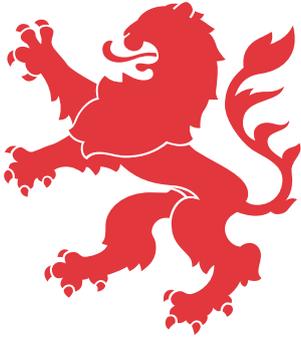


RESPONSE

Ressourcenschonende Permanentmagnete durch optimierte Nutzung seltener Erden

HESSEN



LOEWE

ABSCHLUSSBERICHT



**LOEWE-Schwerpunkt
RESPONSE – Ressourcenschonende Permanent-
magnete durch optimierte Nutzung seltener Erden**

Inhalt

- 2 Statement des Koordinators
- 3 Projektinhalte
- 3 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage
- 3 Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen
- 6 Erreichte Strukturentwicklung
- 6 Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld
- 7 Wichtigste Meilensteine des Projekts
- 9 Weitere Informationsmöglichkeiten
- 10 Zahlen und Fakten
- 11 Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute
- 12 Impressum

Magnetische Materialien finden sich in allen Bereichen des täglichen Lebens vom Mobiltelefon bis zum Kraftfahrzeug. In der nahen Zukunft wird sich jedoch eine enorme Steigerung des Bedarfs nach Magnetwerkstoffen ergeben, da sie Kernkomponenten effizienter Energiewandlertechnologien in der Windkraft und der Elektromobilität im Rahmen der Energiewende und auch in der Automatisierung sind. Da die derzeit verwendeten Materialien auf der Verfügbarkeit von strategischen Rohstoffen wie den seltenen Erden und Kobalterzen beruhen, besteht enormer Forschungsbedarf für alternative, ressourcenschonende und kostengünstige Werkstoffe und Materialkonzepte, Fertigungstechnologien und auch Wiederverwertungsstrategien.



Im Rahmen des LOEWE-Schwerpunktes RESPONSE wurden die an der Technischen Universität Darmstadt vorhandenen stofflichen und methodischen Kompetenzen aus dem Maschinenbau, der Chemie und vor allem der Materialwissenschaft gebündelt und auch in den Profildbereich der Universität „Vom Material zur Produktinnovation“ eingebunden. Ziel des Schwerpunktes RESPONSE war es, neuartige ressourcenschonende Magnetmaterialien für die Zukunft zu entwickeln. Durch die enge Verknüpfung mit den Industriepartnern und der Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS in Hanau und Alzenau ist es gelungen, eine breite Basis für eine grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung auf dem Gebiet der Permanentmagnete mit internationaler Sichtbarkeit zu schaffen.

Das Themenfeld Magnetismus und Magnetische Materialien ist durch strategische Berufungen, durch nachhaltige Infrastruktur-Maßnahmen wie das neue Laborzentrum M3 (Magnete, Moleküle, Materialien) und Investitionen in die Elektronenmikroskopie und den hessischen Hochleistungsrechner und natürlich vor allem durch den LOEWE-Schwerpunkt RESPONSE zu einem internationalen Aushängeschild unserer Universität geworden. Dafür möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen, Beteiligten und Fördergebern sehr herzlich bedanken; es war mir eine Freude, mit allen so intensiv und produktiv zu arbeiten. Gleichzeitig bleibt das Thema natürlich aus materialwissenschaftlicher Sicht hochspannend und in einem globalen Kontext hochbrisant und eine große Herausforderung für unsere Gesellschaft – das heißt, wir werden diesen Forschungsschwerpunkt weiter ausbauen!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Oliver Gutfleisch', written in a cursive style.

Prof. Dr. Ing. habil. Oliver Gutfleisch
Koordinator des LOEWE-Schwerpunktes RESPONSE
Technische Universität Darmstadt

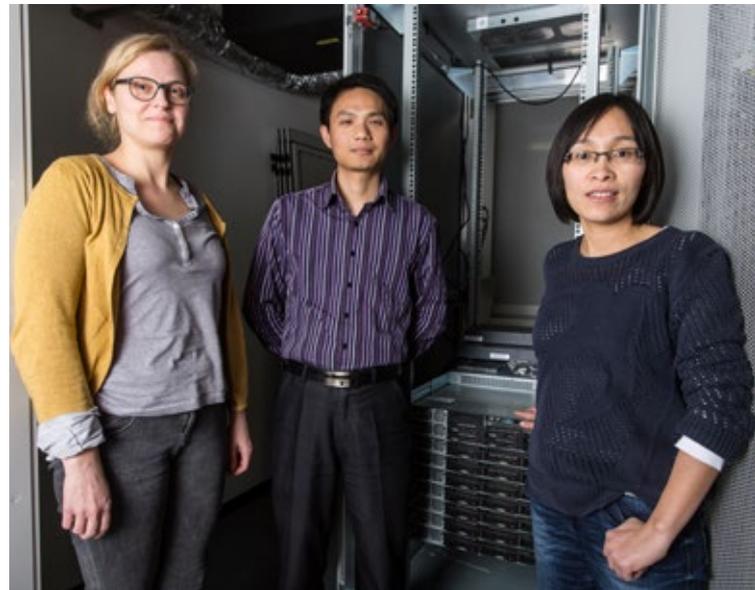
Projekthalte

Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

Schlüsseltechnologien für eine nachhaltige Energiewende und Klimapolitik wie Windkraft und Elektromobilität benötigen große Mengen starker Permanentmagnete. Zurzeit werden in diesen Technologien zumeist Seltenerd-magnete auf Neodym-Eisen-Bohr-Basis eingesetzt, die zudem häufig äußerst kostspielige Schwere Seltene Erden wie Dysprosium oder Terbium enthalten. Die Seltenen Erden gehören zu den Strategiemetallen und werden zu 90% in China gewonnen, woraus sich eine monopolistische Versorgungssituation ableitet. In der Vergangenheit hat diese Monopolstellung bereits zu enormen Preissteigerungen und der sogenannten „Seltenerdkrise“ in 2011 geführt. Diese Krise wurde nicht durch plötzlich ansteigende Bedarfe ausgelöst und bis heute bleibt der globale Seltenerdmarkt volatil. Hinzu kommt, dass die Gewinnung z. T. unter stark umweltschädlichen Bedingungen geschieht, was auch durch die Vergesellschaftung der Seltenerd-erze mit radioaktiven Uran- und Thorium-Isotopen bedingt ist. In Bezug auf Hochleistungsmagnete sind Seltenerd-magnete auf Neodym-Eisen-Bohr-Basis zurzeit marktbeherrschend, während keramische Ferritmagnete den sog. *low cost-low performance*-Sektor dominieren. Das Preis-Leistungs-Verhältnis dieser beiden Materialsysteme ist derartig gegensätzlich, dass bereits der Mittelweg also *filling the gap* eine disruptive Materialinnovation darstellen würde. Daher bestanden die großen Ziele von RESPONSE zum einen darin, neue Materialsysteme zu finden, und zum anderen, die Verwendung von insbesondere Schweren Seltenen Erden in den etablierten Materialsystemen wie Neodym-Eisen-Bor drastisch zu reduzieren.

Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen

Durch die Zusammenarbeit verschiedener Gruppen aus der Materialwissenschaft, der Physik, der Chemie und dem Maschinenbau konnten weitreichende wissenschaftliche Erkenntnisse in vielen Themengebieten gewonnen werden. Diese Ergebnisse reichen von



Prof. Bai-Xiang Xu (rechts) und wissenschaftliche Mitarbeitende.

der Synthese und Charakterisierung von Nanopartikeln und Dünnschichten über die Herstellung und Prozessierung neuer magnetischer Werkstoffe bis hin zu mikromagnetischen und sog. First-Principle Simulationen. Das thematische Spektrum der einzelnen PIs in RESPONSE ermöglichte eine fachbereichsübergreifende Forschung, was sich auch in vielen multi-PI-Publikationen widerspiegelt.

Die Fragestellung des Projektes ist nach wie vor hochaktuell, da sich seit Beginn des Projektes an der Ausgangssituation bzw. Nachfrage und Angebot von Seltenen Erden und der Monopolstellung Chinas wenig geändert hat. So sind die Seltenerdoxidproduktion zu ca. 90% und die Seltenerdpermanentmagnetproduktion zu 80% global auf China fokussiert.

Durch das Projekt konnten tiefgehende Erkenntnisse über den sog. Korngrenzen-Diffusionsprozess in Neodym-Eisen-Bohr Magneten gewonnen werden. Mit dieser Methode kann der Gehalt von Schweren Seltenen Erden in magnetischen Werkstoffen auf ein Minimum reduziert werden. Hierzu wurde unter anderem im Rahmen des Projektes ein Patent eingereicht, welches die pulvermetallurgische Herstellung sog. Core-Shell-Strukturen zum Inhalt hat. In diesem Zusammenhang konnten mittels Transmissions-Elektronenmikroskopie atomar aufgelöste Bilder der



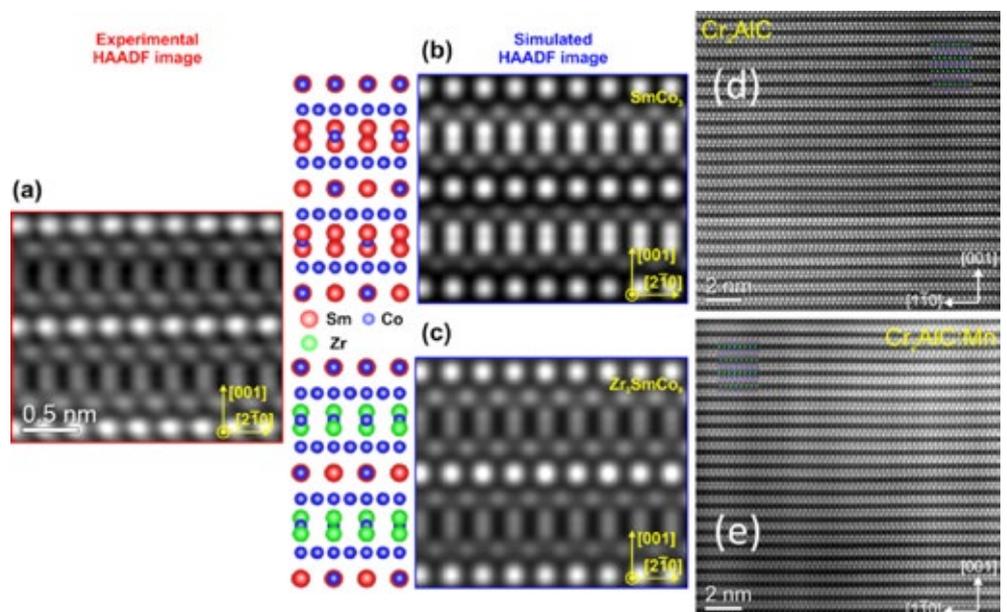
Synthese von magnetischen Nanopartikeln.

Korngrenzenphasen gemacht werden, mithilfe derer die Verteilung und Rolle der Schweren Seltenen Erden besser verstanden wurde. Mittels eines Magnet-Kraft-Mikroskops, welches im Rahmen des Projektes in Betrieb genommen wurde, konnte erstmals die Entmagnetisierung dieser Core-Shell-Strukturen in-situ abgebildet untersucht werden. Diese Ergebnisse wurden zudem mit mikromagnetischen Simulationen der experimentellen Geometrien verglichen. Eine weitere Möglichkeit die Kritikalität von Seltenen Erden zu adressieren ist die Nutzung von sog. „Rare Earth Balance magnets“. Nur wenige Seltene Erden sind wirklich selten im Sinne einer geologischen Häufigkeit. Elemente wie Cer und Lanthan sind sogar, durch ihre Vergesellschaftung im „rare earth basket“ mit den magnetisch höchst relevanten Elementen,

Nd, Pr, Sm, Gd, Dy, Tb, als relativ häufig anzusehen. Entsprechende Untersuchungen an z. B. Cer substituierten NdFeB Einkristallen zeigen eine sehr gute Perspektive für die Entwicklung eines *filling the gap* Magneten auf (Nd, Ce, La)-Fe-B-Basis.

Weitere interessante Ergebnisse zum magnetischen Härtungsmechanismus in Samarium-Kobalt Magneten wurden mittels atomar aufgelöster Transmissions-Elektronenmikroskopie gewonnen. Hier konnte die Aufklärung der chemischen Struktur der Zweitphasen in Kombination mit mikromagnetischen Simulationen wesentliche Erkenntnisse zum Verständnis des Materialsystems beitragen, welche als ein wissenschaftliches Highlight in Nature Communications veröffentlicht wurden.

Atomare Auflösung der Kristallstruktur in Samarium-Kobalt Magneten.





Templat-assistierte Synthese von Nanodrähten.

Bezüglich der Synthese und Evaluierung „neuer“ magnetischer Materialien wurde eine breite Palette verschiedener Materialsysteme wie beispielsweise Eisennitrid, Eisenborid oder Mangan-Gallium in Form von Nanopartikeln, dünnen Schichten und als Volumenmaterial synthetisiert. Das Konzept der interstiellen Tetragonalisierung wurde von mehreren PIs zusammen entwickelt und hochrangig publiziert. Nanodrähte aus Eisen, Nickel und Kobalt in verschiedenen Zusammensetzungen wurden hergestellt. Eine detaillierte Analyse dieser Nanopartikel, Nanodrähte und Dünnschichten wurde durchgeführt, unter anderem mittels atomar aufgelöster Transmissions-Elektronenmikroskopie und Magnet-Kraft-Mikroskopie.

In einem Projektbereich wurde zudem ein einzigartiger Aufbau zur Röntgenbeugung in einem Magnetfeld von bis zu 5,5 Tesla Feldstärke realisiert. Mithilfe

des neu konstruierten hochauflösenden Röntgendiffraktometers mit Kryostat-Ofen-Kombination konnten temperatur- und magnetfeldinduzierte Phasenübergänge von neuen intermetallischen Verbindungen wie z. B. potenziellen Kandidaten für Permanentmagnete und magnetische Kühlung in-situ strukturell verfolgt werden. Diese inzwischen publizierten wichtigen Ergebnisse liefern einen Einblick in das Materialverhalten während der magnetostrukturellen Phasenumwandlung und ermöglichen die Untersuchung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung auf die Materialeigenschaften.

In der Zusammenarbeit von Materialwissenschaft und Maschinenbau wurde ein Konzept erarbeitet, das ein neues Herstellungsverfahren für Neodym-Eisen-Bor Magnete ermöglicht. Dieses aussichtsreiche Konzept stellt eine kostengünstige alternative Prozessroute zur Herstellung von Neodym-Eisen-Bor Magneten über einen Umformprozess dar. Nach der erfolgreichen Patentanmeldung des Verfahrens wird das Konzept als Grundlage für weitere Drittmittelprojekte (TUDa Pioneer Fund, VIP+), welche im Anschluss an RESPONSE beantragt wurden, weiter verfolgt. Damit soll das neue Verfahren für eine industrielle Verwertung validiert werden.

Röntgendiffraktometer mit Kryostat-Ofen-Kombination in magnetischen Feldern.



Erreichte Strukturentwicklung

Durch das Projekt wurde eine Juniorprofessur für die „Theorie magnetischer Materialien“ an der TU Darmstadt geschaffen und mit Junior-Prof. Dr. Hongbin Zhang als tenure track besetzt. Herr Zhang wurde sehr positiv zwischenevaluert, und es bestehen sehr gute Aussichten, dass die Professur bzw. Herr Zhang verstetigt werden. Die Kombination aus theoretischen Vorhersagen über neue magnetische Phasen und experimenteller Expertise hat sich im RESPONSE-Projekt als so effektiv herausgestellt, dass u. a. auch diese Zusammenarbeit in einem DFG-geförderten Sonderforschungsbereich (SFB) Transregio-Projekt „Hommage“ weitergeführt werden soll. Die geplante Zusammenarbeit im SFB-Transregio ist eine Partnerschaft mit der Universität Duisburg-Essen. Das Konzeptpapier wurde erfolgreich zwischenevaluert und nun steht die Einrichtungsbegutachtung vor Ort an.

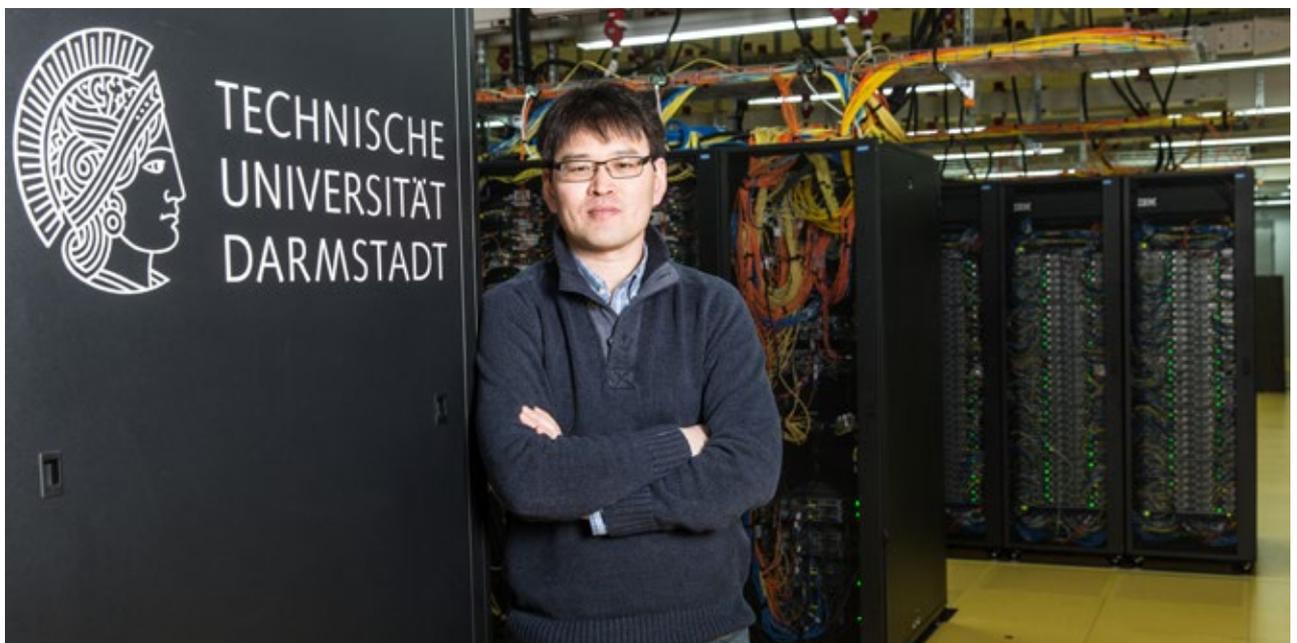
Im Rahmen des Projektes wurde auch die Zusammenarbeit mit der Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS) intensiviert. Durch den Zugang zu Experimentellen Präparationsmethoden wie z. B. Focussed Ion Beam (FIB) konnte eine deutlich verbesserte Probenanalyse in der Transmissions-Elektronenmikroskopie an der TU

Darmstadt durchgeführt werden. Auch im Bereich „up-scaling“ waren die Möglichkeiten des IWKS im Verlauf des Projektes sehr hilfreich, um Probenmengen herzustellen, welche über den Labormaßstab hinausgingen. Gleichzeitig unterstützt die TUD über RESPONSE die anwendungsorientierte Forschung am Fraunhofer IWKS, im Zusammenspiel ergibt sich ein „Cluster zu Magnetmaterialien“ mit hoher internationaler Sichtbarkeit; auf dieser Basis ist es schon jetzt absehbar, dass an beiden Standorten separat und gemeinsam eine Vielzahl von Projekten realisiert werden (können). Damit wird die Entwicklung des IWKS zunächst zu einer Fraunhofer-Einrichtung, dann zu einem eigenständigen Fraunhofer-Institut unterstützt.

Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld

Vor allem konnte durch das Projekt die angestrebte interne Vernetzung von Materialwissenschaft, Chemie und Maschinenbau zum Thema Magnetismus und magnetische Materialien erreicht werden, was sich in gemeinsamen Publikationen, Patenten und Forschungsanträgen widerspiegelt. Die Bündelung der fachlichen und stofflichen Expertise, zusammen mit der Vielfältigkeit an präparativen und analyti-

Junior-Prof. Hongbin Zhang.

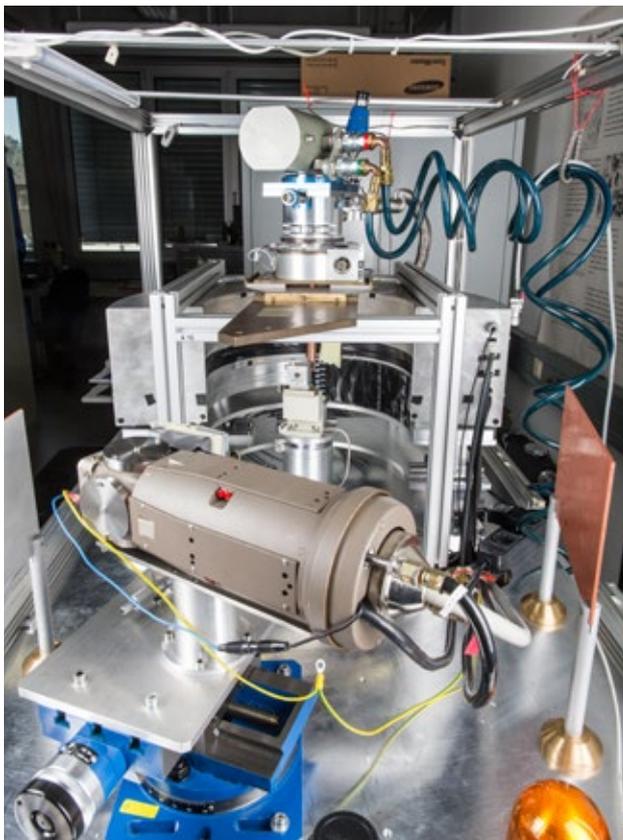


schen Möglichkeiten sorgte für eine optimale Synergie. Zudem konnte durch das Projekt eine internationale Sichtbarkeit der Forschung an Permanentmagneten an der TU Darmstadt erreicht werden. Dies wurde nicht nur durch die zahlreichen Publikationen und Konferenzbeiträge, sondern auch durch viele Fachvorträge internationaler Gäste erreicht, welche immer im Kontext von Laborführungen und Gesprächen mit den verschiedenen Arbeitsgruppen standen. Nicht zuletzt konnte sich Darmstadt durch die Ausrichtung der Rare Earth Permanent Magnet Konferenz REPM 2016, mit breiter internationaler Beteiligung, in eine lange Liste von Städten wie Beijing oder Nagasaki einreihen. Neben dem internationalen Publikum waren zahlreiche lokale sowie internationale Sponsoren bei der Veranstaltung vertreten, wie beispielsweise die Vacuumschmelze GmbH Hanau, Siemens AG, Urban Mining (USA), Toyota (Japan) und Tianhe Magnets (China). Auf dem Hessentag 2017 sorgte das Projekt am LOEWE-Stand auch für regio-

nale Sichtbarkeit mit zahlreichen Experimenten und Exponaten zum Ausprobieren und Diskutieren. Während das jüngere Publikum vor allem an den Experimenten wie der magnetischen Levitation und der magnetischen Gauss-Kanone interessiert war, ergaben sich generell viele Diskussionen über die Rolle von Permanentmagneten, z. B. in Regenerativen Energien und e-Mobilität und die Probleme und Aufgaben der Forschung in Bezug auf die Seltenen Erden.

Mit dem Symposium zur Energie- und Materialwende „The great transition – the importance of critical metals for green energy technologies“ im Juli 2017 konnte sich die TU Darmstadt und das RESPONSE-Projekt zum Thema Ressourcenkritikalität positionieren. Mit vielen Vertreterinnen und Vertretern der Industrie und Forschung aus ganz Deutschland, der Schweiz, Belgien und Frankreich fand das Thema breite Aufmerksamkeit und wird als Darmstädter Symposium zur Kritikalität von Funktionsmaterialien verstetigt.

Wichtigste Meilensteine des Projekts

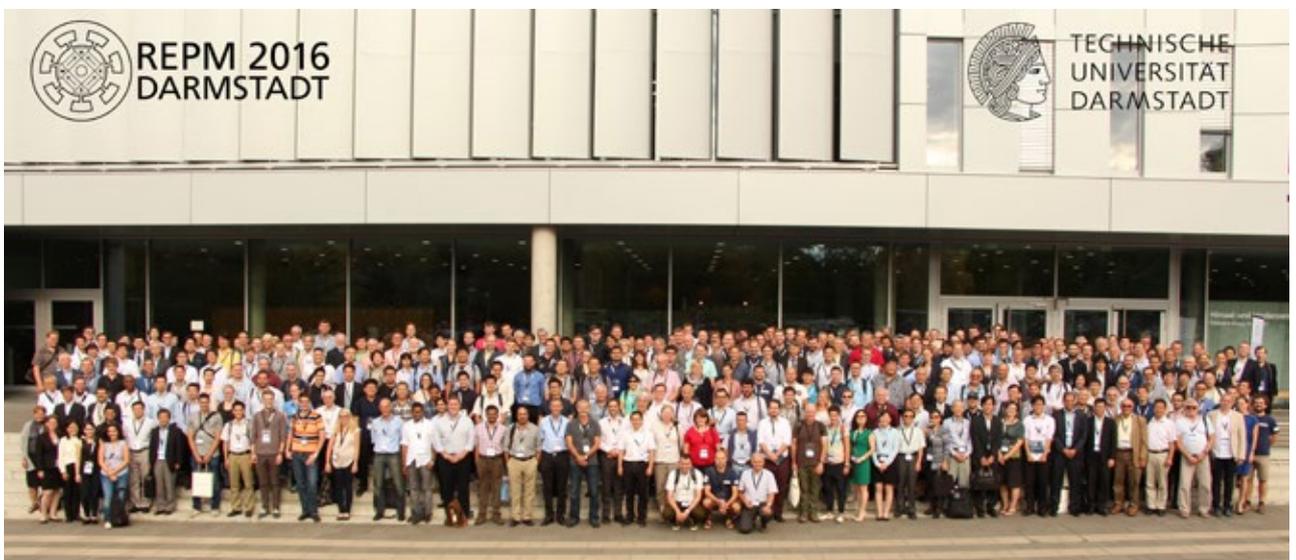


Im Rahmen des Gemeinschaftslabors Magnetismus wurde das Magnet-Kraftmikroskop zusammen mit einem Physical Property Measurement System (PPMS) in Betrieb genommen.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Röntgen-Schwerlast-diffraktometer mit einem 5,5 Tesla Magneten kombiniert und damit ein weltweit einzigartiger Versuchsaufbau in Betrieb genommen.



Während der jährlichen Klausurtagungen in verschiedenen Tagungsorten wurden Ergebnisse gebündelt und das weitere Vorgehen erarbeitet, hier Trifels 2015.



Mit der von uns in Darmstadt im September 2016 organisierten internationalen REPM Konferenz mit einer Rekordzahl von 370 Teilnehmenden konnte Darmstadt den Fokus auf die Aktivitäten im Magnetismus lenken.



Gruppenfoto mit den Vortragenden aus Industrie und Forschung beim Symposium Juli 2017 in der Darmstädter Orangerie zum Thema „Die Energiewende ist eine Materialwende!“.

Weitere Informationsmöglichkeiten

- <http://www.response.tu-darmstadt.de/response/index.de.jsp>
Homepage des LOEWE-Schwerpunkts RESPONSE
- <http://www.proloewe.de/response>
ProLOEWE
- <https://www.hessen.de/pressearchiv/pressemitteilung/loewe-forschung-staerkt-wissenschaftsstandort-suedhessen-0>
- <https://umwelt.hessen.de/pressearchiv/pressemitteilung/ressourcenschonender-einsatz-von-seltenen-erden-hilft-beim-umweltschutz>
Pressemitteilungen des hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst
- http://www.response.tu-darmstadt.de/media/fm/homepage/presse_2/DaEcho_16616.pdf
Echo Online
- <https://www.mawi.tu-darmstadt.de/fm>
Homepage des Fachgebiets von Prof. Oliver Gutfleisch

Zahlen und Fakten

Förderzeitraum	01.01.2014 – 31.12.2017	Bemerkungen
bis Ende des Förderzeitraums verausgabte LOEWE-Mittel	5.239.216,00 Euro	
bis Ende des Förderzeitraums verausgabte Drittmittel	2.967.044,45 Euro	
eingeworbene Drittmittel	8.868.518,00 Euro	mit Wirkung bis 2022 (Stand Sommer 2018)
Anzahl der beteiligten Personen	12 ProfessorInnen 25 wissenschaftliche MitarbeiterInnen 1 techn.-administrative Mitarbeiterin	
Anzahl an innerhalb des Förderzeitraums abgeschlossenen Promotionen	3	In 2018 sind weitere erfolgt, in 2019 werden die letzten Arbeiten abgeschlossen
Anzahl an Veröffentlichungen in Fachzeitschriften innerhalb des Förderzeitraums	76 63 Peer reviewed	Bezieht sich auf referierte Zeitschriften; Ende 2018 sind weitere Veröffentlichungen erfolgt, auch in 2019 werden noch Arbeiten abgeschlossen
Anzahl an Konferenzbeiträgen innerhalb des Förderzeitraums	192	
Anzahl an innerhalb des Förderzeitraums zugeteilten Patenten	4	

Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute

Technische Universität Darmstadt

<http://www.tu-darmstadt.de>

Die Technische Universität Darmstadt zählt zu den führenden Technischen Universitäten in Deutschland. Ihre rund 300 Professorinnen und Professoren, 4.250 wissenschaftlichen und administrativ-technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, Auszubildenden und wissenschaftlichen Hilfskräfte sowie 26.000 Studierenden widmen sich entscheidenden Zukunftsfeldern wie Energie, Mobilität, Kommunikation und Information sowie Bauen und Wohnen. Die vielfältigen Disziplinen der Universität konzentrieren sich alle auf Technik – aus der Perspektive der Ingenieur-, Natur-, Geistes und Gesellschaftswissenschaften – von der Erkenntnis bis zur Anwendung im Alltag.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS (assoziierter Partner)

<https://www.iwks.fraunhofer.de/>

Den Schwerpunkt der Forschungsarbeiten der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS in Hanau und Alzenau bilden die Bereiche der Wertstoffkreisläufe und effizienter sowie nachhaltiger Ressourcenstrategien. Ziel der Forschungsarbeiten der Projektgruppe IWKS ist es, eine geschlossene Kreislaufwirtschaft zu etablieren, indem wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen und wiederverwertet oder aber durch nachhaltige Alternativen ersetzt werden. Hierfür werden innovative Verfahren in den Bereichen Funktionswerkstoffe (Magnetwerkstoffe, Energiematerialien, Analytik) und Sekundärwertstoffe (Urban Mining, Biogene Systeme, Kreislaufmanagement) entwickelt. Das IWKS steht für einen ressourceneffizienten Umgang mit Roh- und Werkstoffen und der Transfer der Entwicklungen in die Industrie ist ein wichtiges Ziel der Forschungsarbeiten.



Das Gemeinschaftslabor Magnetismus der TUD zusammen mit der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS ist inzwischen ein international hoch anerkanntes Messlabor und z. B. in das „EU KIC EIT Raw Materials Magnetism“-Kompetenznetzwerk integriert.

HESSEN



Das Forschungsförderungsprogramm LOEWE ist eine Förderinitiative des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst.

Impressum

Herausgeber:

Hessisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst
Rheinstraße 23 – 25
65185 Wiesbaden

Inhalt:

LOEWE-Schwerpunkt RESPONSE – Ressourcenschonende Permanentmagnete durch optimierte Nutzung seltener Erden

Redaktion:

LOEWE-Geschäftsstelle im
Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst

Layout:

Christiane Freitag, Idstein

Fotos:

LOEWE-Schwerpunkt RESPONSE – Ressourcenschonende Permanentmagnete durch optimierte Nutzung seltener Erden
S. 3 – 8: © TU Darmstadt