellt erst nach 7 Minuten ein konstantes Temperaturniveau zur Verfügung. Grund dafür sind die zusätzlich zu verlegenden Leitungen, dem Mehrbedarf an Wärmeträgerfluid und den damit einhergehenden größeren thermischen Verlusten.

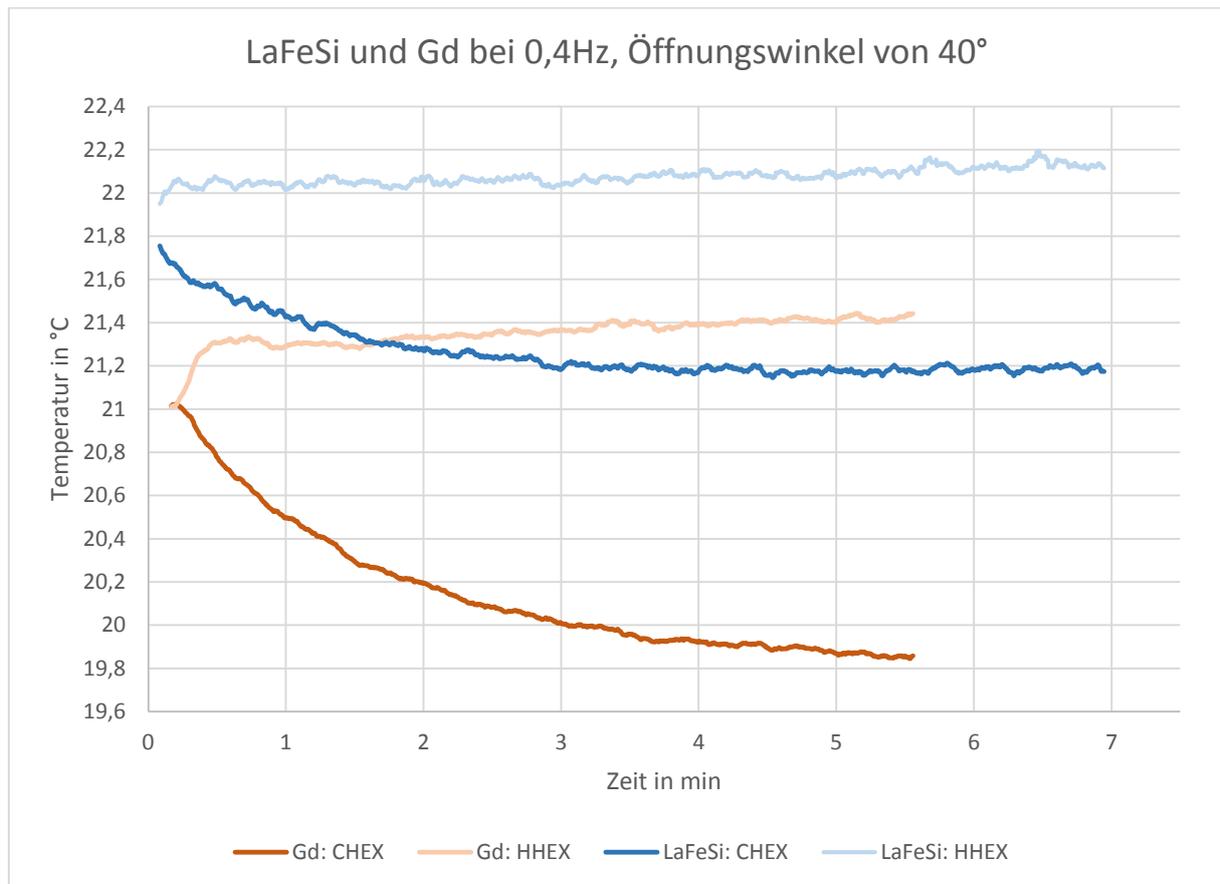
*Vergleich Lanthan-Eisen-Silizium zu Gadolinium*

Abbildung 33: Vergleich von Gadolinium zu Lanthan-Eisen-Silizium

Beide Materialien weisen in Abbildung 33 bei gleichen Prozessparametern einen qualitativ ähnlichen Kurvenverlauf auf. Der geringere Temperaturunterschied liegt darin begründet, dass das aktive LaFeSi- Material mit einem Epoxidkleber zu einem Komposit verarbeitet wurde. Bezieht man die erlangten Ergebnisse auf die Masse der aktiv wirkenden Stoffe, würde das Gadolinium schlechter abschneiden. Eine echte Alternative zum teuren Seltenerd-Metall Gadolinium stellt LaFeSi bisher nur unter Vernachlässigung der Massenbetrachtung dar.

### Kühlleistung

Das Ziel des Vorhabens war nicht, sich in Leistungsvergleiche mit anderen MCE-Maschinen einzureihen, sondern vielmehr eine fundierte Grundlage für die Entwicklung solcher Anwendungen zu bilden. Erst mit Kenntnis realitätsnaher Parameter kann eine Kühlmaschine bzw. Wärmepumpe einem Anwendungsfeld entsprechend ausgelegt werden. Dennoch ist während des Vorhabens eine Betrachtung der erzielten Leistungen vorgenommen worden. Diese sind beispielhaft für eine Messung hier rechnerisch dargestellt. Grundlage dafür bildet der Kurvenverlauf in Abbildung 34 zum betrachteten Zeitpunkt 300 Sekunden.

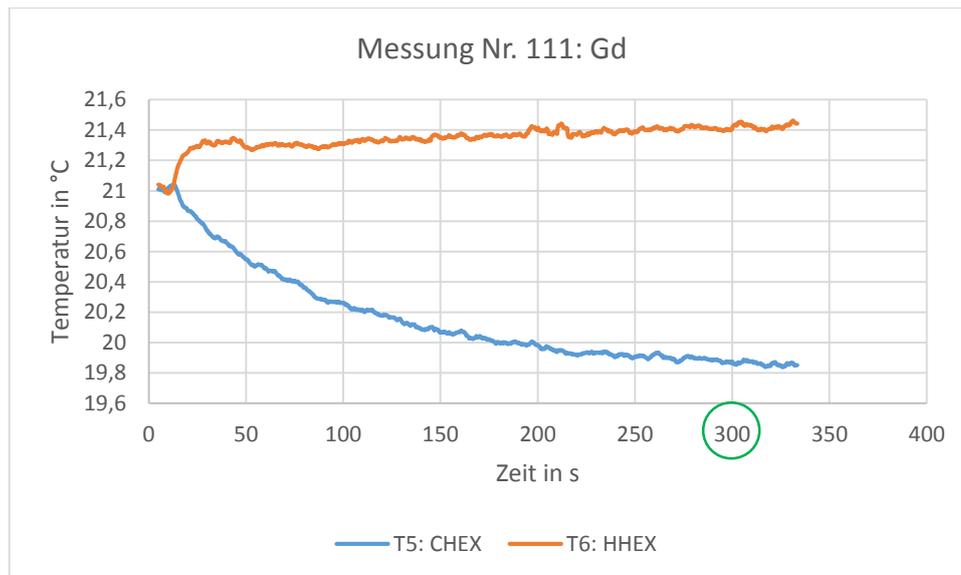


Abbildung 34: Messergebnis zur Leistungsberechnung

Zur Abschätzung einer ausgekoppelten Wärmemenge eines Moduls lässt sich vereinfacht folgende Gleichung heranziehen:

$$Q = m * c * \Delta T$$

m...Masse der erwärmten/ abgekühlten Flüssigkeit

c... spezifische Wärmekapazität (Wasser: 4,186 kJ/kg\*K)

$\Delta T$ ...Temperaturänderung

Für die in Abbildung 34 aufgezeigten Werte gilt zum Zeitpunkt 300s: T5= 19,85°C, T6=21,4°C. Die Starttemperatur des Prozesses beträgt 21°C. Es ergeben sich demzufolge für die kalte Seite eine Erniedrigung von 1,15K und für die warme eine Erhöhung um 0,4K. Zur Erwärmung der im Wärmetauscher befindlichen 2l Wasser wird nach obiger Gleichung eine Wärmemenge von 3,5kJ bereitgestellt. Unter Beachtung des zeitlichen Regimes ergibt sich eine Wärmeleistung von 11,1W.

Die gleiche Betrachtung liefert für die kalte Seite des Fluidkreislaufes einen Kältestrom von 3,2W für ein Modul.

Aufgrund dessen, dass der MC-Effekt sich stofflich symmetrisch ausbildet, muss davon ausgegangen werden, dass die Differenz von 7,9W durch den anteiligen Energieeintrag von

außen zur Erwärmung der Wärmetauscher beiträgt. Dies beinhaltet sowohl den Druckluft-Eintrag, die elektrisch eingebrachte Wärme der acht Ventile und die Leistung des Motors zur Überwindung der magnetischen Anziehungskräfte und mechanischen Reibungen.

Die Erfassung der elektrischen Leistungsaufnahme ergab für das Gesamtsystem und die Untersysteme folgende Verteilung:

*Tabelle 5: Aufgezeichnete Leistungswerte des Demonstrators*

Lastfall	Leistungsaufnahme
Grundlast PC und Steuerbox	55,2W
Motor-Regler	23W (1,5Hz Prozessgeschwindigkeit)
Ventilsteuerung	151,8W (alle 8 Ventile offen)

Über einen Zeitraum von mehreren Stunden wurden Messreihen durchgeführt, die einen Einfluss der umgebenden Komponenten auf die Wärmebilanz aufzeigen. Die separat betrachtete Motordrehung war nicht wärmetechnisch nachweisbar. Ebenso verhielt es sich mit den Ventilen im lastabgesenkten Betrieb. Der Aufwand dieser Entwicklung hat sich als lohnenswert herausgestellt.

Wichtig ist es zu erwähnen, dass vorallem der größte Energieeintrag der Ventilsteuerung in zukünftigen Maschinen in einem definiertem Einsatzgebiet durch den Einsatz z.B. von Kurvenscheiben vollständig eliminiert werden kann.

Eine Betrachtung eines oft angeführten COP-Wertes („Coefficient of Performance“) erscheint angesichts des aufgewandten Energieaufwandes für die individuelle Steuerung wenig sinnvoll.

Der energetische Eintrag der Druckluft zur Förderung des Wärmeträgerfluids beträgt einen einstelligen Watt-Betrag. Somit ist über den Einsatz von Druckluftpumpen als generelle Alternative zu elektrischen Pumpen intensiver nachzudenken. Dieser Ansatz gilt allerdings nicht für zukünftige Haushaltsgeräte, da hier eine gewisse Lärmbelastung zu verzeichnen war.

### *Umkehrbarkeit des Prozesses*

Zur Nutzbarmachung magnetokalorischer Anlagen stellt die Umkehrbarkeit des Prozesses besonders für die Klimatechnik in Gebäuden eine wesentliche Eigenschaft dar. Hier sind geringe Temperaturspreizungen üblich und die Prozesse laufen vergleichsweise langsam ab.. Untenstehende Abbildung 35 zeigt die per Software eingeleitete Umkehrung des Prozesses zum Zeitpunkt 450s und 1100s.

Es ist somit nachgewiesen, dass der Demonstrator sowohl als Kältemaschine als auch als Wärmepumpe betrieben werden kann.

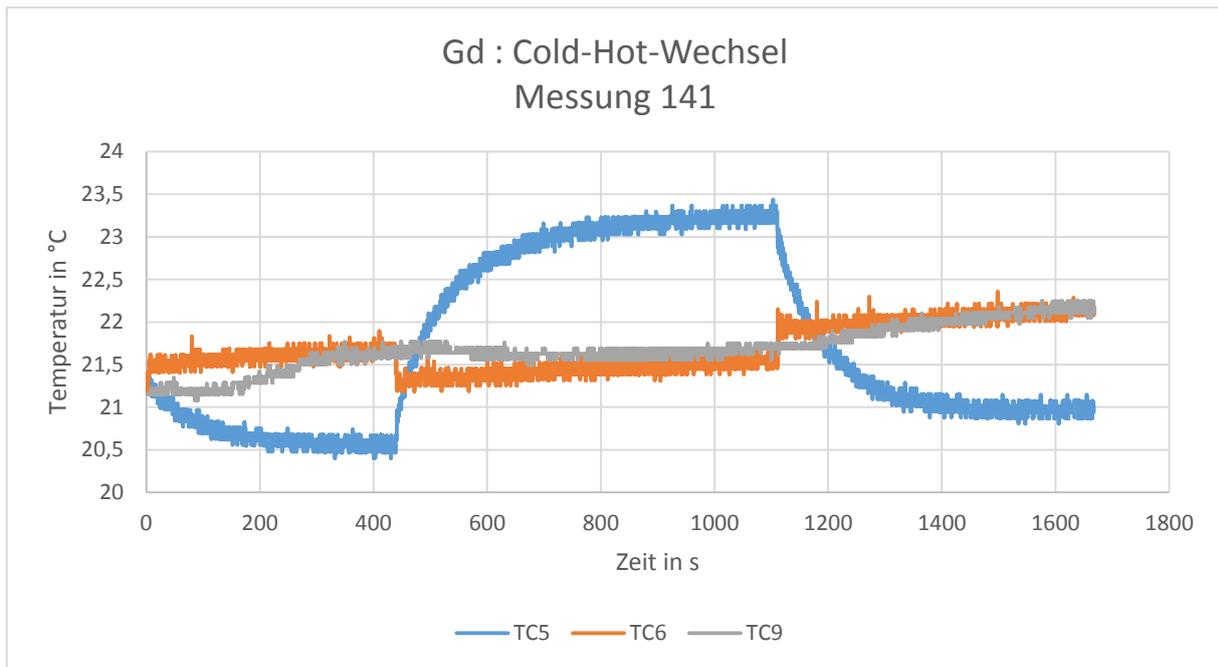


Abbildung 35: Umkehrbarkeit des Prozesses

### II.1.9 Weiterführende Arbeiten

Im Zuge der Vorstellung des Projektes im Haus als auch auf Tagungen und Konferenzen wurde ein handlicher Demonstrator entwickelt, welcher das Prinzip des magnetokalorischen Effektes qualitativ darstellt. Das populäre Prinzipmodell beinhaltet eine kleine Probe Gadolinium, über die ein Eisenjoch mit Dauermagneten bewegt werden kann. Eine Digitalanzeige lässt ein Gefühl für die zeitlichen Abläufe der Temperaturen bekommen.

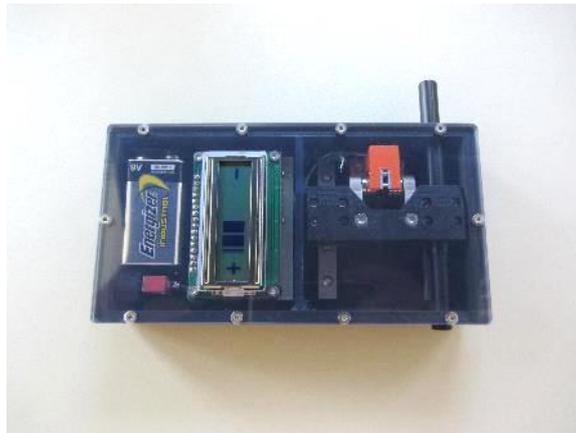


Abbildung 36: Populärmodell zum Magnetokalorischen Effekt

### II.1.10 Technologietransfer

Bereits während des Aufbaus als auch während der durchgeführten Messungen konnten mehrere Industrievertreter den Demonstrator als auch die Vorversuche begutachten. Zumeist waren dies Hersteller von Kühl –und Heizgeräten aus unterschiedlichen Branchen. Der noch auf Forschung ausgelegte Demonstrator konnte oft noch nicht die äußerst hohen, von den Medien beeinflussten positiven Erwartungen der Gäste entsprechen, so dass zunächst keine Industriekooperation zustande gekommen ist. Es gibt dennoch wiederholt Anfragen seitens der Industrie nach dieser Technologie. Auf wissenschaftlicher Seite kristallisierte sich ein zugeschnittener Anwendungsbereich heraus. Die technische Gebäudeausrüstung bedarf oft nur geringer Temperaturdifferenzen bei gleichzeitig langsam verlaufenden Prozessen. Hier wurde in Kooperation mit der TU Dresden ein Projekt initiiert und bewilligt, „SOMAK – solare magnetische Klimatisierung von Gebäuden“, welches im Februar 2016 starten wird und ganz wesentlich auf die Erfahrungen und Ergebnisse mit dem Demonstrator aufbaut.

Der Demonstrator steht weiterhin der TU Darmstadt zu Qualifizierung neuartiger Proben uneingeschränkt zur Verfügung.

### II.1.11 Zusammenfassung

Aus dem Projektziel der Weiterführung von Erforschung und Anwendung des magnetokalorischen Effektes generierte sich für das IFW die praktische Demonstration der Vervielfachung sowie Umkehrung der Temperaturänderung.

Ganz wesentlich wurden alle apparativen Arbeiten für vielfältige Vorversuche als auch zur Zielkonstruktion in Form eines MCE-Demonstrators vom IFW erfolgreich durchgeführt.

Nach umfangreichen theoretischen und kalkulatorischen Betrachtungen zum Magnetfeld, flossen diese Erkenntnisse direkt in die Entwicklung eines Zyklerteststandes ein. Hierbei wurden Proben in kurzer Zeit mit mehreren Millionen Magnetfeldwechseln beaufschlagt und eine Aussage zu mechanischer und magnetokalorischer Stabilität erzielt. Durch diese eigenerrichtete Versuchsanlage konnte außerdem das Magnetkonzept für den Demonstrator bestätigt und optimiert werden.

Neben dem oft zitierten üblichen Referenzmaterial Gadolinium wurden mit apparativer Unterstützung aus dem IFW Lanthan-Eisen-Silizium-Proben gefertigt. Diese Materialkomposition genießt aufgrund vielversprechender Ansätze weltweit die höchste Aufmerksamkeit auf der Suche nach ökologisch vertretbaren und kostengünstigen Ersatzmaterialien. In nachfolgenden Untersuchungen wurden umfangreiche Testreihen zum effizienten Wärmetausch an das geeignetste Übertragungsmedium und zur bestmöglichen Probengeometrie absolviert. Die apparative Grundlage dazu stellt die thermische Testanlage des IFW dar. Eine Steigerung des technischen Aufwandes gegenüber dem Zyklierer zeigt sich in umfangreicher Sensorik und einem eigenen Messprogramm. Durch realitätsnahe Versuche im Feld eines starken Elektromagneten wurden wichtige Erkenntnisse für die Gestaltung des Probenmoduls im Demonstrator gewonnen. Die angewendete Probengeometrie in Form von dünnen stehenden Platten längs zur Durchströmungsrichtung erzielte sehr geringe Druckverluste über der Probe und homogene Strömungen sowie schnelle Temperaturübergänge vom Material in das Wärmeträgerfluid und umgekehrt. Diese Geometrie fand auch im Demonstrator Anwendung

Der im IFW Dresden in Betrieb genommene MagKal-Demonstrator ermöglicht eine Vielzahl an Variationen von Parametern des magnetokalorischen Prozesses. Beispielgebend seien hier Durchfluss, Öffnungsverschiebung und Prozessgeschwindigkeit des fluiddynamischen Systems genannt. Der modulare Aufbau bietet neben der Erweiterungsperspektive die Option für seriellen bzw. parallelen Betrieb der Module. Die universellen Probenkammern der Module erlauben eine Untersuchung verschiedener Probengeometrien und /oder -materialien. Alleinstellend für diesen Demonstrator, können alle Parameter im Kühl- und Wärmepumpenbetrieb gefahren werden. Somit verschafft die Breite der Versuchsparameter dem Demonstrator einen unikalen Status. Der Demonstrator ist somit als Vorstufe eines jeden MCE-Gerätes zu verstehen, da hier wesentliche Prozessparameter auf ein bestimmtes Anwendungsfeld untersucht und eingestellt werden können.

Eine praktische Anwendung des erstellten Demonstrator ergibt in seiner Leistungsklasse vielversprechende Ansätze für die ökologisch und energetisch optimierte technische

Gebäudeklimatisierung auf, da hierbei vergleichsweise langsame Prozesse mit geringerer Temperaturdifferenz Anwendung finden.

Es wird erwartet, dass es auf der Grundlage der Projektergebnisse gelingt, industrielle Kooperationspartner zur Weiterentwicklung in Richtung kommerziell verwertbarer Produkte zu gewinnen.

## II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 6: Wichtigste gekaufte Komponenten und deren aktuelle Verwendung gemäß Belegliste

Lfd.Nr.	Datum	Lieferant	Bezeichnung	Verwendung
6	28.03.2013	CRM	Gadolinium-Platten	verarbeitet
7	26.04.2013	Julabo	Kälte-Umwälzthermostat, Magnetventil-Set	an TU DD geliehen
30	27.09.2013	SIEMENS	Simatic Zentralbaugruppe mit 384 kB Arbeitsspeicher, Digitaleingabe, Digitalausgabe, Analogeingabe, Analogausgabe, PB-Stecker, Simatic HMI Comfort Panel	in Gebrauch
36	15.10.2013	JÄGER	Temperaturmesskarte Pro-II-Aln-F-8/18-L2	in Gebrauch
38	30.10.2013	IBS	NdFeB-Rohblockabschnitte aus Vacodym	verarbeitet
45	21.11.2013	IBS	NdFeB-Rohblockabschnitte aus Vacodym	verarbeitet
52	03.12.2013	Rehken	Werkzeugstahl, Alu rund, Kupfer rund, Messing rund, Bronze rund	verarbeitet
53	10.12.2013	SIEMENS	Kommunikationsprozessor, Hutschienenhalterung	in Gebrauch
55	17.12.2013	MATTKE	Bürstenloser Servomotor mit Resolver, Planetengetriebe, Digitaler 4Q-Servoregler	in Gebrauch
62	30.04.2014	National Instr.	Compactdaq Chassis, 16-Bit Analog Input Module	in Gebrauch
77	12.06.2014	WAGNER	Digitaler Massedurchflussmesser, Regelventil	in Gebrauch
84	17.07.2014	Dubrau	Fujitsu Computer PCIE X1 zur Ansteuerung des Demonstators	in Gebrauch
92	10.10.2014	BÜRKERT	Magnetventil mit Medientrennung	in Gebrauch
101	23.10.2014	Durdel	Verstärkungsplatte Regenerator, Trägerplatte	in Gebrauch
103	30.10.2014	Durdel	Grundgestell, Aufnahmebacke	in Gebrauch
119	25.06.2015	ZACHER	Gestellbausatz	in Gebrauch
121	26.06.2015	Kunststoff- Technik	Rundstab aus PEEK-natur, Stab Ketron-Peek, Stab PTFE-virig.	verarbeitet
123	30.06.2015	HAM-LET	Ger. Verschraubungen, Einschrauber, Klemmringsatz, Anschweisadapter, Winkelverschraubung, T-Verschraubung	in Gebrauch

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Geleistete Arbeiten ordnen sich den Aufgabenstellungen vollständig unter:

### *Maximierung der Magnetfeldstärke*

Die Verwendung von Dauermagneten für magnetokalorische Prozesse gilt in der Literatur als Standard und weist gegenüber Elektromagneten einen wesentlich geringeren Energieaufwand zur Erzeugung eines Magnetfeldwechsels auf. Das IFW Dresden konnte auf die langjährigen Erfahrungen im Umgang mit Magnetwerkstoffen und deren Wechselwirkungen aufbauen und ein sicheres sowie leistungsstarkes Magnetfeld realisieren.

### *Festlegung der Geometrie*

Moderne Simulationssoftware erlaubt es, die Auswahl eines geeigneten Magnetmaterials, der optimalen Größe und Geometrie gemäß den Anforderungen an eine Zielkonstruktion rechenstechnisch darzustellen. Das IFW Dresden hat diese Werkzeuge genutzt und das Magnetsystem hinsichtlich Form, Energiegehalt und Kosten optimiert und aufgebaut.

### *Konzeptentwicklung*

Bisher bekannte magnetokalorische Maschinen stellen für sich nach außen abgeschlossene Geräte oder Vorrichtungen dar. Ein Novum auf diesem Forschungsgebiet ist eine modulare, offene Bauweise. Zudem lag der Fokus auf der individuellen Parametrisierung der untersuchten Materialien und der Umkehrbarkeit des Prozesses in einem Gerät. Dieser Ansatz ist umgesetzt worden und lässt sich mit weiteren Modulen (mit z.B. anderen Materialien) künftig ergänzen.

### *Konstruktion und Bau von Testanlagen für AP1 und AP3*

Das IFW hat besonders zu Beginn des Vorhabens mit Entwicklung und Bereitstellung mehrerer Vorversuchsapparaturen für frühzeitige Erkenntnisse zu Funktionsweise, Effektivität und Materialeigenschaft, Verhalten gegenüber Magnetfeldern und thermische Spezifikationen einen wertvollen Beitrag geleistet. Beispielgebend hierfür sind der Zyklierer und der thermische Teststand genannt. Dieses Wissen ist zu großen Teilen in die Konzeption des Demonstrators eingeflossen.

### *Konstruktion*

Für eine Nutzbarmachung des magnetokalorischen Effektes ist stets ein schneller und betragsmäßig hoher **Wechsel des Magnetfeldes** gegenüber dem aktiven Material realisiert worden. Zwei sich zugewandte Magnethalbkreise rotieren auf einer gemeinsamen Welle ober- bzw. unterhalb der Probe und erzeugen ein Magnetfeld von 0 bis 0,9T.

Die Drehbewegung dafür stellt ein von Mitarbeitern der Abteilung Elektrotechnik dimensionierter Elektromotor zur Verfügung. Dieser kann hinsichtlich Leistungsfähigkeit in aktueller Ausführung bis zu 4 Module gleichzeitig antreiben.

Für eine Ausnutzung der im aktiven Material entstandenen Temperaturdifferenz ist eine **Übertragung der Temperatursprünge auf ein Wärmeträgerfluid** die beste Möglichkeit. Um weitgehend verlustfreie Übergänge in das Trägermedium zu gewährleisten, wurden Aspekte der Regeneratorgeometrie, Größe, Einbaulage, Isolation und Strömungseigenschaften nach Kriterien bewertet und konstruktiv umgesetzt.

Das Wärmeträgermedium muss, nachdem es mittels des MCE am aktiven Material erwärmt bzw. abgekühlt worden ist, zu einer Stelle geleitet werden, an der die Wärme entzogen bzw. die Kälte genutzt werden kann. Hierzu erweist es sich als signifikanter Vorteil, vielfältige Strömungsszenarien im Demonstrator zu ermöglichen. Das umgesetzte **Fluidmanagementsystem** mit schnell schaltenden elektrischen Ventilen erlaubt beliebig flexible Anpassungen. Konstruktiv wurden die isolierten **Wärmetauscher**, Pumpe und Druckausgleichsgefäß sowie Messinstrumente in einem gemeinsamen Pumpenstand integriert.

Eine vollständige und hocheffiziente **Isolation** verhindert größere Verlusteffekte des vergleichsweise geringen Temperaturänderung durch das aktive Material. Hierzu wurde auf handelsübliche Leitungsisolation und Dämmmatten zurückgegriffen und großer Wert auf die übrige Materialauswahl gelegt. Direkt durchströmte Komponenten bestehen aus sehr schlecht wärmeleitenden Kunststoffen und sind überdies gegenüber einer großen Auswahl verschiedener Wärmeträgerfluide resistent.

### *Mechanischer Aufbau*

Nach Erstellung aller notwendigen Fertigungsunterlagen und nach Zulieferung von Komponenten (z.B. Pumpe, Antriebsmotor) erfolgte die mechanische Fertigung zum großen Anteil in der Werkstatt des IFW. Hier erwiesen sich die kurzen und direkten Wege zur individuellen Absprache als äußerst vorteilhaft. Auch der umfangreiche Maschinenpark ermöglichte es, dass nur wenige Komponenten extern in Auftrag gegeben werden mussten.

### *Elektrotechnik*

Zur Dimensionierung der notwendigen **Antriebsleistung** des Demonstrators als auch des thermischen Teststandes aus den Vorversuchen führten Simulationen zur Abschätzung auftretender Drehmomente. Die eingebrachte Antriebsleistung der gewählten Motoren verfügt dabei über Reserven für eine sichere und gleichmäßige Rotation im Demonstrator bzw. Kolbenbewegung im thermischen Versuchsstand.

Die gezielte, aber variable Steuerung des **Wärmeträgerfluides** mithilfe von elektrischen Ventilen bedurfte einer angepassten Ansteuerung. Damit jeglicher unnötige Wärmeeintrag der elektrischen Spulen in den Ventilen auf das direkt

angrenzende Fluid möglichst gering ausfällt wurden diskrete Schaltungen zur Leistungsabsenkung entwickelt und aufgebaut. Die elektrischen Hubankerventile ziehen mit voller Leistung an, reduzieren anschließend aber den elektrischen Strom zum Halten des errichteten Zustandes. Dadurch ist kein thermischer Energieeintrag auf das Wärmeträgerfluid nachweisbar.

### *Messdatenerfassung*

Die im Demonstratorinneren geringen zu erwartenden **Temperaturänderungen** konnten mittels am IFW entworfenen hochempfindlichen und magnetfeldunabhängigen Thermoelementen aufgezeichnet werden. Dies geschieht an bis zu 8 Messpunkten je Modul. Weiterhin wird am Demonstrator als auch am thermischen Teststand ununterbrochen die momentane Position der elektrischen Motoren aufgezeichnet. Dies gestattet einen Rückschluss auf den aktuellen Prozess und ermöglicht Regelschleifen. Insgesamt drei Druckmessumformer integrieren sich an beliebiger Stelle im Fluidkreislauf und geben Rückschluss auf **Druckverluste** über einzelnen Strömungsabschnitten.

Aufbereitet, verarbeitet und präsentiert werden diese Rohdaten in einem eigens geschaffenen Benutzerprogramm für den Messcomputer. Von hier erfolgt auch die Übertragung der eingestellten Ventilparameter.

Die elektrische Leistungsaufnahme konnte für verschiedene Betriebsmodi dokumentiert werden.

Die ermittelten Datensätze aus über 180 Messungen erlauben einen Rückschluss auf die Kühlleistung und die Effizienz der Anlage allgemein.

### *Elektrischer Aufbau*

Neben der Verkabelung der Ventile, Thermoelemente und Drucksensoren sowie der Antriebsaggregate stellt die Bereitstellung jeweils notwendiger Versorgungsspannungen, und die gewünschte Ansteuerung dieser Komponenten die wesentliche Aufgabe an die Elektrotechnik dar. Hierbei ist ein sicherer Aufbau in einer zu entwerfenden kompakten Steuerbox gegenüber einzelnen Komponenten bewerkstelligt worden. Für die Auswertung aller wichtigen Daten ist ein Messrechner ins System integriert.

### *Testläufe, Messungen und Funktionsdemonstration*

Die Charakterisierung der eingesetzten Proben erfolgte mit zunächst in den Vorversuchen ermittelten Parametern. Der signifikante Vorteil des Demonstrators bewies sich anschließend in der Variation einzelner Parameter oder ganzer Parametersätze. Somit konnten ideale Arbeitspunkte gezielt herausgefunden und Abhängigkeiten aufgezeigt werden.

Die Umkehrbarkeit des Kreislaufes wurde mit allen eingesetzten Materialien bewiesen.

## II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Forschungsergebnisse als auch die im Projekt entstandenen Geräte und Apparaturen sollen im Sinne der Wissenschaft weiter vertieft und genutzt werden. Der Demonstrator ist für eine Nutzung an der TU Darmstadt (ehemals Arbeitsgruppe Gutfleisch am IFW) zur Charakterisierung weiter entwickelter Proben auf Tauglichkeit und Performance vorgesehen. Der thermische Teststand verbleibt aufgrund der Interimsnutzung des elektrischen Magneten am IFW und steht der Forschung zur Verfügung. Gleiches gilt für den Zyklier-Teststand.

## II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Es sind während der Laufzeit keine wesentlichen Fortschritte von dritter Seite bekannt geworden, die zur Änderung der Aufgabenstellung und Planung des MagKal-Projektes geführt hätten.

## II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- „J.D. Moore et al, Selective Laser Melting of La(Fe,Co,Si)<sub>13</sub> geometries for magnetic refrigeration, Journal of Applied Physics, 114 043907 (2013)“.
- Vorstellung des Verbundprojektes auf der Thermag VI Konferenz in Victoria, Kanada 2014 „From Material Science To Operating Magnetocaloric Effect Machine“

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel MagKal Neuartige magnetokalorische Maschine für Kühl- und Heizanwendungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Lindackers, Dirk Voigtländer, Ralf Grasemann, Samuel Seidemann, Torsten	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juni 2015
	6. Veröffentlichungsdatum 31.12.2015
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  IFW Dresden Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden Helmholtzstraße 20 01069 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 13-035
	10. Förderkennzeichen 03V0157
	11. Seitenzahl 48
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben -
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 36
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Aus dem Projektziel der Weiterführung von Erforschung und Anwendung des Magnetokalorischen Effekts (MCE) generierte sich für das IFW die praktische Demonstration der Vervielfachung sowie Umkehrung der Temperaturänderung.</p> <p>Grundlegend wurden Arbeiten zur Optimierung von Magnetfeld, Probenform und Wärmetausch zwischen MCE-Material und Fluid vorangestellt. Nach umfangreichen theoretischen und kalkulatorischen Betrachtungen zum Magnetfeld, flossen diese Erkenntnisse direkt in die Entwicklung eines Zyklensimulators ein. Durch diese eigenerrichtete Versuchsanlage konnte das Magnetkonzept für den Demonstrator bestätigt und optimiert werden.</p> <p>Neben dem quasi Referenzmaterial Gadolinium wurde mit apparativer Unterstützung aus dem IFW Lanthan-Eisen-Silizium-Proben gefertigt. In nachfolgenden Untersuchungen wurden umfangreiche Testreihen zum effizienten Wärmetausch vom MCE-Material an das geeignetste Übertragungsfluid und zur bestmöglichen Probengeometrie absolviert. Die apparative Grundlage dazu stellt die thermische Testanlage des IFW dar. Eine Steigerung des technischen Aufwandes gegenüber dem Zyklierer zeigt sich in umfangreicher Sensorik und einem eigenen Messprogramm. Durch realitätsnahe Versuche im Feld eines starken Elektromagneten wurden wichtig Erkenntnisse für die Gestaltung des Probenmoduls im Demonstrator gewonnen.</p> <p>Der im IFW Dresden in Betrieb genommene MagKal-Demonstrator ermöglicht eine Vielzahl an Variationen von Parametern des magnetokalorischen Prozesses. Beispielgebend seien hier Durchfluss, Öffnungsverschiebung, Taktzeit, ... genannt. Dieses Konzept erlaubt neben der Erweiterungsperspektive die Option für seriellen bzw. parallelen Betrieb der Module. Die Probenkammern der Module erlauben eine Untersuchung verschiedener Probengeometrien und /oder –materialien. Darüber hinaus können für diesen Demonstrator alle Parameter im Kühl- und Wärmepumpenbetrieb gefahren werden. Somit verschafft die Breite der experimentell beeinflussbaren Versuchsparameter dem Demonstrator einen unikal Status. Diese Eigenschaften sind die wesentlichen Alleinstellungsmerkmale des im MagKal-Projekt entwickelten Demonstrators.</p> <p>Vielversprechende Ansätze zur Anwendung des erstellten Demonstrators gibt es für die ökologisch und energetisch optimierte technische Gebäudeklimatisierung, da in dieser Leistungsklasse vergleichsweise langsame Prozesse mit geringerer Temperaturdifferenz stattfinden.</p> <p>Es wird erwartet, dass es auf der Grundlage der Projektergebnisse gelingt, industrielle Kooperationspartner zur Weiterentwicklung in Richtung kommerziell verwertbarer Produkte zu gewinnen.</p>	
19. Schlagwörter Magnetokalorik, MCE, Kältemaschine, Wärmepumpe, Demonstrator Konzept, Verluste, thermodynamische Optimierung,	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title MagKal Novel magnetocaloric device for cooling and heating appliances	
4. author(s) (family name, first name(s))  Lindackers, Dirk Voigtländer, Ralf Grasemann, Samuel Seidemann, Torsten	5. end of project June 2015
	6. publication date 31.12.2015
	7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address)  IFW Dresden Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstofforschung Dresden Helmholtzstraße 20 01069 Dresden	9. Originator's report no. 13-035
	10. Reference no. 03V0157
	11. no. of pages 48
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references -
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 36
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
<p>18. abstract</p> <p>From the project aim of continuing science and application of the Magneto Caloric Effect (MCE) arose for the IFW the practical demonstration of multiplying as well as inversion of temperature differences.</p> <p>Fundamental studies concerning magnetic field optimization, sample shapes and heat transport from MCE-material to fluid are done previously.</p> <p>After extensive theoretical and calculative dimensioning of the magnetic field, these new knowledges flu directly into the development of a cycle simulator. This self-made testing plant was well suitable to confirm and optimize the magnetic setup for the demonstrator.</p> <p>Beside of preparing the reference material gadolinium samples, new lanthanum-iron-silicon-samples were made with the instrumental help of the IFW.</p> <p>In the following investigations at the IFW, manifold series of tests concerning the effective heat transport from the MCE-Material to the best suitable transfer fluid and the best sample geometry were passed. The instrumental basis for these tests is the thermal test bench at the IFW. Comparing to the cycle test rig, comprehensive sensor devices and a suitable measuring software were implemented at the thermal test bench.</p> <p>Main results for the most promising modular concept of the demonstrator came up with the close-to-reality-experiments in the magnetic field of a strong electromagnet.</p> <p>The specially built demonstrator at the IFW allows wide variations of process parameters. For example flow rate, valve opening time shift, cycle time. This concept provides options for increasing the number of modules as well as operating the modules in serial or parallel order. The universal sample cells enables the intensive research of different sample geometries and/ or materials.</p> <p>Above that, all parameters for this demonstrators can be run in refrigeration and heat pump operation. This setup with its wide variety of parameters enforces the demonstrator to get a unique state. This features are the main stand-alone-properties of the developed demonstrator within the MagKal-project.</p> <p>Promising ideas for application of the demonstrator design can be found at the ecological and economical friendly air-conditioning of buildings, because just small temperature differences and slow processes occurs in that performance category.</p> <p>It is expected that based on the project results industrial partners will be attracted for further development of commercially exploitable products.</p>	
19. keywords Magnetocaloric, MCE, Refrigeration, Heat Pump, Demonstrator Concept, Losses, Thermodynamic Optimization	21. price
20. publisher	