

# ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung  
Jahresbericht 2018

INSTITUT FÜR TECHNISCHE PHYSIK



## Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Technische Physik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon +49 721/608-23501

[www.itep.kit.edu](http://www.itep.kit.edu)



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001

### Texte:

C. Day, L. Frances, W. Fietz, J. Geisbüsch, T. Giegerich, F. Grilli, S. Grohmann, R. Gröbke, J. Hänsich, R. Heller, S. Hellmann, B. Holzapfel, F. Hornung, M. Kläser, B. Krasch, A. Kudymow, Y. Liu, A. Marsteller, I. Meyer, M. Noe, M. Röllig, S. Schlachter, M. Schlösser, M. Sturm, S. Varoutis, K. Weiss, S. Welte, M. Wolf, B. Wunderlich C. Zoller

### Fotos und Grafiken:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### Titelbild:

Feierliche Inbetriebnahme des KATRIN Experimentes

Gestaltung: modus: medien + kommunikation gmbh  
[www.modus-media.de](http://www.modus-media.de)

Druck: Systemedia GmbH, 75449 Wurmberg

Gedruckt auf 100 Prozent Recyclingpapier mit dem Gütesiegel „Der Blaue Engel“

August 2019

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Ergebnisse aus den Forschungsbereichen</b>	<b>6</b>
Supraleiter- und Kryo-Materialien	6
Energietechnische Anwendungen	14
Supraleitende Magnettechnologie	22
Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes	30
Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen	36
<b>Preise und Auszeichnungen</b>	<b>44</b>
<b>Abgeschlossene Doktorarbeiten</b>	<b>45</b>
Dr. Sebastian Hellmann	45
Dr. Yingzhen Liu	46
Dr.-Ing. Bernd Wunderlich	47
Dr.-Ing. Carolin Zoller	48
<b>Lehre und Bildung</b>	<b>49</b>
Vorlesungen, Seminare und Workshops	49
Doktorarbeiten – Masterarbeiten – Bachelorarbeiten	50
Fach- und Gastvorträge	53
<b>Zahlen und Daten</b>	<b>54</b>
Organigramm	54
Personalstand	54
Personalveränderungen	55
Studentische Hilfskräfte	56
Gastwissenschaftler	57
Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien	58
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>60</b>
Veröffentlichungen „Fusion“	60
Veröffentlichungen „Speicher und vernetzte Infrastrukturen“	62
Veröffentlichungen „Materie und Universum“	65
Veröffentlichungen „Wissenschaft und Technologie der Nanosysteme“	66
Eingeladene Vorträge	67
Schutzrechtsbestände	68
<b>Kontakt</b>	<b>71</b>

# Vorwort

Das Institut für Technische Physik (ITEP) versteht sich als nationales und internationales Kompetenzzentrum für Fusions-, Supraleitungs- und Kryotechnologie mit den Forschungsfeldern:

- Supraleiter- und Kryomaterialien
- Energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- Supraleitende Magnettechnologie
- Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs
- Physik und Technologie von Wasserstoff-Isotopologen

Die Arbeiten des ITEP sind langfristig in den Programmen „Fusion“, „Speicher und vernetzte Infrastrukturen“ sowie „Materie und Universum“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren verankert.

Zur Bearbeitung seiner komplexen und meist multidisziplinären Aufgaben verfügt das ITEP über große und einzigartige Versuchseinrichtungen, Labore und die entsprechende technische Infrastruktur. Dazu gehören beispielsweise das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) als weltweit einziges zivil genutztes Labor mit geschlossenem Tritiumkreislauf, die Toroidal-Spulen-Testanlage Karlsruhe (TOSKA) zum Test großer Magnete für die Fusion und zur Entwicklung von Komponenten für zukünftige Fusionskraftwerke, die Testanlage für die ITER-Modellpumpe (TIMO) zur Entwicklung von Kryovakuumpumpen, das Hochfeldmagnetlabor zur Entwicklung von supraleitenden Magneten hoher Felder, das kryogene Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe sowie die kryogenen Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei extrem tiefen Temperaturen.

Auch im Jahr 2018 hatte das Institut beachtliche wissenschaftliche Ergebnisse, viele erfolgreiche Entwicklungsprojekte und einige besondere Herausforderungen und Ereignisse zu verzeichnen. Im Folgenden geben wir einen kurzen Überblick.

Im Forschungsfeld **Supraleiter- und Kryomaterialien** erreichten wir bei der kontinuierlichen  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Bandbeschichtung die Industriestandards der kritischen Stromdichte. Auch an nanostrukturierten Dünnschichten von Hochtemperatur-Supraleitern und Fe-basierten Supraleitern erzielten wir weitgehende Fortschritte bei der Verbesserung der Pinningeigenschaften. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „High Entropy Alloy“ etablierte unser Institut ein Herstellungsverfahren für die spezielle Legierung  $\text{HfNbTaTiZr}$ . Mit den erfolgreich hergestellten Materialproben starten die ersten kryogenen Materialtests an dieser Modelllegierung, um Verfor-

mungsmechanismen bei tiefen Temperaturen zu untersuchen. Zur Untersuchung von Gemischkältekreisläufen für Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung bauen wir die neue Phasengleichgewichtsanlage CryoPHAEQTS zur Untersuchung aller kryogenen Stoffgemische auf. Dieser Aufbau verläuft planmäßig. Bei der Entwicklung von Hochstromleitern bauten wir mit zwölf CrossConductors einen DC-Hochstromleiter auf und testeten ihn bei 77 K mit einem Rekordstrom von 35 kA.

Im Forschungsfeld **Energietechnische Anwendungen der Supraleitung** testeten wir im Rahmen eines BMWi-Verbundprojekts weltweit erstmals einen neuartigen supraleitenden Strombegrenzer mit einer Leistung von 10 MVA erfolgreich in einem Leistungslabor (siehe Abbildung 1). Alle spezifizierten Werte wurden durch den Test vollständig verifiziert. Weiterhin überprüften wir einen Testaufbau für eine supraleitende Stromschiene eines elektrisch angetriebenen Flugzeugs auf Lorentzkräfte. Bei der Modellierung des elektrodynamischen Verhaltens von Supraleitern ließ sich durch die Einführung einer neuen Methode der T-A-Formulierung die typische Rechenzeit um den Faktor zehn reduzieren. Im Forschungsthema Echtzeitsimulation startete ein Verbundprojekt zur netzdienlichen Integration eines supraleitend gelagerten Schwungmassenspeichers; die grundlegende Modellierung wurde abgeschlossen. Zudem entwickelten wir echtzeitfähige Simulationsmodelle für supraleitende Kabel und Strombegrenzer weiter.



Abb. 1: Das Entwicklungsteam und der neuartige Strombegrenzer SmartCoil beim Test im Leistungslabor in Berlin.

Eine wichtige Aufgabe im Forschungsfeld **Supraleitende Magnettechnologie** ist die Entwicklung hochtemperatur-supraleitender Magnete. Für den zukünftigen Fusionsreaktor DEMO zeigte eine Simulation, dass der von uns vorgeschlagene Leiter und das Wicklungspaket für die Toroidalfeldmagnete die mechanischen, elektrischen und hydraulischen Anforderungen erfüllen. In unserer Testanlage HOMER II prüften wir erfolgreich eine Hochfeldspule mit einer Lagenwicklung aus YBCO-Bandleitern in einem Hintergrundfeld von 18 T auf Ihren Nennwert von 5 T. Im Rahmen eines von der DFG geförderten deutsch-chinesischen Projekts fertigten wir für einen supraleitenden Windkraftdemonstrator mit Gleichstrom eine erste nicht isolierte Spule und testeten sie erfolgreich bei 77 K.

Im Forschungsfeld **Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs** entwickeln wir grundlegend neue Vakuumtechnologien und Verfahren zur Tritiumextraktion und Tritiumrückgewinnung. 2018 rechneten wir die neu vorgeschlagene Architektur des DEMO-Brennstoffkreislaufs vollständig durch und wiesen nach, dass das System für die Größe von DEMO sinnvoll skaliert ist sowie die Durchsätze und Zusammensetzungen aller Gasflüsse möglich sind. Mit der Anlagenfamilie Hermes untersuchten wir die Komponenten Metallfolie und Plasma einer zukünftigen Metallfolienpumpe weiter; die Hochskalierung der Ergebnisse auf DEMO bestätigte ihre Machbarkeit. Für ein neuartiges Verfahren zur Tritiumextraktion basierend auf dem Vacuum Sieve Tray Prinzip bauten wir ein Experiment auf und nahmen es mit Deuterium in Betrieb.

Zentrale Themen im Forschungsfeld **Physik und Technologie von Wasserstoff-Isotopologen** sind die Prozessierung von Tritium sowie die Analytik von Wasserstoff und Tritium. Dazu betreibt das ITEP das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK), in dem auch 2018 ein sicherer Betrieb gewährleistet war. In Kooperation mit dem rumänischen National Institute of R&D for Cryogenic and Isotopic Technologies (ICIT) schlossen wir Experimente zur Ermittlung von Stoffübertragungskoeffizienten zum Isotopenaustausch zwischen HTO und H<sub>2</sub> auf einer COMPACK C-P001 Kolonnenpackung mit Tritium ab. Die Anlage TriHyDe (Tritium Hydrogen Deuterium), die zur Herstellung tritierter Kalibriergasmischungen dient, wurde 2018 aufgebaut und inaktiv in Betrieb genommen. Damit erfolgte dann die Kalibrierung für die inaktiven Wasserstoff-Isotopologen H<sub>2</sub>/HD/D<sub>2</sub>. Die BIXS-Methode (Beta Induzierte X-Ray Spectrometry) wird bei KATRIN zur Überwachung der Tritiumquellintensität eingesetzt. 2018 testeten wir erstmals das Prinzip im fi-

nalen Set-up mit Kryton-83m während der Kryptonmessphase im Anschluss an First Tritium.

Für das **Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN** ([www.katrin.kit.edu](http://www.katrin.kit.edu)) leistet das ITEP wichtige Beiträge zu den Tritiumkreisläufen und zur Kryoversorgung. 2018 lief nach einer langen Aufbauphase die erste Messung, und das Experiment ging in Betrieb (siehe Abbildung 2).



**Abb. 2: Offizielle Inbetriebnahme von KATRIN am 11. Juni 2018.**

Mit KATRIN geschah erstmals eine Inbetriebnahme mit 0,5 % Tritium in Deuterium. In der ersten Messphase wurde neben der spektralen Analyse demonstriert, dass die Tritiumquelle zusammen mit dem gesamten Experiment den Stabilitätsanforderungen genügt. Das ist ein großartiger Erfolg, der nur in enger Abstimmung und fruchtbarer Kooperation mit den beteiligten Institutionen möglich war. Wir gratulieren allen Beteiligten herzlich!

In der Ausbildung betreuten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP im Jahr 2018 insgesamt 34 Doktoranden und 17 Masteranden.

Unser ganz besonders herzlicher Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ITEP sowie allen Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie für die außerordentlich vertrauensvolle und erfolgreiche Zusammenarbeit im Jahr 2018.

Herzlichst

Ihre Institutsleitung

Mathias Noe

Bernhard Holzapfel



*Demonstrator eines supraleitenden 35 kA DC Kabels aus zwölf HTS CroCos vor dem Abkühlen auf 77 Kelvin*

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleiter- und Kryo-Materialien

**Koordination: Prof. Dr. Bernhard Holzapfel**

Das Forschungsfeld Supraleiter- und Kryomaterialien gliedert sich in vier Forschungsthemen:

- Supraleitende Materialien
- Kryo- und Strukturmaterialien
- Kryogene Stoffeigenschaften
- Leitertechnologien

Damit entsteht in diesem Forschungsfeld die materialwissenschaftliche Basis für die am ITEP untersuchten energie- und magnetischen Anwendungen der Supraleitung.

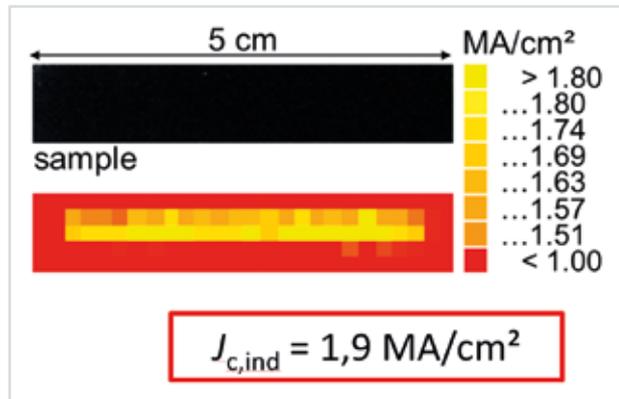
### Supraleitende Materialien

2018 befasste sich das ITEP weiterhin mit der Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) und mit HTS-Bandleitern. Sie sind wesentlich für viele verschiedene Anwendungen in der Energietechnik, wie zerstörungsfreie Fehlerstrombegrenzer, leistungsstarke und leichte Motoren und Generatoren, verlustarme Kabel und Stromzuführungen sowie Hochfeldmagnetspulen, aber auch in der Mobilität, wie elektrisches Fliegen. Zu den Forschungsschwerpunkten zählen sowohl grundlegende materialwissenschaftliche Arbeiten, wie die Verbesserung der elektrischen Transporteigenschaften etablierter Supraleitermaterialien, als auch anwendungsorientierte Untersuchungen an vielversprechenden neuen Supraleitern sowie die industriennahe technologische Weiterentwicklung der Herstellung von HTS-Bandleitern.

### Technologieentwicklung

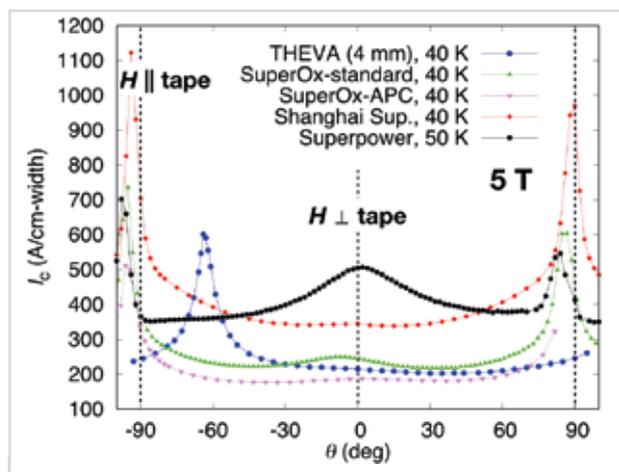
**Herstellung von HTS-Bandleitern:** Ein Kooperationsprojekt mit der Deutschen Nanoschicht GmbH zielt auf die Weiterentwicklung der kontinuierlichen chemischen Herstellung von REBCO-Bandleitern, um die Eigenschaften dieser Bandleiter weiter zu verbessern und den Herstellungsprozess gleichzeitig so einfach und ökonomisch wie möglich zu gestalten. Innerhalb dieses Projekts wurde in einem 18-Zonen-Klapprohrofen der kontinuierliche lösungsbasierte Depositionsprozess (Chemische Lösungsabscheidung – CSD) auf Industrieniveau eingeführt. Kritische Stromdichten bei 77 K im Eigenfeld von rund 2 MA/cm<sup>2</sup> an vorbeschichteten YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-Bändern mit kritischen Temperaturen bis 93 K und sehr scharfen Übergängen wurden gezeigt. Somit lässt sich die Anlage nun für weitergehende Untersuchungen zum gezielten Einbringen pinningeffektiver Defektstrukturen im kontinuierlichen Beschichtungsprozess nutzen.

**Charakterisierung:** Mehrere kommerzielle Bandleiter wurden im 6-T-Split-Coil-System für verschiedene internationale Projekte auf ihre Stromtragfähigkeit unter-



**Abb. 1: Induktiv gemessene kritische Stromdichte einer im kontinuierlichen Prozess hergestellten Bandleiterprobe auf vorbeschichtetem Band. Sie zeigt, dass der Industriestandard erreicht wurde.**

sucht, beispielsweise Bandleiter von SuperOx für ASUMED, von Shanghai Superconductors für SuperWind und SupradCKabel, von THEVA für FastGrid und SuperWind sowie nur 30 µm dicke neue Bänder von SuperPower für EUCARD. Dabei war die Temperatur- und Feldabhängigkeit der kritischen Ströme,  $I_c(T, B, \theta)$  bei Temperaturen unter 77 K (Abbildung 2) von besonderem Interesse, da viele neue Anwendungen bei 20–40 K stattfinden werden. Weiterhin wurden im Projekt FastGrid THEVA-Bandleiter strukturell charakterisiert, und das für Fehlerstrombegrenzer wichtige Quenchverhalten von neuartigen Bandleiterbeschichtungen wurde mithilfe der Fluoreszenzanalyse gemessen und mit Simulationsdaten der Projektpartner abgeglichen.



**Abb. 2: Orientierungsabhängigkeit des kritischen Stroms verschiedener Bandleiter bei 5 T und 40/50 K ( $\theta$  ... Winkel zwischen Magnetfeld und Bandnormalen).**

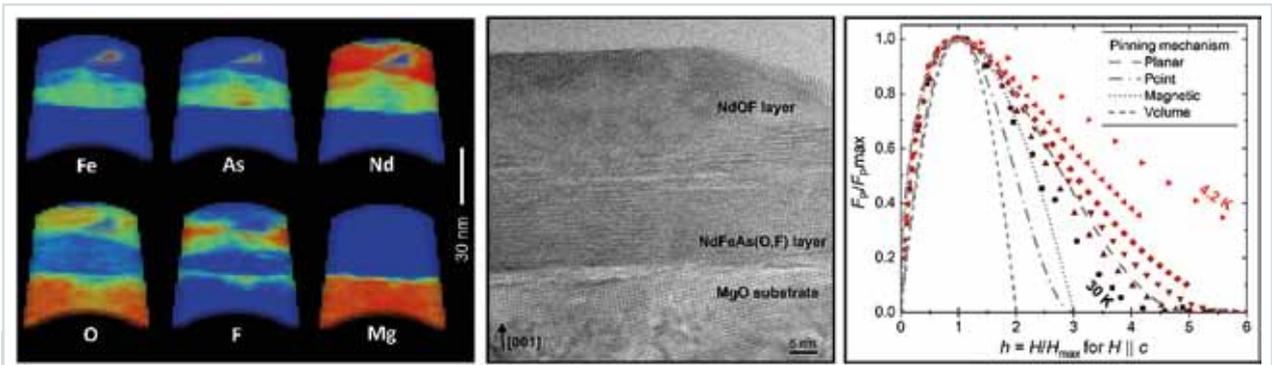


Abb. 3: Elementverteilungskarten und Mikrostruktur einer 22 nm dicken NdFeAs(O,F)-Schicht mit 15 nm NdOF-Deckschicht auf einkristallinem MgO-Substrat, Vergleich der Pinningeigenschaften bei verschiedenen Temperaturen, theoretische Kurven unterschiedlicher Pinningmechanismen.

## Materialforschung

**Hochtemperatur-Supraleiter:** In der Chemischen Lösungsabscheidung wurden verschiedene Seltene Erden (RE) systematisch auf ihre Einsetzbarkeit als Substitution des Ytriums in  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  untersucht. Ein Vergleich von Gd, Dy, Y, Ho und Er zeigte vor allem signifikante Verbesserungen der kritischen Stromdichten für  $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  sowohl in reinen Schichten als auch mit  $\text{BaHfO}_3$ -Nanopartikeln für verbessertes Pinning.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , das bei 77 K eher mäßige Ergebnisse zeigt, holt bei tieferen Temperaturen auf und übertrifft unter 50 K in hohen Magnetfeldern sogar  $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

Das gesammelte Wissen zu diesen Einzel-RE-Verbindungen diene dazu, die besten Kandidaten der Seltenen Erden für Gemischt-RE-Verbindungen ( $\text{RE}'$ ,  $\text{RE}''$ ,  $\text{RE}'''$ , ...)  $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , zu ermitteln, da solche Verbindungen verschiedene Vorteile wie erleichterte Depositionsbedingungen und erhöhte Stromtragfähigkeiten aufweisen. In einem ersten Schritt wurden Y und Gd in verschiedenen Verhältnissen gemischt und 12 mol%  $\text{BaHfO}_3$  dazugegeben. Diese Nanokomposite zeigten tatsächlich ein weit verbreitetes Fenster der Phasenformation und kritische Stromdichten von bis zu 7 MA/cm<sup>2</sup> bei 77 K. Dies macht sie äußerst interessant für Weiterentwicklungen bei tiefen Temperaturen.

Das Pinningverhalten unterschiedlicher Mikrostrukturen wurde ebenso an  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -Schichten untersucht, die mit der gepulsten Laserdeposition (PLD) hergestellt werden. Dazu wurden Nanokomposite,  $\text{BaHfO}_3$ - $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -Nanokomposite und atomar dotierte  $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$ -Schichten hergestellt und auf ihre Transporteigenschaften besonders bei Temperaturen unter 77 K geprüft. Beide Methoden verbessern die Eigenschaften bei tiefen und mittleren Temperaturen.

**Fe-basierte Supraleiter:** Schichtwachstum und Phasenbildung Co-dotierter  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ -Schichten wurden mithilfe der PLD untersucht. Dabei zeigte sich, dass Phasenreinheit und kritische Temperatur nicht nur vom gewählten Substratmaterial, sondern auch von der Kombination verschiedener Depositionsparameter wie Temperatur, Laserenergie und Schichtdicke abhängen. Erste  $\text{BaHfO}_3$ - $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ -Nanokomposite wurden präpariert und ausgewertet.

Mikrostruktureigenschaften und elektrische Transport-eigenschaften von NdFeAs(O,F)-Schichten, in einer Ko-

operation mit der Universität Nagoya mit unterschiedlichen Schichtdicken sowie Glühzeiten mit Molekularstrahlepitaxie (MBE) gewachsen, wurden mit hochauflösenden Röntgen- und Mikrostrukturtechniken wie Transmissionselektronenmikroskopie und Atomsondenverfahren sowie Hochfeldmessungen bis zu 35 T untersucht. Eine 22 nm dicke NdFeAs(O,F)-Schicht, (Abbildung 3) zeigt bei 4.2 K eine kritische Stromdichte von  $\sim 7.6$  MA/cm<sup>2</sup> im Eigenfeld und eine für alle Klassen eisenbasierter Supraleiter zuvor nie erreichte Pinningkraftdichte von  $F_p \approx 1$  TN/m<sup>3</sup> nahe 35 T für  $H \parallel ab$ . Detailliertes Wissen über Struktur, Orientierung, Dehnungszustand und chemische Homogenität auf verschiedenen Größenskalen ermöglicht das Verständnis der kritischen Stromdichte und der Pinningeigenschaften in NdFeAs(O<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>)-Schichten und somit die weitere Funktionalisierung dieser Materialien.

**Nb<sub>3</sub>Sn:** In einer Kooperation zwischen dem KIT und der Bruker EAS GmbH in Hanau wurden verbesserte Leiterkonzepte für Nb<sub>3</sub>Sn-haltige Tieftemperatur-Supraleiter untersucht. Die Arbeit fokussierte auf die Erzeugung von nanoskaligen Ausscheidungen im Nb<sub>3</sub>Sn-Gefüge und die Reduktion der Korngröße des Gefüges durch interne Oxidation des verwendeten Nb-haltigen Precursors. Beide Effekte sollen Pinningzentren im Material erzeugen, die die Stromtragfähigkeit des Supraleiters verbessern.

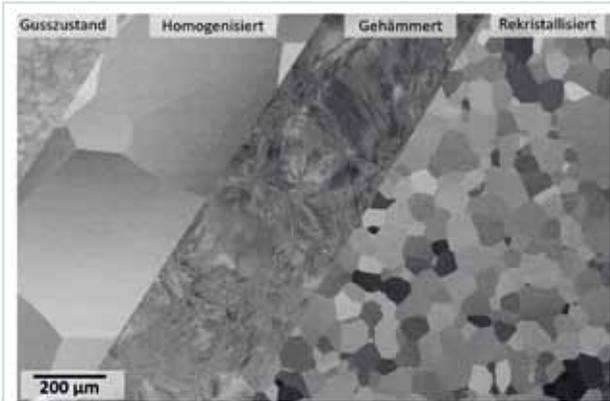
Kontakt: Jens.Haenisch@kit.edu

## Kryo- und Strukturmaterialien

Neben der Untersuchung von Struktur- und Funktionsmaterialien für den Einsatz bei kryogenen Temperaturen werden mechanische und elektromechanische Charakterisierungen an supraleitenden Drähten und Komponenten durchgeführt. Dies erfolgt in enger Kooperation mit den jeweils involvierten Forschungsthemen der verschiedenen Forschungsfelder.

### DFG-Projekt „High Entropy Alloys“

Neben der traditionellen Legierungsentwicklung bietet die Erforschung konfigurationsstabilisierter Legierungen (High Entropy Alloys – HEA) neue Einblicke in die Wechselwirkungen zwischen Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften. Anders als traditionelle Legierungen, bei denen einem Matrixelement wie Cr, Ni oder Mn weitere Legierungselemente zugefügt wer-



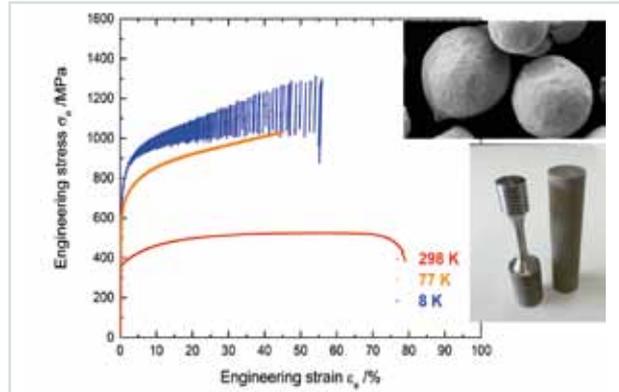
**Abb. 4:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Gefüges der HEA-Legierung HfNbTaTiZr nach verschiedenen Herstellungsschritten.

den, um mechanische und physikalische Eigenschaften gezielt einzustellen, basieren konfigurationsstabilisierte Legierungen auf der Mischung von mindestens fünf Elementen in näherungsweise equiatomarer Konzentration. Die Konfigurationsentropie begünstigt die Bildung eines einphasigen Gefüges mit zufälliger Atomanordnung. Da jedes Legierungselement sowohl als Lösungs- als auch als Matricelement zu betrachten ist, ergeben sich aus der Klasse der konfigurationsstabilisierten Legierungen neue materialwissenschaftliche Fragen. Einige Beispiele: Wie wechselwirken Versetzungen mit der lokalen atomaren Struktur? Welchen Einfluss hat die lokale Struktur auf die Zwillingsbildung? Vor allem, wie wechselwirken Temperatur und Verformungsverhalten miteinander? Das ITEP bringt seine Expertise zu kryogenen Materialtests in eine Kooperation mit dem Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde (IAM-WK) ein, um das Deformationsverhalten von zwei Modellsystemen, nämlich FeCoCrMnNi und HfNbTaTiZr, dieser neuen Legierungsklasse zu untersuchen. Dies geschieht über Zug- und Druckversuche bei kryogenen Temperaturen bis zur Raumtemperatur, gekoppelt mit einer detaillierten Analyse der Mikrostruktur des verformten Materials. Die Probenherstellung über Lichtbogenschmelzen, Wärmebehandlung und Umformung erfolgt ebenfalls in Kooperation mit dem IAM-WK, sodass sich die Probenhistorie ganzheitlich nachvollziehen lässt. Die bisherigen mechanischen Tests zeigten ein exzellentes Tieftemperaturverformungsverhalten für die kubisch-flächenzentrierte Legierung FeCoCrMnNi.

Weiterführende Untersuchungen sollen ermitteln, wie es zu den guten Tieftemperatureigenschaften kommt. Für das kubischraumzentrierte Modellsystem HfNbTaTiZr wurde erstes Probematerial erzeugt; das Ausgangsgefüge wurde mit verschiedenen Methoden (XRD, EDX, SEM, EBSD) charakterisiert. Für 2019 sind die ersten mechanischen Versuche zu diesem Modellsystem geplant.

### Additive Fertigung von 316L

Der austenitische Stahl 316L ist als hochfestes Strukturmaterial für den Einsatz bei kryogenen Temperaturen unterhalb von 77 K, wie in supraleitenden Magneten, weit verbreitet. Neue Produktionsmethoden wie die additive Fertigung ermöglichen enorme Freiheitsgrade in der geometrischen Gestaltung von Komponenten. Allerdings sollen dabei die herausragenden Eigenschaften von 316L erhalten bleiben, besonders die mechanischen

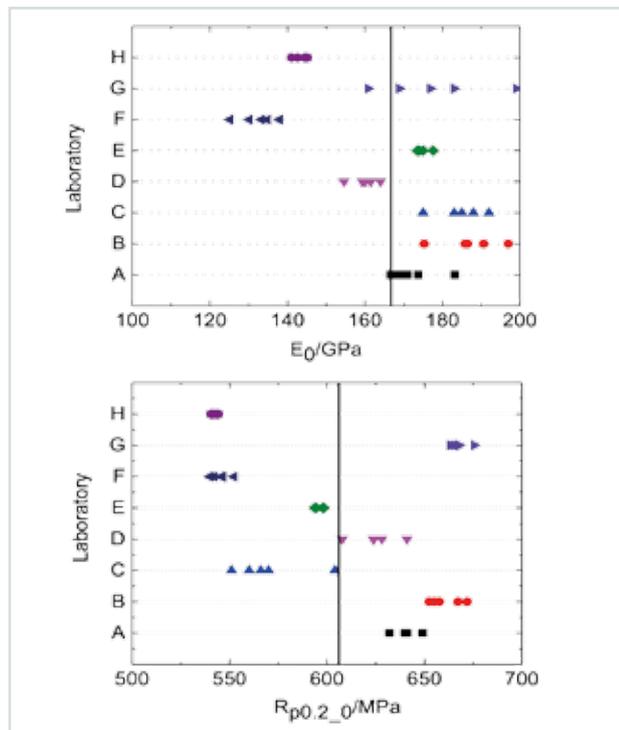


**Abb. 5:** Spannungs-Dehnungs-Kurve (links) von 316L nach Herstellung und Wärmebehandlung (1050°C/1 h); verwendetes Pulver ( $\phi \sim 35 \mu\text{m}$ ) und eine fertige Zugprobe für den kryogenen Test (rechts).

Eigenschaften für kryogene Anwendungen. Unter den Verfahren der additiven Fertigung zeichnet sich die Powder Bed Fusion (PBF) durch hohe Temperaturgradienten sowie schnelle Heiz- und Rückkühlungsraten aus, was im Vergleich zu herkömmlichen Herstellungsmethoden wie Guss und Schmieden zu deutlichen Unterschieden bei der Mikrostruktur führt. So wurden 316L-Proben, hergestellt mit PBF, auf ihre Mikrostruktur sowie ihre kryogenen mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Glühnachbehandlung untersucht. Das Material zeigt hohe Duktilität bei hoher Festigkeit gerade bei tiefen Temperaturen.

### Internationaler Ringversuch

Im Rahmen der International Electrotechnical Commission IEC werden Normen zu Testmethoden für supralei-



**Abb. 6:** Beispiel der erhaltenen Ergebnisse der teilnehmenden Labore für  $E_0$  and  $R_{p0.2}$  bei 77 K eines der supraleitenden Bänder (C2) des internationalen Ringversuches)

tende technische Drähte bzw. Bänder erstellt und veröffentlicht (Normenwerke IEC 61788-1 bis 61788-20). Zur Vorbereitung einer Norm für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von technischen REBCO-Bändern unter Zugspannung bei kryogenen Temperaturen wurde ein internationaler Ringversuch organisiert und durchgeführt. Dazu wurde eine Messvorschrift erstellt und zusammen mit fünf kommerziell erhältlichen REBCO-Bändern von verschiedenen Herstellern an acht teilnehmende Labors in Europa, Asien und den USA verteilt. Die Ergebnisse wurden am KIT zusammengefasst und analysiert. Die Messunsicherheit von E-Modul oder  $R_{p0,2}$  im jeweiligen Labor liegt innerhalb der erwarteten Bandbreite. Allerdings zeigt sich eine signifikante Erweiterung der Unsicherheit beim Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Labors. Als möglicher systematischer Einfluss wurde dabei die Unsicherheit bei der Bestimmung der Querschnittsfläche der supraleitenden Bänder ermittelt. Um weitere Unsicherheitsquellen zu definieren, werden die Ergebnisse zurzeit tiefergehend analysiert. Ziel ist, die Messvorschrift zu verfeinern, die Messunsicherheit zwischen den Labors zu minimieren und schließlich eine ISO/IEC-Norm zu veröffentlichen.

### Elektromechanische Untersuchung supraleitender Kabel

Bei der Entwicklung eines supraleitenden Hochstromkabels für den Betrieb in Magnetfeldern (30 kA bei 12 T und 4,2 K) arbeitet die italienische Forschungseinrichtung ENEA eng mit dem KIT zusammen. Das von ENEA entwickelte Kabel mit einem Durchmesser von rund 25 mm besteht aus einem zentralen Former aus einer Aluminiumlegierung, in dem Stapel von supraleitenden REBCO-Bändern in sechs radial angeordneten Nuten eingelegt sind, umschlossen von einem Aluminiumrohr. Die supraleitenden Eigenschaften dieses Kabels wurden unter transversalen Kräften charakterisiert, wie sie bei Lorenzkraften in einem Magneten auftreten. Mit der verfügbaren hydraulischen Zugmaschine (max. 600 kN) wurden elektromechanische Tests bei 77 K im Eigenfeld durchgeführt. Das Kabel zeigte ab einer Belastung von etwa 270 kN (etwa 200 MPa bezogen auf die transversale projizierte Kabelfläche) ein erstes Einbrechen der supraleitenden Eigenschaften. Zusätzlich wurde die elektrische Kopplung zwischen den supraleitenden Stapeln zweier nebeneinanderliegender Nuten des Kabels vermessen. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Materialeigenschaften laufen weiterführende FEM-Berechnungen, um die Ergebnisse über die Spannungsverteilung während der Verformung zu interpretieren.

Kontakt: Klaus.Weiss@kit.edu



Abb. 7: Querschnittsbild des supraleitenden Hochstromkabels ( $\varnothing$  25 mm) vor und nach der transversalen Verformung bei 77 K.

## Kryogene Stoffeigenschaften

Im Rahmen der Technologieentwicklung kryogener Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles – CMRC) für HTS-Anwendungen wurde in Kooperation mit dem Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) eine erste Doktorarbeit abgeschlossen [1]. Diese untersucht brennbare Kältemittelgemische und zweistufige Prozesse, sogenannte Kaskaden, für Kühltemperaturen bis zu 50 K. In einer zweiten Doktorarbeit wurde eine umfangreiche Berechnungsumgebung entwickelt, mit der sich die Hauptwärmeübertrager dieser Prozesse modellieren lassen. Eine dritte Doktorarbeit erweiterte dieses Programm für die Auslegung CMRC-gekühlter Stromzuführungen um die elektrische Modellierung der Jouleschen Wärmelast. Damit wurden erste Prototypen von 10-kA-HTS-Stromzuführungen entworfen, die mit konventioneller Wärmeübertragertechnologie eine Effizienzerhöhung um 45 % gegenüber dem Stand der Technik erwarten lassen. Durch die Verwendung mikrostrukturierter Wärmeübertrager lässt sich die Effizienz zukünftig noch weiter steigern.

Grundvoraussetzung für die Auslegung und Funktion der Kühlkreisläufe ist die Kenntnis der Stoffdaten kryogener Stoffgemische. Dafür wurde die neue Versuchsanlage CryoPHAEQTS (Cryogenic Phase Equilibria Test Stand) in einem neuen Labor aufgebaut. Mit dieser Anlage, die für Temperaturen von 15–300 K sowie Drücke bis 15 MPa konzipiert und nach ATEX für die Verwendung brennbarer und oxidierender Fluide geeignet ist, lassen sich künftig alle kryogenen Stoffgemische untersuchen. Die generischen experimentellen Daten sind zur Anpassung von Zustandsgleichungen erforderlich, die das reale Stoffverhalten für die Prozessauslegung und -optimierung abbilden.

Kontakt: Steffen.Grohmann@kit.edu

[1] Kochenburger, T.: *Kryogene Gemischkältekreisläufe für Hochtemperatursupraleiter-Anwendungen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Veröffentlichung ausstehend.*

## Leitertechnologien

2018 fokussierte die Arbeit auf Untersuchungen zur Herstellung und zum Einsatz verschiedener HTS-Hochstrom-Leiterkonzepte für Anwendungen in Beschleunigermagneten sowie in der Energietechnik.

### Fertigung von acht Meter langen HTS CroCos in unterschiedlichen Größen

Die in den vergangenen Jahren entwickelte Technologie der Fertigung von HTS CrossConductors (HTS CroCos) wurde 2018 auf eine runde Leiteraußengeometrie und Längen bis zu acht Metern erweitert (Details siehe Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie). Leiter aus 6 mm und 4 mm breiten Bändern sowie aus 3 mm und 2 mm breiten Bändern wurden gefertigt und erfolgreich getestet. Die HTS CroCos größeren Durchmessers werden im SupraDCKabel eingesetzt (siehe Highlight), die Leiter kleineren Durchmessers werden für Vortests eines Wicklungsdemonstrators aus HTS CroCos verwendet.

## Wechselstromverluste im CroCo-Kabel

2018 wurde die Anwendbarkeit des CrossConductor-Leiterkonzepts für Wechselstrom (AC)-Kabel mit kompakten Kryostatdurchmessern theoretisch und experimentell untersucht. Für die Experimente wurde ein neuer Aufbau zur kalorimetrischen Bestimmung der AC-Verluste entwickelt (Abbildung 8). Bei der experimentellen Untersuchung wird der Einfluss verschiedener Leiterströme, der Anzahl der elektrischen Phasen und der Leiteranordnungen auf die Wechselstromverluste analysiert.

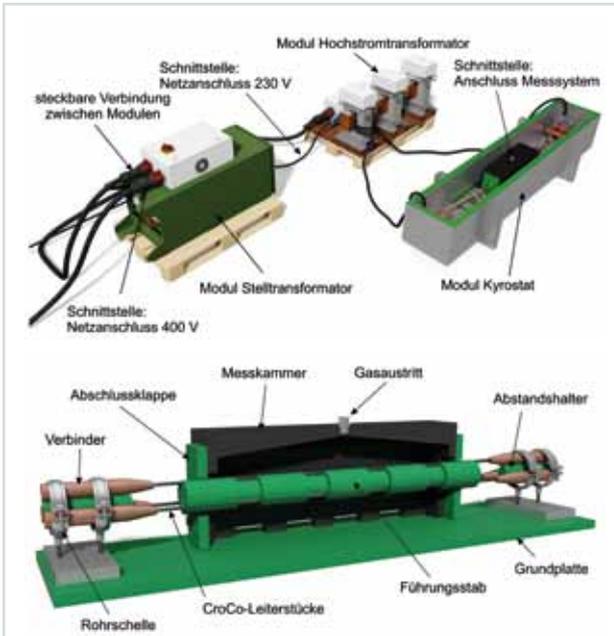


Abb. 8: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Messung der AC-Verluste.

Abbildung 9 zeigt die Wechselstromverluste als Funktion des Leiterstroms für ein- und dreiphasige Anordnungen unterschiedlicher Größen. Die untersuchten Leiteranordnungen orientieren sich an in der Praxis verwendeten Kryostat-Innendurchmessern; die Nenndurchmesser sind DN 40, DN 50 und DN 65.

Ein supraleitendes Kabel mit CrossConductors lässt sich wesentlich kompakter auslegen als ein konzentrisches Kabel. Bei geringen Wechselstromverlusten von 2 W/m (dreiphasig) und einem Leiterstrom von 600 A bei 77 K lässt sich ein Kabel mit Kryostat-Innendurchmesser DN 40 und einem Kabel-

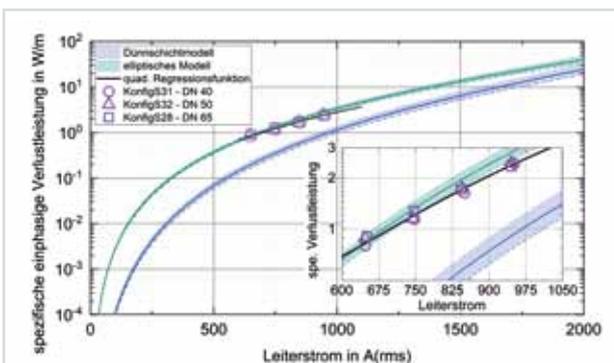


Abb. 9: Berechnete und gemessene Wechselstromverluste als Funktion des Leiterstroms.

Außendurchmesser von insgesamt ca. 78 mm realisieren. Damit lässt sich der Kabeldurchmesser bei einem CrossConductor-Kabel gegenüber einem konzentrischen Leiter (Außendurchmesser ca. 150 mm) nahezu halbieren.

## Quenchverhalten von Roebel-Kabeln

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde das Quenchverhalten eines Roebel-Kabels untersucht. Die Minimale Quenchenergie (MQE) wurde bei Temperaturen im Bereich von 73,5–84 K mithilfe eines eigens konstruierten Probenträgers für den VATESTA-Einsatzkryostaten bestimmt. Dafür wurden bei verschiedenen Transportströmen Wärmepulse mit zunehmender Intensität in einen Strand des Roebel-Kabels eingekoppelt, bis ein Quench auftrat. Abbildung 10 zeigt die gemessenen MQE-Werte. Die experimentellen Resultate wurden unter Einbeziehung der Kopplungswiderstände mit berechneten MQE-Werten verglichen und zeigen, dass der thermische Kontakt zwischen den einzelnen Strands des untersuchten Roebel-Kabels äußerst gering ist.

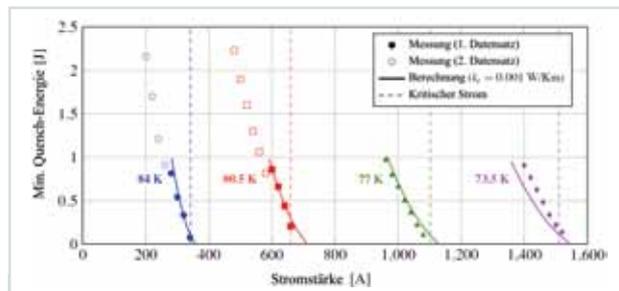


Abb. 10: Minimale Quenchenergie des untersuchten Roebel-Kabels als Funktion des Transportstroms bei verschiedenen Temperaturen.

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu

## Highlight SupraDCKabel – 35-kA-DC-Kabeltest

Supraleitende Kabel bieten im Hochstromsegment wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Lösungen, was Größe, Gewicht und Systemverluste betrifft. Im SupraDCKabel-Projekt werden zunächst die supraleitenden Elemente für ein solches Kabel gefertigt und getestet. Dabei werden REBCO-Bänder zu zwölf CroCos verlötet, die anschließend zum SupraDCKabel verkabelt werden. Im ersten Halbjahr 2018 wurden die CroCos hergestellt und der kritische Strom  $I_c$  jedes CroCos individuell bestimmt. Im zweiten Halbjahr folgte der Zusammenbau zum Hochstromkabel mit anschließendem Test in einem Stickstoffbad und unter Eigenfeld.

### Einzel-CroCo-Charakterisierung

Die CroCos sind je 3,60 Meter lang, bestehen aus 22 x 6 mm breiten und 10 x 4 mm breiten REBCO Bändern und haben einen Außendurchmesser von ca. 7,6 mm. Der spezifizierte kritische Strom eines einzelnen CroCos beträgt 3150 A bei LN2 im Eigenfeld. Eingesetzt wurden Bänder von zwei verschiedenen Herstellern.

Zur Stromversorgung wurden die CroCos in die Nut eines runden Kupferprofils eingelötet. Zusätzlich zum  $I_c$  wurden die Widerstände der Stromzuleitungen gemessen. Abbildung 11 zeigt die  $I_c$  aller zwölf CroCos bei 77 K und Eigenfeld. Der Spannungsabfall wurde über Abschnitte von zwei und 2,8 Meter gemessen. Außerdem abgebildet sind  $I_c$  Berechnungen basierend auf den vom Hersteller angegebenen minimalen, maximalen und durchschnittlichen  $I_c$  der einzelnen Bänder.

Die  $I_c$  der ersten vier CroCos bilden die Herausforderungen der erweiterten CroCo-Produktion ab und erreichen mehrheitlich knapp die Spezifikation. Die  $I_c$  von CroCo 5 bis 10 liegen im Bereich von über 3500 A und stimmen genauer mit den Berechnungen überein, was auf das deutlich verbesserte Fertigungsverfahren zurückzuführen ist.

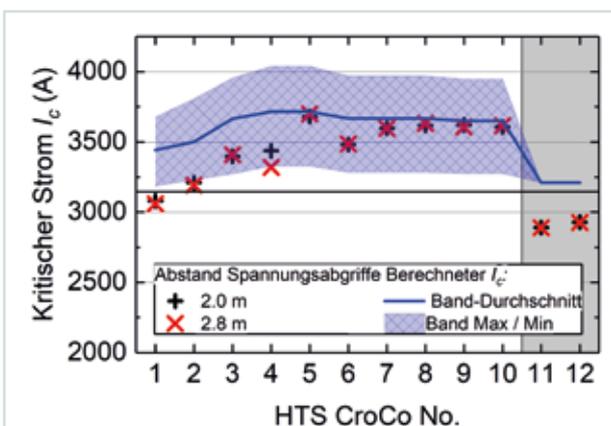


Abb. 11: Gemessene und berechnete kritische Ströme der zwölf im SupraDCKabel verbauten HTS CroCos.

### 35-kA-Kabeltest

Für den Kabeltest wurden die zwölf CroCos in einer konzentrischen Anordnung auf einen Aluminiumträger montiert, wie in Abbildung 12 zu sehen ist. Der Testaufbau bietet Platz für zukünftige Erweiterungen. Abbildung 13 zeigt den Spannungsabfall über die zwölf CroCos während der finalen Messung. Die CroCos 4 und 16 erreichen bei einem Gesamtstrom von 33 kA ihren individuellen  $I_c$ . Das Kabel lässt sich noch bis 34 kA stabil betreiben. Kurzzeitig wurde ein Gesamtstrom von 35 kA erreicht.



Abb. 12: Testaufbau für das SupraDCKabel.

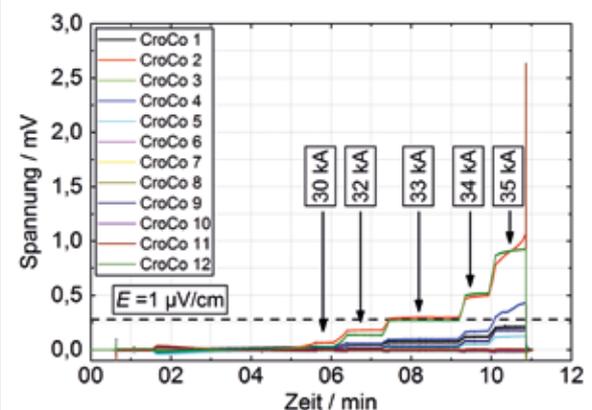


Abb. 13: CroCo-Spannungsabfall bei Gesamtkabelströmen von bis zu 35 kA.

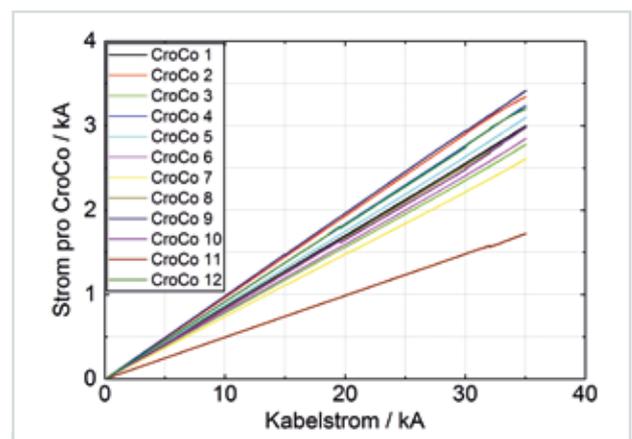


Abb. 14: Stromverteilung in CroCos als Funktion des Gesamtkabelstroms.

Abbildung 14 zeigt den Strom jedes CroCos in Abhängigkeit vom Gesamtstrom. Prinzipiell ist wegen hoher Zuleitungswiderstände wenig Stromumverteilung zu erkennen. Zudem fällt auf, dass CroCo 15 deutlich weniger Strom trägt als die übrigen CroCos, was auf einen schlechteren elektrischen Kontakt zurückzuführen ist. Berechnungen basierend auf den CroCo Ic zeigen, dass bei idealer Stromverteilung die Stromtragfähigkeit des Kabels im Bereich von 40 kA bei 77 K im Eigenfeld liegt.

Künftige Arbeiten werden kompaktere Varianten des Kabels mit optimierten Zuleitungswiderständen untersuchen.



Das erfolgreiche Entwicklungsteam des SmartCoil Strombegrenzers im Leistungslabor von Siemens in Berlin (von links): Christian Schacherer, Andrej Kudymow, Anne Bauer, Steffen Elschner, Wilfried Goldacker.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Energietechnische Anwendungen der Supraleitung

**Koordination: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe**

Im Forschungsfeld Energietechnische Anwendungen der Supraleitung bearbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ITEP die folgenden Themen:

- Supraleitende Netzkomponenten
- Neue Anwendungen der Supraleitung
- Modellierung von Supraleitern und Komponenten
- Echtzeit-Systemintegration

### Supraleitende Netzkomponenten

#### Supraleitende Stromschiene 3S

Das BMWi-Verbundprojekt „Supraleitende Stromschiene 3S“ (FZK 03ET129B), in dem das ITEP mit den Partnern Vision Electric Superconductors Kaiserslautern und Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden weltweit erstmals eine modulare supraleitende Hochstromschiene entwickelt hat, wurde 2018 mit der Installation und der Inbetriebnahme der Stromschiene erfolgreich abgeschlossen. Das Verbundvorhaben dauerte vom 1. Mai 2015 bis zum 30. Oktober 2018. Ziel war, eine 20 m lange supraleitende Demonstratorstrecke mit einem Nennstrom von 20 kA zu fertigen. Dabei wurde die 3S-Stromschiene modular aus vorgefertigten starren Teilen in einem industriellen Umfeld aufgebaut. Abbildung 1 zeigt ein Winkelstück der 3S-Schiene mit einem Nominalstrom von 20 kA, bereit für die Endmontage.



**Abb. 1: Winkelstück einer 20 kA supraleitenden Hochstromschiene. (Foto: Vision Electric Superconductors)**

#### Wesentliche Ergebnisse des Projekts sind:

- Simulationsmodell der Stromtragfähigkeit und der Ripple-Verluste in HTS
- Entwicklung und Patentierung niederohmiger elektrischer Kontakte mit weniger als 0,4 W/Joint
- Konstruktion einer Schiene zur Kompensation der thermischen Ausdehnung und zum Tragen der Lorentzkräfte
- Subscale-Test am KIT mit THEVA-HTS bei 77 K und Nominalstrom 2 Strands x 10 kA = 20 kA sowie Überstromtest 2 x 20 kA für 100 ms.

- Einbau und Inbetriebnahme einer Stromschiene in einer Chlorelektrolyse; Stromzuschaltung im Dezember 2018

#### Testanlage VATESTA

Der temperaturvariable Messstand zum Test von Hochstrom-Supraleitern und Komponentenmodellen im magnetischen Hintergrundfeld, kurz VATESTA, wurde 2018 erstmals für wissenschaftliche Messungen verwendet. Er ermöglicht bei einer warmen Bohrung von 80 cm ein Magnetfeld von bis zu 5 T. Im Einsatzkryostaten sind variable Temperaturen von 30–80 K möglich.

Erstmals eingesetzt wurde VATESTA zur Messung der Quenchausbreitung in Roebel-Kabeln bei variablen Temperaturen im Rahmen einer Kooperation mit CERN. Die Ergebnisse werden 2019 in der Doktorarbeit von Simon Otten über „HTS Roebel cables with thermal and mechanical stabilizations“ veröffentlicht. Im November 2018 wurde die Anlage nach Reparatur und Verbesserungen am Magnetsystem technisch abgenommen.

#### Supraleitende 380-kV-Kabel

Mit dem Projektpartner TenneT TSO GmbH erstellte das ITEP erstmals ein konzeptionelles Design für eine supraleitende 380-kV-Teilerdverkabelung und betrachtete es ganzheitlich. Nenndaten und Aufbau sind in Abbildung 2 dargestellt. Wichtige Eigenschaften dieses Kabelkonzepts sind die magnetische Schirmung, die geringen elektrischen Verluste bei hoher Belastung und der geringe Trassenbedarf. Die technischen und ökonomischen Untersuchungsergebnisse sowie die einzelnen Berechnungsschritte fließen in einen Projektbericht ein. Damit entsteht eine offene Diskussionsplattform, um die wichtigsten Fragen der Übertragungsnetzbetreiber zu erörtern, wie den möglichen Arbeitsbereich und damit verbunden die maximalen Trassenlängen dieser Kabeltechnologie. Um das ökonomische Potenzial dieses konzeptionellen Designs zu bewerten, ist die Wirtschaftlichkeit von konventionellen und supraleitenden Kabelsystemen zu vergleichen. So lässt sich neben der technischen Machbarkeit auch zeigen, dass sich diese innovative Technologie in einem ähnlichen Kostenbereich bewegt wie konventionelle Erdkabel. Damit weist sie großes Potenzial für eine Realisierung auf.

#### Die wichtigsten Ergebnisse des Projekts sind:

- Übertragungslängen je nach Kühlkonzept 3–5 km
- Bei Bemessungsstrom bis zu 60 % Verlustenergieersparnis
- Keine Beschädigung des Supraleiterkabels bei einem Kurzschlussstrom (63 kA und 300 ms)
- Supraleitendes Kabelkonzept als technisch machbare und wirtschaftliche sinnvolle Alternative zu konventionellem Erdkabel



Abb. 2: Skizze und Nenndaten des entwickelten und untersuchten supraleitenden 380-kV-Kabels.

Kontakt: Andrej.Kudymow@kit.edu

## Neue Anwendungen der Supraleitung

Schwerpunkte der Forschung liegen vor allem auf elektrischen bzw. hybridelektrischen Flugzeugantriebssystemen. Die Arbeiten laufen innerhalb des BMWi-Projekts TELOS mit Partnern wie Airbus und Siemens sowie im Rahmen verschiedener Doktorarbeiten in enger Kooperation mit Siemens. Sie befassen sich unter anderem mit der Entwicklung eines Tools zur analytischen Auslegung und Optimierung hybridelektrischer Luftfahrtantriebe, mit dem Design und der Konstruktion einer rotierenden elektrischen Maschine basierend auf supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid sowie mit der Entwicklung eines Leistungsverteilungssystems auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern (TELOS). Im Rahmen des EU-Projekts ASUMED werden darüber hinaus Methoden für eine 2D-Modellierung von einzelnen Windungen in einer Motorwicklung und für die 3D-Modellierung von Motorkomponenten entwickelt. Diese Arbeiten beziehen sich ebenfalls auf elektrische Flugzeugantriebe, sind aber dem Forschungsthema „Modellierung von Supraleitern und Komponenten“ zugeordnet. Im Folgenden werden die Arbeiten des Jahres 2018 vorgestellt.

Für die rotierende elektrische Maschine auf der Basis von supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid wurde zunächst die Motortopologie gewählt. Daran schloss sich eine analytische Vorauslegung an, welche die Basis für ein detailliertes Motordesign bildet. Für das Motordesign werden nun ein transientes elektromagnetisches FEM-Modell, ein thermisches CFD-Modell sowie ein strukturmechanisches FEM-Modell des Motors entwickelt. Zugleich laufen Untersuchungen zu AC-Verlusten von MgB<sub>2</sub>-Multifilamentleitern. Diese Arbeiten erstrecken sich bis ins Jahr 2019.

Innerhalb des BMWi-Verbundprojekts TELOS wurden die Ziele für das Leistungsverteilungssystem auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern bei einer Projektaufstockung neu definiert. Für den Einsatz in größeren Flugzeugen wurde die Antriebsleistung bei konstantem Spannungslevel von 10 MW auf 40 MW erhöht. Darüber hinaus soll Wasserstoff als Kühlmedium für alle supraleitenden Komponenten des hybridelektrischen Antriebssystems eingesetzt werden, da sich der erwärmte Wasserstoff direkt in der Gasturbine verbrennen und damit zugleich als Treibstoff nutzen lässt.

Das bisherige Kabeldesign, das für eine zu übertragende Leistung von 10 MW und eine Kühlung mit unterkühltem Stickstoff (LN<sub>2</sub>) ausgelegt war, musste an die neuen Randbedingungen angepasst werden. Die durch die Leistungserhöhung um den Faktor vier höhere Stromtragfähigkeit lässt sich dank der tieferen Betriebstemperatur und der verbesserten supraleitenden Eigenschaften auch ohne zusätzliches Supraleitermaterial erreichen. Jedoch stellen die um den Faktor 16 höheren Lorentzkräfte eine Herausforderung für das Design eines zweipoligen Kabels mit geringem Polabstand dar.

In zahlreichen Iterationsschritten wurde eine Trägerstruktur für die Supraleiterstapel entworfen und gefertigt. Sie soll die Supraleiter wellenförmig führen, sodass thermisch bedingte Längenänderungen von ca. 5 mm pro Meter Kabellänge ausgeglichen werden können.

Ein erster Hochspannungstest an einem mit Cu-Bändern bestückten Dummy-Kabel bis zu 5 kV zeigte, dass das Kabeldesign prinzipiell hochspannungstauglich ist. Auch nach einem Lorentzkräftetest in Flüssigstickstoff mit maximalen Strömen bis 19,5 kA (AC, zehn Halbwellen, 50 Hz) waren an einem ca. 2 m langen mit Cu-Bändern bestückten Kabel keine sichtbaren Beschädigungen festzustellen. Daher ist auch für DC-Ströme bis 13,3 kA (entsprechend einer Leistung von 40 MW bei einer Spannung von 3 kV) keine Schädigung der 3D-gedruckten Kunststoffführung der Leiter zu erwarten. (siehe Abbildung 3).



Abb. 3: Mit Cu-Bändern bestücktes Dummy-Kabel für den Lorentzkräftetest vor dem Einbau in den Kryostaten.

Parallel zum Kabeldesign wurden verschiedene Konzepte für Kontakte entwickelt und getestet. Diese sollen einen geringen Übergangswiderstand von Leiterstapel zu Leiterstapel garantieren und gleichzeitig für eine gute Stromumverteilung zwischen den einzelnen Bänderbenen sorgen.

Da der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in der aktuellen TELOS-Projektphase aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich ist, wird an der CuLTka-Anlage ein Kryodemonstrator aufgebaut, mit dem sich auf der Basis von gasförmigem Helium Erkenntnisse zu Temperatur- und Druckverhältnissen sowie zu Strömungswiderständen gewinnen lassen. Dabei wird die an der CuLTka-Anlage vorhandene Infrastruktur zur Bereitstellung des Heliumgases mit variabler Temperatur genutzt. Der etwa 20 m lange Kabelkryostat wird im Inneren mit

einer Trägerstruktur und Cu-Bändern bestückt, mit denen sich Kabel- und Kontaktverluste simulieren lassen. Das Design des Kryodemonstrators ist weitgehend abgeschlossen; erste Komponenten wurden bestellt. Auch die Umbauarbeiten an der CuLTka-Anlage haben begonnen, sodass der Kryodemonstrator 2019 aufgebaut und in Betrieb genommen werden kann.

Zur Auslegung und Optimierung des gesamten Antriebsstrangs eines hybridelektrischen Antriebssystems begannen im Oktober 2018 grundlegende Arbeiten im Rahmen einer Doktorarbeit. Sie ermöglichen zukünftig konkretere Vorgaben zur Optimierung der einzelnen Komponenten.

Kontakt: Sonja.Schlachter@kit.edu

## Modellierung von Supraleitern und Komponenten

Spulen ohne Isolierung zwischen den Windungen, gewickelt mit Hochtemperatur-Supraleitern, können sich selbst vor elektrischen oder thermischen Störungen schützen. Eine nicht isolierte Spule mit einem Außendurchmesser von 90 mm wurde gewickelt, um die thermischen Eigenschaften mithilfe von fluoreszenter Wärmebildgebung zu untersuchen. Dazu wird die Spulenoberfläche mit einer dünnen fluoreszierenden Beschichtung versehen. Wird diese mit UV Licht bestrahlt, verändert sie ihre Emissionsintensität als Funktion der Temperatur. Über die aufgenommenen Veränderungen der Lichtintensität lassen sich die Oberflächentemperaturen ermitteln. Abbildung 4 zeigt die Spulentemperatur bei 110 % des kritischen Stroms nach fünf Minuten Betrieb. Der größte Teil der Spule ist weiterhin supraleitend (unter 93 K), während die Mitte der Spule eine Erwärmung zeigt. In der Mitte ist das lokale Magnetfeld größer. Dies reduziert die kritische Stromdichte und verursacht Joulesche Wärme.

Im transienten Betrieb, beispielsweise während des Ladens oder Entladens einer nicht isolierten Spule, fließt

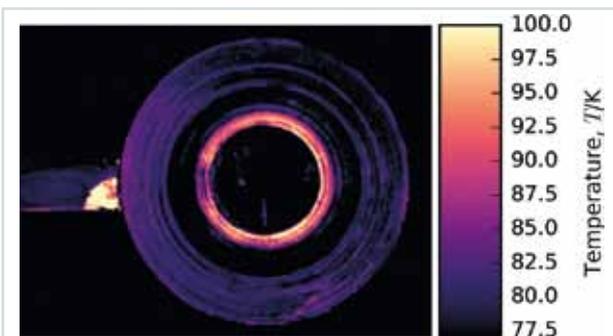


Abb. 4: Das Wärmebild einer nicht isolierten Spule zeigt die Erwärmung an Stellen mit reduziertem kritischem Strom.

Strom sowohl in die radiale als auch in die axiale Richtung (Abbildung 5). Die Ströme sind also in allen Windungen unterschiedlich. Um das transiente Verhalten der Spule abzubilden, wurde ein Ersatzschaltungsmodell entwickelt. Um die Wechselstromverluste eines supraleitenden Motors zu berechnen, wurde ein neues 2D-Modell entwickelt, basierend auf der Finiten-Elemente-Methode, die sich in Comsol mit der neuen T-A

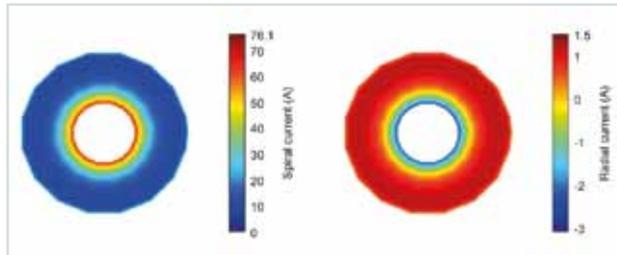
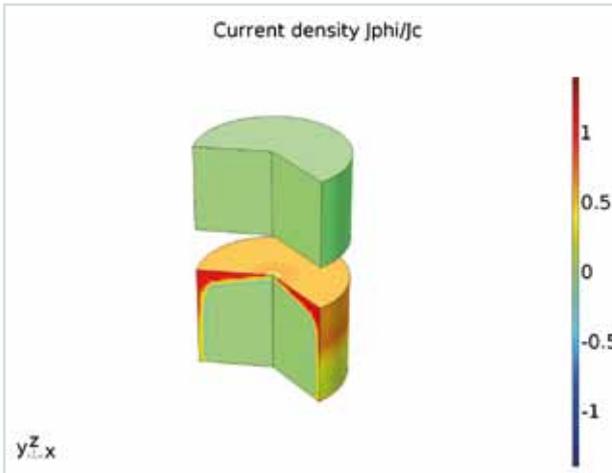


Abb. 5: Stromverteilung in einer nicht isolierten Spule beim Rampen von 30 A auf 31 A mit einer Steigerung von 10 A/s. Links: Strom in Spulenrichtung. Rechts: Strom in radialer Richtung.

Formulierung implementieren lässt. Dabei wird in Regionen mit Supraleiter und Normalleiter das B-Feld mithilfe des Stromvektorpotenzials  $T$  bzw. des magnetischen Vektorpotenzials berechnet. Da die Supraleiterschicht in HTS-beschichteten Leitern extrem dünn ist, lässt sich ein solcher Leiter als 1D-Objekt modellieren. Dies verringert Freiheitsgrade wesentlich und verkürzt auch die damit verbundene Berechnungszeit. Die T-A Formulierung wurde dazu eingesetzt, große Spulen mit mehreren Hundert oder Tausend Windungen zu untersuchen. Vor allem wurde das Modell um das homogenisierte sogenannte Multiscale-Modell erweitert, in dem das Simulieren jeder einzelnen Windung nicht mehr erforderlich ist. Dies reduziert Freiheitsgrade und Rechenzeit weiter. So dauert beispielsweise die Simulation einer Solenoid-Spule, bestehend aus zehn Pancake-Spulen mit je 80 Windungen, auf einem Tablet-Computer weniger als vier Stunden. Sollen alle Windungen im Detail simuliert werden, lässt sich dies mithilfe des homogenisierten Modells in 22 Minuten erreichen.

Zur Einschätzung der kritischen Stromdichte einer supraleitenden Spule können die verfügbaren transienten Simulationen auf der Basis der H- oder der T-A Formulierung eingesetzt werden, wobei beide das gleiche Ramp-up-Verfahren benutzen wie die Experimente. Neben den transienten Modellen eignen sich dazu auch statische Simulationen wie die Leistungskennlinien-Methode oder das P-Modell, das auf dem asymptotischen Limit der Faraday-Gleichung basiert, wenn die Zeit sich dem Unendlichen nähert. Um die beste Methode für die Berechnung der kritischen Stromdichte einer supraleitenden Spule zu finden, wurden Vor- und Nachteile der vier Methoden anhand von Referenzexperimenten ermittelt. Daraus ergaben sich als zu bevorzugende Methoden mit günstiger Rechenzeit die T-A Formulierung, das P-Modell und die Leistungskennlinien-Methode.

Weiterhin wurde ein numerisches Modell entwickelt, um das Phänomen des magnetischen Schwebens genauer zu betrachten (Abbildung 6). Dieses Modell verknüpft die H-Formulierung des Elektromagnetismus mit der Arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE)-Formulierung, welche die Verformung der Standardelemente erlaubt. Dank dieses Modells lassen sich nun ganze Schwebesysteme mit supraleitendem Massivmaterial inklusive der Bewegung des Permanentmagneten modellieren. Die Methode ist intuitiv, flexibel und dient als Alternative zum Standardverfahren der Simulation solcher Systeme. Dabei wird lediglich der Supraleiter simuliert; im Nachhinein wird eine Zeit-Randbedingung erstellt, um den Effekt eines sich bewegenden Magneten zu imitieren.



**Abb. 6: Schwebender Permanentmagnet (oberer Zylinder) über einem supraleitenden Bulkmaterial. Gezeigt werden die induzierten Ströme im Supraleiter, während der Permanentmagnet sich im freien Fall annähert.**

Kontakt: Francesco.Grilli@kit.edu

## Echtzeit-Systemintegration

Für 2018 sind verschiedene Fortschritte und Entwicklungen in den Bereichen der Sektorenkopplung und der neuen Technologien zu verzeichnen.

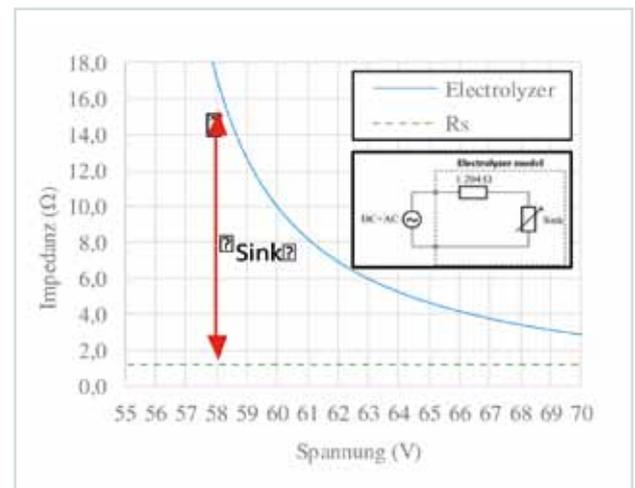
Der Bau des Smart Energy System Simulation Control Centers (SENSSiCC – Bau 668), in dessen Laborhalle auch die 1-MVA-Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Umgebung einziehen wird, ist mittlerweile weit fortgeschritten. 2018 wurden Außenhülle und Fassade fast vollständig fertiggestellt; im vierten Quartal ging auch der Innenausbau zügig voran. Komponenten zur Energieversorgung des 1-MVA-PHIL Versuchstands – Trafo und Schaltanlage – wurden geliefert und verkabelt; die Versorgungsseite der Verstärkermodule wurde an die Primärverteilung angeschlossen. Die ersten drei 200-kVA-Module der Verstärkeranlage wurden geliefert. Die Kühlung des 4-Quadrantenverstärkersystems wurde beauftragt. Zur Fertigstellung der 1-MVA-PHIL-Versuchsanlage sind RLC-Lasten erforderlich; deren Spezifikation und Ausschreibung kamen voran. Weitere Komponenten für die Echtzeitsimulation wurden besorgt.

Im Juni 2018 startete das BMWi-Verbundprojekt FlyGRID mit einem Kick-off-Treffen am ITEP. Die Arbeiten liefen planmäßig. In dem Projekt wird der netzdienliche Einsatz eines reaktionsschnellen supraleitend gelagerten Schwungmassenspeichers untersucht, um das Betriebsmittel der Marktreife zu nähern. Dazu wurden auch geeignete Aufstellorte im Niederspannungsnetz des Projektpartners NHF für den Feldtest bestimmt. Erste Ergebnisse auf der Grundlage einer Echtzeitsimulation des FlyGRID Schwungmassenspeichers wurden auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Benchmark-Netze in der Echtzeitumgebung für den vorgelagerten Test im PHIL Labor wurden implementiert.

In Kollaboration mit Kollegen der Lappeenranta University of Technology (LUT) in Finnland gelang es, eine hochdynamische Emulation des Verhaltens eines Alkali-Elekt-

rolyseurs in der Power-Hardware-in-the-Loop-Trainingsstation umzusetzen. Dabei wurden drei 5-kVA-Module des 4-Quadrantenstellers als variable Senke eingesetzt. Sie ahmen das nichtlineare Verhalten des Betriebsmittels auf der Basis interpolierter Messwerte auf einer Bandbreite von mehreren kHz in Echtzeit nach (Abbildung 7). Die Emulation kann zum Testen von Leistungselektronik und zur Vorhersage der Wasserstoffproduktion dienen. Für die Zukunft ist geplant, den Einfluss von Thyristorbrücken auf die Elektrolyse zu untersuchen. Eingesetzt als Gleichrichter, verursachen sie neben der Gleichstromkomponente auch höherfrequente Wechselstromrippel. Die Arbeit wurde 2018 auf der European Power Electronics Konferenz in Riga präsentiert und in deren Proceedings publiziert. In Energienetzen mit einem hohen Anteil volatiler und intermittierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien lässt sich Wasserstoff als Energieträger zur langfristigen und saisonalen Energiespeicherung nutzen. In der chemischen Industrie können Elektrolyseure zur Laststeuerung dienen.

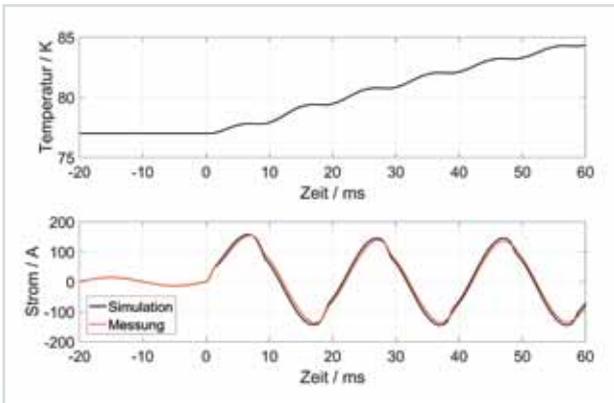
Auch Echtzeitmodelle weiterer Komponenten, besonders mit Bezug zur Kopplung von Energiesektoren, wurden 2018 gestartet, um das Modellportfolio zu ergänzen. Zum Beispiel wurde die Entwicklung eines Modells für ein Mini-Blockheizkraftwerk begonnen. Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde ein Demonstrator eines supraleitenden Strombegrenzers entwickelt. Dabei geht es um die Auslegung, den Bau und die



**Abb. 7: PHIL-Versuchsaufbau: Emulation des Impedanzverhaltens des Elektrolyseurs in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung und Darstellung des Laboraufbaus mit seriellen Widerstand von 1,204 Ω als Grundimpedanz.**

Systemintegration eines supraleitenden Luftspulen-Strombegrenzers. Ein derartiger Strombegrenzer besteht aus einer Primärkupferspule mit kurzgeschlossenen Ringen aus Supraleiterband als sekundärseitigem Einsatz. Im Fall der Begrenzung übersteigt zunächst die induzierte Stromstärke die kritische Stromstärke des Bands. Die Schirmung des Felds der Primärspule, durch die der Betriebsstrom fließt, bricht dadurch zusammen. Dann übersteigt auch die Temperatur den kritischen Wert. Weltweit erstmals wurde eine dynamische Echtzeitsimulation des Strombegrenzers entwickelt, die auch transiente elektromagnetische und thermische Effekte einbezieht. Neben Messwerten kann die Simulation auch nicht messbare Parameterwerte liefern (Abbildung 8).

Dabei lässt sich eine weitestgehende Übereinstimmung der Echtzeitsimulation mit den Messergebnissen am skalierten Strombegrenzermodell erkennen. Das Verhalten des Strombegrenzers in zukünftigen Einsatzorten ist damit genau vorhersagbar.



**Abb. 8:** Der Vergleich zwischen Messung und Simulation lässt eine Übereinstimmung des gemessenen begrenzten Wechselstroms mit der Vorhersage der Echtzeitsimulation (unten) erkennen.

Kontakt: Joern.Geisbuesch@kit.edu

## Highlight 1: Neuartiger supraleitender Strombegrenzer SmartCoil erfolgreich getestet

Das vom BMWi geförderte Verbundprojekt SmartCoil zur Entwicklung einer impedanzveränderlichen Kurzschlussstrombegrenzungs-Spule (FZK 03ET7525B) wurde erfolgreich abgeschlossen. Von September 2014 bis Februar 2018 wurde eine neuartige nichtlineare Drosselspule zur Kurzschlussstrombegrenzung für ein 10-kV-Mittelspannungsnetz mit 10 MVA Übertragungsleistung ausgelegt und gebaut; ihre Funktion wurde demonstriert.

In einer warmen Kurzschlussstrombegrenzungs-Spule, ausgelegt für einen Spannungsabfall von 6 % bei einem Nominalstrom von 600 A für die Phasenspannung 5,77 kV, wird ein supraleitender Einsatz mit einer Betriebstemperatur von 77 K verwendet. Die HTS-Ringe im Kryostaten verdrängen das Magnetfeld aus dem Inneren der Drosselspule und verringern die Gesamtimpedanz der Anordnung mindestens um den Faktor vier. Im Kurzschlussfall begrenzt der supraleitende Einsatz den Kurzschlussstrom für eine Begrenzungszeit von 100 ms. Die Impedanz der Drossel steigt dabei nahezu auf den Wert, ohne den supraleitenden Einsatz. Das Projektziel wurde mit dem finalen Leistungstest im Schalterwerk Berlin bei der Siemens AG vollständig erreicht.



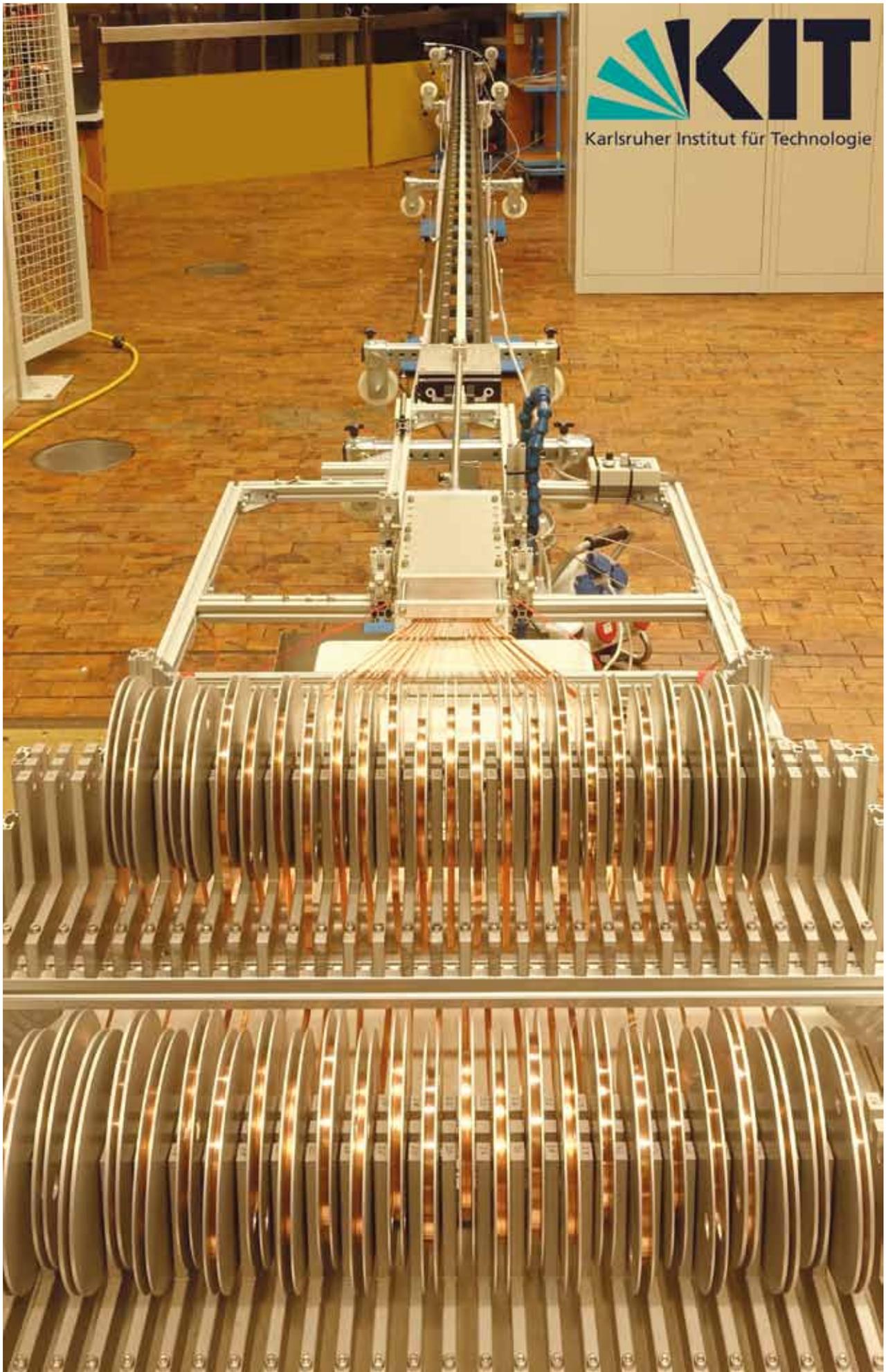
*Abb. 9: 10-MVA-Strombegrenzer SmartCoil beim Aufbau im Leistungslabor von Siemens in Berlin: Außen die Kurzschlussstrombegrenzungs-Drosselspule in Grau, innen der Kryostat, der den Supraleiter beinhaltet, oben der Kryostatdeckel.*

### Wesentliche Projektergebnisse sind:

- Aufbau von Modellen zur numerischen Simulation der Wechselfeldverluste und des Begrenzungsverhaltens
- Entwicklung eines niederohmigen Lötverfahrens für HTS-Bänder
- Qualifikation von HTS-Material verschiedener Hersteller
- Entwicklung eines dünnwandigen GFK-Kryostaten nach der Druckbehälterverordnung zusammen mit dem ILK Dresden
- Entwurf und Bau einer Komponententestanlage für den Vortest der HTS-Komponenten
- Entwicklung eines induktiven Verfahrens zur kontaktlosen Messung des kritischen Stroms und des Übergangswiderstands
- Kalorimetrische Messung der Verluste des Kryostaten (140 W) und der HTS-Bandleiter (14 W bei Nennstrom)
- Demonstration der Begrenzungsfähigkeit mit einer Impedanzänderung von 5 zwischen Normalbetrieb und Begrenzungsfall
- Demonstration der Rückkühlzeit: kürzer als 2,5 s

Kontakt: Andrej.Kudymow@kit.edu





Maschine zur Fertigung der HTS CrossConductors (HTS CroCos).

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleitende Magnettechnologie

*Koordination: Dr. Walter Fietz*

Supraleitende Magnettechnologie stellt seit vielen Jahren ein zentrales Forschungsfeld am ITEP dar. In vielen Großexperimenten, beispielsweise beim Bau und Test der ITER-Modellspule TFMC, haben die Wissenschaftler umfassendes Know-how erworben. Dieses dient als Basis für zahlreiche neue Entwicklungen zu den folgenden Forschungsthemen:

- Spulentechnologie
- HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen
- Rotierende Maschinen
- Industrieanwendungen

Das Forschungsthema **Spulentechnologie** fokussiert auf die Realisation höchster Magnetfelder, um die NMR-Technik hin zu höherer Auflösung weiterzuentwickeln. Dazu wurden 2018 die Sektionen einer Einsatzspule aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) nach erfolgreichen Vortests vorbereitet. Diese Einsatzspule wird dazu dienen, ein Magnetfeld von 25 T in der Hochfeldexperimentieranlage (HOMER) II zu erreichen.

Im Forschungsthema **HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen** geht es vor allem um die Anwendung der HTS-Materialien in künftigen Fusionsmagnetsystemen. Neben der Designauslegung solcher Magnete stehen Entwicklung und Test künftiger HTS-Hochstromleiter für Fusionsmagnete im Fokus.

Zum Forschungsthema **Rotierende Maschinen** laufen vor allem Arbeiten für supraleitende und daher besonders effiziente Windkraftanlagen. Zurzeit konzentrieren sie sich auf supraleitende Stator-Systeme für Off-shore-Windturbinen.

Im Forschungsthema **Industrieanwendungen** setzen Wissenschaftler das im Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie erworbene Know-how in Anwendungen um, beispielsweise bei der Entwicklung von Induktionsheizern.

Kontakt: [Walter.Fietz@kit.edu](mailto:Walter.Fietz@kit.edu)

### Spulentechnologie

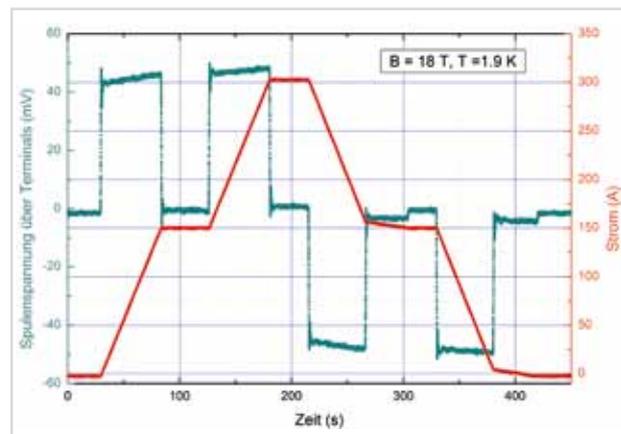
#### HOMER II Upgrade

Der Institutsbereich Supraleitende Hochfeldmagnete konzentriert sich auf den Ausbau der seit 2006 betriebenen Hochfeldexperimentieranlage HOMER II. Die derzeitige Ausbaustufe stellt eine maximale Feldstärke von 20 T in einer großen Bohrung mit einem Durchmesser von 185 mm bereit. Ziel ist, HOMER II auf 25 T auszubauen. Dazu wird eine zusätzliche Einsatzspule hinzugefügt, die aufgrund der hohen Feldstärke aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) bestehen muss. Das

Design der Einsatzspule sieht fünf in Lagenwicklungstechnik gefertigte Einzelsektionen vor. Dieser Aufbau unterscheidet sich grundlegend von der HTS-Einsatzspulentechnologie in fast allen anderen Hochfeldlabors. Deren HTS-Spulen sind nämlich aus gestapelten zirkularen Scheibenwicklungen (Pancakes) aufgebaut. Hintergrund für die spezielle Wahl des ITEP ist unter anderem der Technologietransfer an unseren langjährigen Industriepartner Bruker BioSpin, Weltmarktführer im Bereich Hochfeld-NMR-Spektrometer. Dieser benötigt zur Weiterentwicklung seiner Produktlinie solche in Lagen gewickelte HTS-Einsatzspulen. (siehe auch Abschnitt Industrieanwendungen).

Zur Validierung des speziellen Wickelkonzepts und der Spulenkonstruktion hatten die Wissenschaftler eine 18-lagige Prototyp-Spulensektion aus REBCO-HTS gefertigt und erfolgreich in der Hochfeldanlage HOMER I in Hintergrundfeldern bis 14 T getestet. Auf der Grundlage der positiven Ergebnisse wurden 2018 die fünf Einzelsektionen entsprechend konstruiert und gefertigt. Sie stehen zum Zusammenbau und Test 2019 bereit.

Unterdessen wurde die Prototyp-Spulensektion nochmals bei höheren Feldern von bis zu 18 T in HOMER II getestet. In mehreren Durchläufen wurde dabei bei festen Hintergrundfeldern die Spule mit einer Rampe von bis zu 3,6 A/s mit Strömen von bis zu 500 A geladen, beim jeweiligen Zielwert gehalten und wieder mit bis zu 3,6 A/s entladen. Durch die schrittweise Erhöhung des Hintergrundfelds von 2 T auf 18 T wurde die Spule einer steigenden Lorentzkraft ausgesetzt. Damit wur-



**Abb. 1: Testlauf der REBCO-Prototyp-Spulensektion in HOMER II in superfluidem Helium bei einer Badtemperatur von 1.9 K. Bei einem Hintergrundfeld von 18 T wurde ein Zielstrom von 300 A angefahren; mit 367 MPa wurde die in der 5-T-HTS-Einsatzspule maximal auftretende Zugspannung erreicht.**

den Zugspannungen von bis zu 367 MPa im Supraleiterdraht erreicht. Dieser Wert entspricht der maximal auftretenden mechanischen Spannung in der aufzubauenden 5-T-HTS-Einsatzspule. Abbildung 1 zeigt die über die Kupferterminale gemessene Spulenspannung  $U(t)$  beim höchsten Feld von 18 T für den Zielstrom von 300 A.

Die Prototyp-Spulensektion passierte erfolgreich alle Tests ohne Quench und ohne Anzeichen für eine Degradation. Da der Test bei einer Heliumbadtemperatur von 1.9 K durchgeführt wurde, ließ sich außerdem die Verträglichkeit der Spulensektion mit superfluidem Helium demonstrieren.

### Untersuchung der Langzeitstabilität von Glühkathoden für ITER-Manometer im Magnetfeld

Die Erzeugung von Magnetfeldern mit tiefkalten supraleitenden Spulen ist untrennbar mit der Vakuumtechnik verknüpft. Vakuumräume sind notwendig zur thermischen Isolation des Kryostaten nach außen sowie zur thermischen Trennung der mit flüssigen Kryogenen gefüllten einzelnen Räume. Außerdem muss je nach experimenteller Anforderung der Versuchsraum evakuiert sein. Die Überwachung der Vakua erfolgt mit geeigneten Manometern. Im Hoch- und Ultrahochvakuum werden dafür bevorzugt Ionisations-Vakuummeter eingesetzt: Mit hinreichend hohem Strom zum Glühen gebrachte Kathoden emittieren Elektronen, die mit einer angelegten elektrischen Spannung beschleunigt werden und vorhandene Restgasmoleküle ionisieren. Der zur Neutralisation der Moleküle benötigte elektrische Strom lässt auf die Qualität des Vakuums schließen. Beim zurzeit gebauten Fusionsreaktor ITER werden solche Ionisations-Vakuummeter zur Druckbestimmung eingesetzt – als Besonderheit allerdings in Magnetfeldern bis zu 8 T. Damit besteht die Gefahr, dass sich die durch das Glühen bei ca. 1400 °C bis 1700 °C thermisch belasteten Kathoden aufgrund der Lorentzkraft verbiegen und letztendlich versagen.

Das für Entwicklung und Bau der ITER-Manometer verantwortliche Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) Garching fragte daher einen Langzeittest der Glühka-

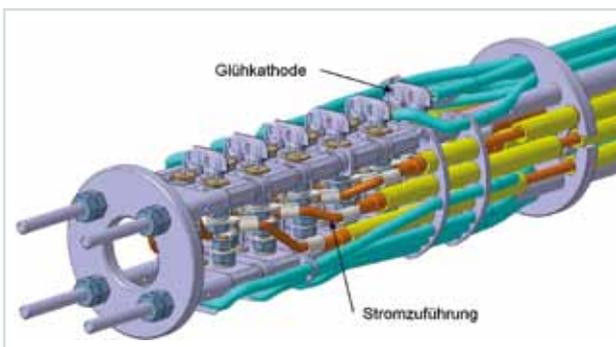


Abb. 2: Der am IPP Garching gefertigte Einsatz zum Test der Langzeitstabilität von Glühkathoden für ITER-Manometer im Warmrohr der Experimentieranlage JUMBO. Sechs der zwölf Glühkathoden sind auf den Halterungen im oberen Teil des Einsatzes sichtbar. Sechs Glühkathoden – in der Abbildung verdeckt – sind spiegelsymmetrisch nach unten zeigend angeordnet. (Abbildung: IPP Garching)

thoden am Hochfeldlabor des ITEP an. Mit einem maximalen Feld von 10 T, bereitgestellt in einem Antikryostat (Warmrohr) bei Raumtemperatur, bietet die supraleitende Experimentieranlage JUMBO ideale Bedingungen für diese Untersuchung.

Um eine hinreichende statistische Aussage treffen zu können, enthält der am IPP gefertigte Testeinzel zwölf Glühkathoden (siehe Abbildung 2). Mit Blick auf die Anforderungen bei ITER wurden die Kathoden beim Test gezykelt betrieben – auf eine Einschaltphase von 40 s folgte eine ebenso lange Ausschaltphase. Nach den Vorgaben der europäischen Dachorganisation Fusion For Energy (F4E) waren 3000 dieser Zyklen bei einem Hintergrundfeld von 8 T ohne Ausfall zu absolvieren, um die Kathoden für den Einsatz bei ITER erfolgreich zu qualifizieren.

Um die Grenzen der Belastbarkeit der Glühkathoden zu testen, liefen anschließend Dauertests mit höheren, konstant gehaltenen Heizströmen, das heißt gesteigerter thermischer Belastung und größerer Lorentzkraft. Nach einer reinen Messzeit von über 80 Stunden wurde der mehrwöchige Langzeittest der Glühkathoden erfolgreich abgeschlossen. Das IPP kann auf dieser Basis die Entwicklung der Manometer fortführen und abschließen.

Kontakt: Frank.Hornung@kit.edu

### HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen

#### Designkonzept einer TF-Spule für künftige Fusionsreaktoren

2018 arbeitete das ITEP weiter am Konzept einer TF-Spule mit REBCO-Bandleitern für einen zukünftigen Fusionsreaktor. Die Ergebnisse der 2017 vorgenommenen Analysen bewogen die Forscher dazu, das Leiterkonzept nochmals leicht zu modifizieren, ohne das Wicklungspaket zu ändern.

Zur Analyse des Wicklungspakets nahmen die Wissenschaftler thermohydraulische und mechanische Untersuchungen vor. Eine eindimensionale Quenchanalyse der innersten Lage des HTS-Leiters ergab Maximaltem-

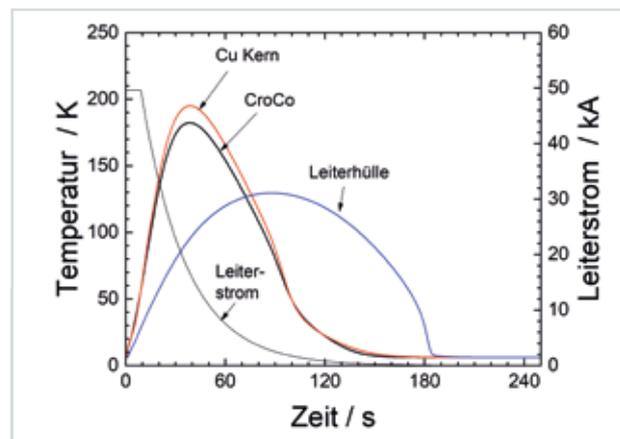


Abb. 3: CroCo-, Cu-Kern- und Leiterhüllentemperatur als Funktion der Zeit während eines Quenchs in der innersten Lage der TF-Spule. Der zeitliche Verlauf des Leiterstroms ist ebenfalls dargestellt.

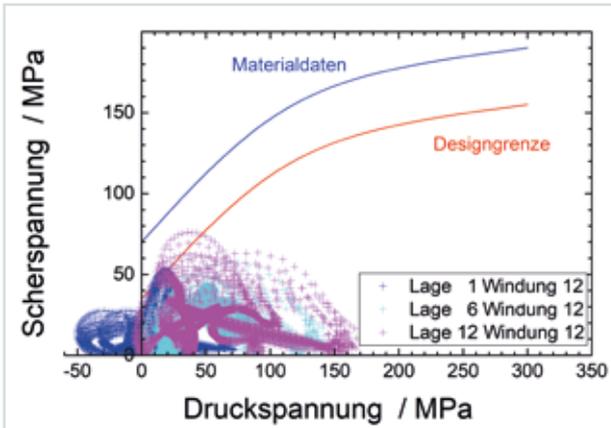


Abb. 4: Scherspannung in der Leiterisolation in Abhängigkeit von der Druckspannung für ausgewählte Windungen im Wicklungspaket.

peraturen von 195 K im HTS-Kabel und 130 K in der Leiterhülle (Abbildung 3); diese Temperaturen lagen unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte. Die strukturellen Untersuchungen zeigten sowohl für die Leiterhülle als auch für die Leiterisolation Werte unterhalb der Auslegungsgrenzen. Die Scherspannungen in der Leiterisolation (Abbildung 4) blieben größtenteils ebenfalls innerhalb der Grenzwerte.

Darüber hinaus wurde in einer detaillierten Studie der Einfluss der folgenden Designparameter auf das Quenverhalten untersucht:

- Quenchauslösende Störenergie  $E_{\text{init}}$
- Länge der quenchauslösenden Zone  $l_{\text{INZ}}$
- Zeitdauer der Störung  $t_Q$
- Thermischer Kontaktwiderstand  $R_{\text{th}}$  zwischen den CroCo-Strands, zwischen CroCo-Strand und zentralem Kupferkern sowie zur Leiterhülle
- Restwiderstandsverhältnis RRR des Kupfers in den CroCo-Strands bzw. des Kupferkerns
- Quenchedetektionsspannung  $V_{\text{QD}}$
- Verzögerungszeit  $t_{\text{del}}$  zwischen Quenchedetektion und Beginn der Entladung des Magneten mit einer Zeitkonstante  $t_D = 27$  s
- Entladezeitkonstante des Magneten  $t_D$

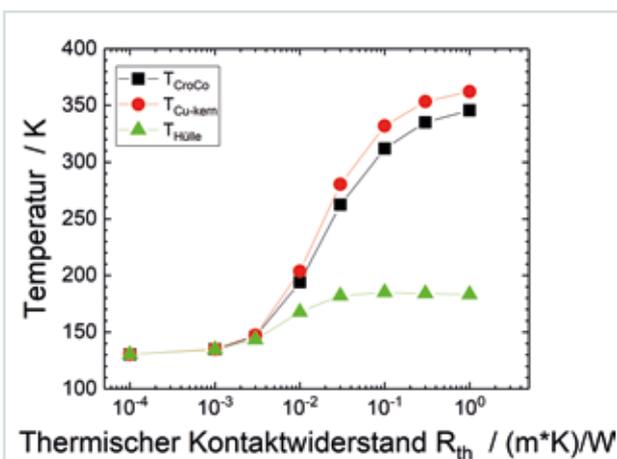


Abb. 5: Maximaltemperatur von CroCo, Cu-Kern und Leiterhülle als Funktion des thermischen Kontaktwiderstands.

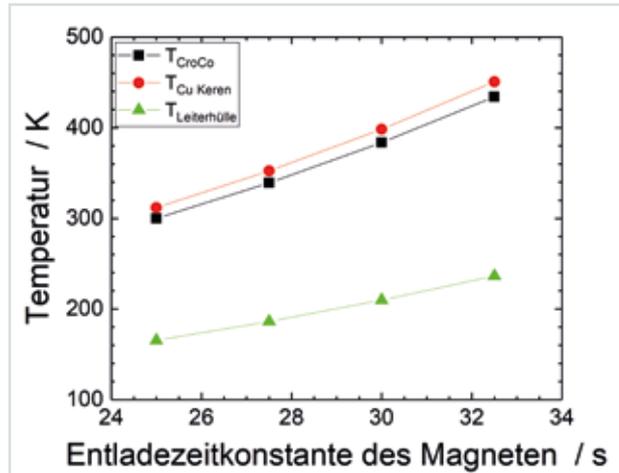


Abb. 6: Maximaltemperatur von CroCo, Cu-Kern und Leiterhülle als Funktion der Entladezeitkonstanten des Magneten.

Entscheidendes Kriterium war die Maximaltemperatur im CroCo-Strand, im Kupferkern und in der Leiterhülle. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Maximaltemperatur in CroCo-Strand, Kupferkern und Leiterhülle in Abhängigkeit vom thermischen Kontaktwiderstand. In Abbildung 6 sind die gleichen Größen als Funktion der Entladezeitkonstanten des Magneten dargestellt.

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigten, dass die Maximaltemperaturen stark von  $R_{\text{th}}$  abhängen. Als kritische Größen erwiesen sich darüber hinaus diejenigen Parameter, die mit der Quenchedetektion bzw. der Magnetentladung zusammenhängen. Damit zeigte sich die Wichtigkeit eines Quenchedetektionssystems, das einen Quench schneller erkennt als das konventionelle elektrische System.

Kontakt: Reinhard.Heller@kit.edu

## HTS CrossConductor

Zur Fertigung von HTS CrossConductors (HTS CroCos) werden bandförmige Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) in zwei verschiedenen Breiten gestapelt und auf voller Länge verlötet, wobei ein kreuzförmiger Querschnitt entsteht. Diese in den vergangenen Jahren entwickelte Technologie wurde 2018 erweitert, sodass eine runde

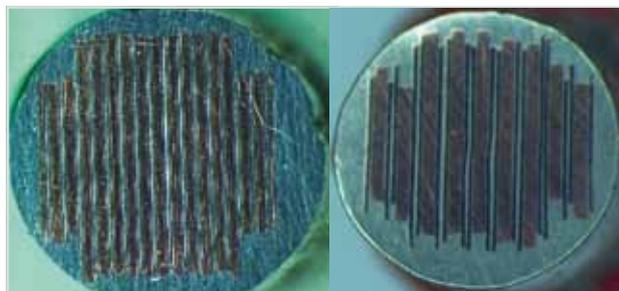


Abb. 7: Querschnitt durch zwei HTS CroCos. Das linke Bild zeigt einen HTS CroCo aus 6 mm und 4 mm breiten HTS Bändern, das rechte Bild einen HTS CroCo aus 3 mm und 2 mm breiten Bändern. Zwischen zwei Supraleiterbändern befindet sich je ein Cu-Band, das im Quenfall zur elektrischen Stabilisierung beiträgt.

Leiterraufengeometrie und Längen von bis zu acht Metern möglich sind (Details siehe Highlight). CroCos aus 6 mm und 4 mm breiten Bändern sowie aus 3 mm und 2 mm breiten Bändern wurden gefertigt und erfolgreich getestet. Die HTS CroCos größeren Durchmessers werden im SupraDCKabel eingesetzt (vergleiche Highlight des Forschungsfelds Supraleiter- und Kryomaterialien). Die Leiter kleineren Durchmessers werden für Vortests eines Wicklungsdemonstrators aus HTS CroCos verwendet. Abbildung 7 zeigt Querschnitte durch zwei HTS CroCos aus der aktuellen Fertigung.

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu

## Kryogener Komponententest für Fusionsmagnete

Für die Untersuchung von supraleitenden Proben und Kabeln die unter fusionsrelevanten Bedingungen benutzt das ITEP seit vielen Jahren die FBI-Anlage. In dieser Anlage lassen sich die Proben mit der Kraft  $F$  (bis zu 10 kN), dem Magnetfeld  $B$  (bis 12 T) und einem Strom  $I$  (bis 10 kA) beaufschlagen. Aufgrund der vielen Temperaturzyklen und der immer besseren Proben waren die Stromzuführungen der FBI-Anlage überlastet und brannten durch.

Mittlerweile wurden optimierte neue Stromzuführungen konstruiert; diese wurden Ende 2018 in die FBI-Anlage eingebaut. Nach einer Neuverkabelung wird die Anlage wieder in Betrieb gehen (siehe Abbildung 8).

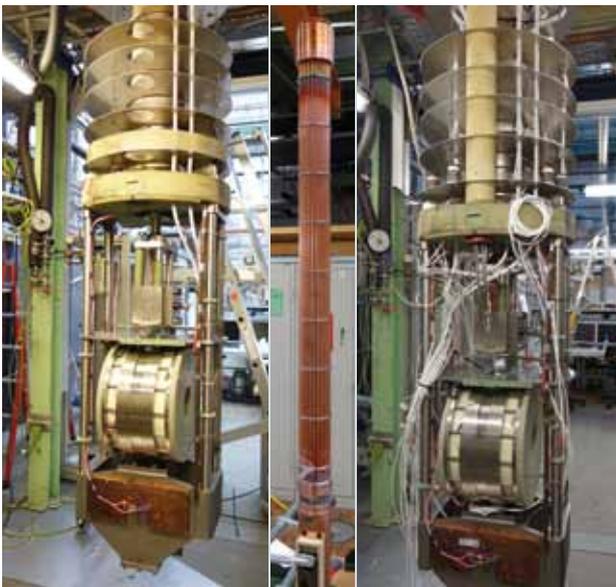


Abb. 8: FBI-Anlage mit entfernten Stromzuführungen (links), eine der neuen Stromzuführungen (Mitte), FBI-Anlage mit den neu installierten Stromzuführungen und einem Teil der noch zu installierenden neuen Verkabelung (rechts).

Kontakt: Klaus-Peter.Weiss@kit.edu

## Rotierende Maschinen

### Supraleitendes Stator-System für Offshore-Windturbinen

Die installierte Offshore-Leistung nimmt kontinuierlich zu; zugleich steigt die Bemessungsleistung der Wind-

kraftanlagen selbst. Windkraftanlagen höherer Leistungsklassen benötigen allerdings größere und schwerere Generatoren; diese bedingen einen erheblich höheren Transport- und Installationsaufwand.

Supraleitende Generatoren ermöglichen, Volumen und Gewicht bei Windkraftanlagen im höheren Leistungsbe- reich zu reduzieren. Deshalb arbeitet SUPRA an einem supraleitenden Stator-System, bei dem kein aufwendiges rotierendes Kühlsystem erforderlich ist (Abbildung 9). Zudem soll das Spulensystem über Leitungskühlung auf die Betriebstemperatur gekühlt werden, um den Einsatz kryogener Flüssigkeiten im Stator zu vermeiden.

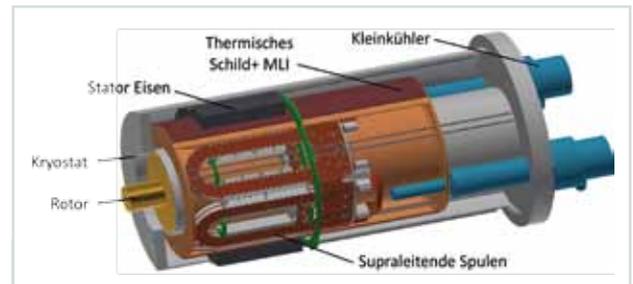


Abb. 9: Supraleitendes Stator-System.

Eine erste Testspule wurde unter leitungsgekühlten Bedingungen bis zu einer Temperatur von 20 K vermessen. Abbildung 10 zeigt den gemessenen und den berechneten kritischen Strom und die maximal auftretende magnetische Flussdichte der Spule bei verschiedenen Temperaturen. Der kritische Strom der Spule wurde mit ergänzenden Messungen einer Stichprobe des in der Spule eingesetzten Supraleiterbands abgeschätzt.

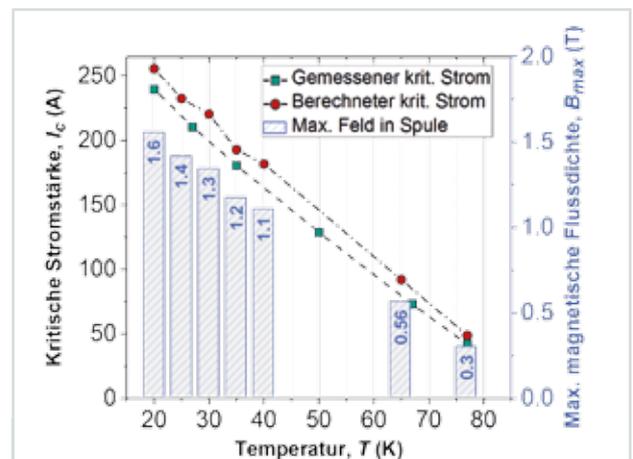


Abb. 10: Kritischer Strom der Testspule unter leitungsgekühlten Bedingungen.

Das Konzept der sogenannten nicht isolierten Spule, das auf eine Isolation zwischen den Spulenwindungen verzichtet, wurde bereits in vielen Publikationen zur Hochtemperatur-Supraleitung behandelt. Jedoch wurde der Einsatz solcher Spulen in energietechnischen Anwendungen bisher nicht ausreichend betrachtet. Der passive Schutz vor thermischer Zerstörung, bedingt durch die fehlende Isolation, macht solche Spulen für bestimmte Anwendungen allerdings äußerst attraktiv. SUPRA erarbeitete das Design einer solchen Spule für den Einsatz im geplanten Stator-System und konstruierte bereits die erste nicht isolierte Testspule. Dadurch

soll das Potenzial dieses Spulenkonzepts für energie-technische Anwendungen wie rotierende Maschinen grundsätzlich untersucht werden.

Bei einigen Anwendungen, wie supraleitenden Generatoren für Windkraftanlagen, soll ein supraleitender Rotor eingesetzt werden, dessen supraleitende Spulen ebenfalls mit Kleinkühlern gekühlt werden. Dabei ist zu klären, inwieweit die rotierenden Bedingungen die Effizienz der Kleinkühler beeinflussen. Zur Untersuchung der Kühleffizienz von Kleinkühlern wurde ein entsprechender Rotationsstand aufgebaut (Abbildung 11). Die prinzipielle Funktionalität wurde erfolgreich getestet.



**Abb. 11:** Rotations-teststand zur Untersuchung der Effizienzänderung von Kleinkühlern unter Rotationsbedingungen

Kontakt: Yingzhen.Liu@kit.edu

## Industrieanwendungen

### Kooperation mit Bruker BioSpin

Die seit 1985 bestehende Kooperation zwischen dem ITEP und der Bruker BioSpin GmbH zur Entwicklung von Magnetsystemen für hochauflösende Hochfeld-NMR-Spektrometer wurde 2018 in einem neuen Rahmenvertrag bekräftigt und auf die Bruker BioSpin AG Schweiz erweitert.

Gleichzeitig wurde die seit über 25 Jahren laufende Zusammenarbeit zur NMR-Magnettechnologie neu gestaltet. In diesem Projekt unterstützt das HFM-Team den Partner durch flankierende Maßnahmen bei der Qualitätssicherung und der weltweiten Markteinführung der NMR-Spektrometer. Vor allem geht es dabei um die Charakterisierung und Qualifizierung kommerzieller technischer Supraleiter durch hochauflösende E(I)-Messungen in den Experimentieranlagen JUMBO und HOMER I (Abbildung 12) bei Magnetfeldstärken bis 20 T und Temperaturen von 4,2 K und 2,2 K sowie um winkelabhängige Untersuchungen von Hochtemperatur-Supraleitern. Weitere Schwerpunkte liegen auf der Untersuchung der supraleitenden Eigenschaften der aus den Leitern hergestellten supraleitenden Verbindungen und auf der Optimierung ihrer Restresistivität im pΩ-Bereich abhängig vom externen Magnetfeld und vom Transportstrom. Zusätzlich testete die Gruppe eine neuartige 2G-HTS-Wicklung aus Leiterlängen über 100 m in der Experimentieranlage HOMER I des Hochfeldlabors.



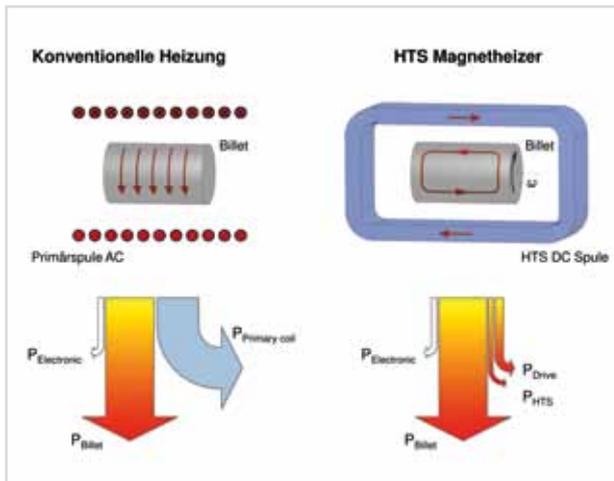
**Abb. 12:** Supraleitende Experimentieranlage HOMER I für Spulentests und Supraleitercharakterisierungen in Hintergrundfeldern von 15 T bzw. 20 T bei Lambda-temperatur  $T = 2,2$  K.

Die untersuchten Supraleiter und supraleitenden Verbindungen unterscheiden sich in ihrem prinzipiellen Aufbau, in Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Abmessungen und physikalischen Eigenschaften, was viele verschiedene Testkonfigurationen und Testprogramme erfordert. Die Ergebnisse der Experimente und ihre Auswertung sind Kooperations-Know-how und unterliegen der absoluten Vertraulichkeit.

### BMW-Projekt: Supraleitender Magnetheizer

Gemeinsam mit dem HTS-Bandleiterhersteller THEVA und dem Familienunternehmen Bültmann GmbH beantragte das ITEP 2018 erfolgreich die Förderung eines Projekts beim BMWi. Das Projekt zielt darauf, einen robusten und wartungsarmen Magnetheizer mit HTS-Bandleitern der 2. Generation für Warmumformprozesse zu entwickeln sowie seine technische und wirtschaftliche Eignung nachzuweisen.

Die Warmumformung ist ein weit verbreitetes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Metallhalbzeugen und Metallprodukten, beispielsweise beim Strangpressen, Schmieden oder Warmwalzen. Sie nutzt die niedrigere Warmfestigkeit temperierter metallischer Werkstoffe. Weil Wärme- und Umformenergie eingebracht werden müssen, gehört die Warmumformung zu den energieintensiven Verfahren. So werden in den 160 Strangpressanlagen der deutschen Aluminiumindustrie jährlich insgesamt ca. 800.000 t Aluminium von ca. 20 °C auf die Umformtemperatur von durchschnittlich 480 °C erwärmt, was allein für die Materialerwärmung 3.300 GJ/a bzw. ca. 920 MWh/a erfordert. Da die induktive Erwärmung nur einen Wirkungsgrad von 50 % aufweist, müssen insgesamt 1840 MWh/a für den Betrieb der Anlagen aufgebracht werden. Magnetheizer auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) weisen einen deutlich höheren Wirkungsgrad von mehr als 70 % auf, sodass nur 1.280 MWh/a erforderlich sind bzw. 550 MWh/a eingespart werden. So lässt sich bundesweit allein in diesem Sektor der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 32.563 t/a reduzieren. Abbildung 13 zeigt eine schematische Gegenüberstellung der beiden Verfahren.



**Abb. 13: Schematische Gegenüberstellung der konventionellen Erwärmung und der HTS Magnetheizerzerwärmung von Metallbolzen.**

Konventionelle, induktiv arbeitende Anwärmöfen haben, wie in Abbildung 13 links dargestellt, einen Wirkungsgrad von ca. 50 %, da die Wechselströme eine Rückinduktion in den Induktionsspulen bewirken und diese Verluste über Leiterinnenkühlung abgeführt werden müssen. Der Magnetheizer hingegen erzeugt mit einer gleichstrombetriebenen, nahezu widerstandsfreien HTS-Spule ein statisches Magnetfeld. Erst die Drehung der Bolzen im Magnetfeld führt zur Änderung der Induktionsflussdichte und damit zur Induktion einer Spannung im Bolzen. Die infolgedessen fließenden Wirbelströme, die im Bolzen axial entlang der Oberfläche laufen, an den Stirnflächen die Bolzenenseite wechseln und auf der gegenüberliegenden Oberfläche zurückfließen, bilden einen Stromkreis. Die auftretenden ohmschen Verluste führen zur Erwärmung des Bolzens, die in radialer Richtung wesentlich homogener ist als bei allen anderen Verfahren. Das von den Wirbelströmen

aufgebaute Magnetfeld wirkt dem äußeren entgegen, sodass motorisch ein Drehmoment aufgebracht werden muss, das letztlich die Energie zur Erwärmung einbringt. Die auftretenden systemischen Verluste resultieren im Wesentlichen aus der Kühlung der HTS-Spule und den mechanischen und elektrischen Verlusten im Antriebsstrang und sind ca. 30 % niedriger als bei den konventionellen Verfahren. Pro Tonne Aluminium ergibt sich bei einer Aufheizung auf 520 °C somit eine Energieeinsparung von 120 kWh.

### Entwicklung eines kryogenen Durchflusssensors

Im Rahmen eines Technologietransfers an die WEKA AG in Bärenwil/Schweiz schloss das ITEP die Entwicklung eines kryogenen Durchflusssensors erfolgreich ab. Dieser basiert auf einem am KIT entwickelten und patentierten Verfahren, dessen Alleinstellungsmerkmal die Fähigkeit zur Selbstkalibrierung ist. An dem vom KIT Seed Fonds unterstützten Transferprojekt waren neben dem ITEP das Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) und das Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) beteiligt. Das gemeinsam entwickelte Produkt (Abbildung 14) wird von der WEKA AG unter dem Markennamen WEKASense® vermarktet (<https://www.weka-ag.ch/de/weka-sense-1>).

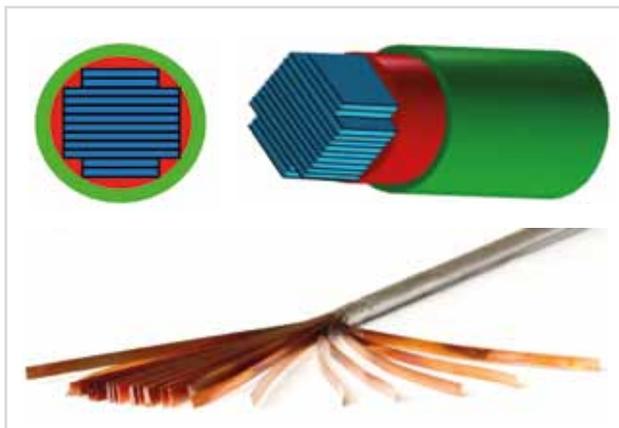


**Abb. 14: Kryogener Durchflusssensor WEKASense® der WEKA AG.**

Kontakt: Marion.Kläser@kit.edu

## Highlight Erweiterung der HTS CrossConductor- Fertigung auf Längen bis zu acht Metern

Der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) REBCO ist industriell nur in Form dünner Bänder verfügbar. Um diese Bänder zu einem Hochstrom-Leiter zusammenzuführen, haben Forscher am KIT den Kreuzleiter HTS CrossConductor (CroCo) entwickelt. Dieser Leiter verbindet einfache Fertigung und optimale Ausnutzung des runden Querschnitts durch eine kreuzförmige Anordnung der supraleitenden Bänder (siehe Abbildung 15). Die Supraleiterbänder werden gemeinsam in ein Lötbad geführt, in eine Kreuzform gebracht und zum HTS-Kreuzleiter (HTS CrossConductor – CroCo) verlötet.



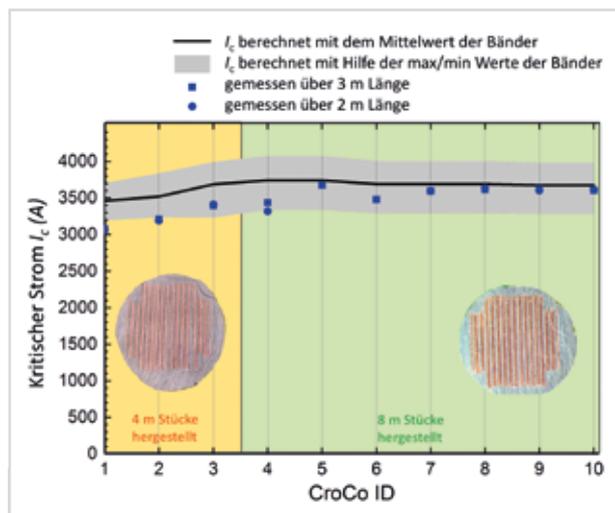
**Abb. 15:** Oben sind HTS CroCos schematisch dargestellt – supraleitende Bänder (blau), das Lot (rot) und eine später hinzuzufügende äußere Cu-Hülle (grün). Unten ist ein Ende eines HTS CroCos noch ohne Cu-Hülle abgebildet; zu sehen sind die einzelnen Bänder und der zusammengehaltene CroCo-Verbund.

2018 ging eine neu konstruierte HTS CroCo-Ziehmaschine in Betrieb (siehe Titelbild). In dieser Maschine können bis zu 60 Bänder gemeinsam durch das Lötbad auf eine Länge bis zu acht Metern gezogen werden. Zunächst wurden mit dieser Maschine CroCos mit 6 mm und 4 mm breiten REBCO-Bändern hergestellt, die für einen 35-kA-HTS-Kabeldemonstrator geplant waren (Details vergleiche Forschungsfeld Leitertechnologien).

Zur Inbetriebnahme wurden zunächst vier Meter lange HTS CroCos gezogen. Zunächst kam es noch zu Bandabrissen und Bandumverlagerungen. Durch Optimierungen bei der Herstellung ließ sich die HTS CroCo-Qualität der folgenden Acht-Meter-Stücke jedoch nach und nach steigern. Die letzten acht Meter langen HTS CroCo-Stücke wiesen eine gleichbleibend gute Qualität und die rechnerisch erwartete Stromtragfähigkeit auf.

Im gelben Bereich von Abbildung 16 ist exemplarisch ein Querschnitt eines der ersten HTS CroCos gezeigt. Die Supraleiterbänder sind grau, die zwischen je zwei Supraleiterbändern eingebrachten Cu-Bänder sind kupferfarben. Rechts oben und rechts unten sind zwei Supraleiterbänder zu erkennen, die aus ihrer Position gesprungen sind und sich verformt haben. Im grünen Be-

reich ist ein Querschnitt eines der letzten HTS CroCo-Bänder abgebildet. In diesem sind alle Supraleiter- und Cu-Bänder regulär angeordnet.



**Abb. 16:** Kritischer Strom der während der Optimierung des Prozesses hergestellten HTS CroCos. Die durchgezogene Linie repräsentiert den erwarteten Strom aus der Summe des Mittelwerts der einzelnen Bänder. Bei den ersten HTS CroCos wurde dieser Wert nicht erreicht (blaue Messpunkte). Durch die Optimierung erreichten aber die letzten HTS CroCos den erwarteten kritischen Strom.

Letztendlich wurde der Prozess so weit optimiert, dass die vom Hersteller gelieferten Bänder während der Fertigung keinerlei Degradation erfuhren.

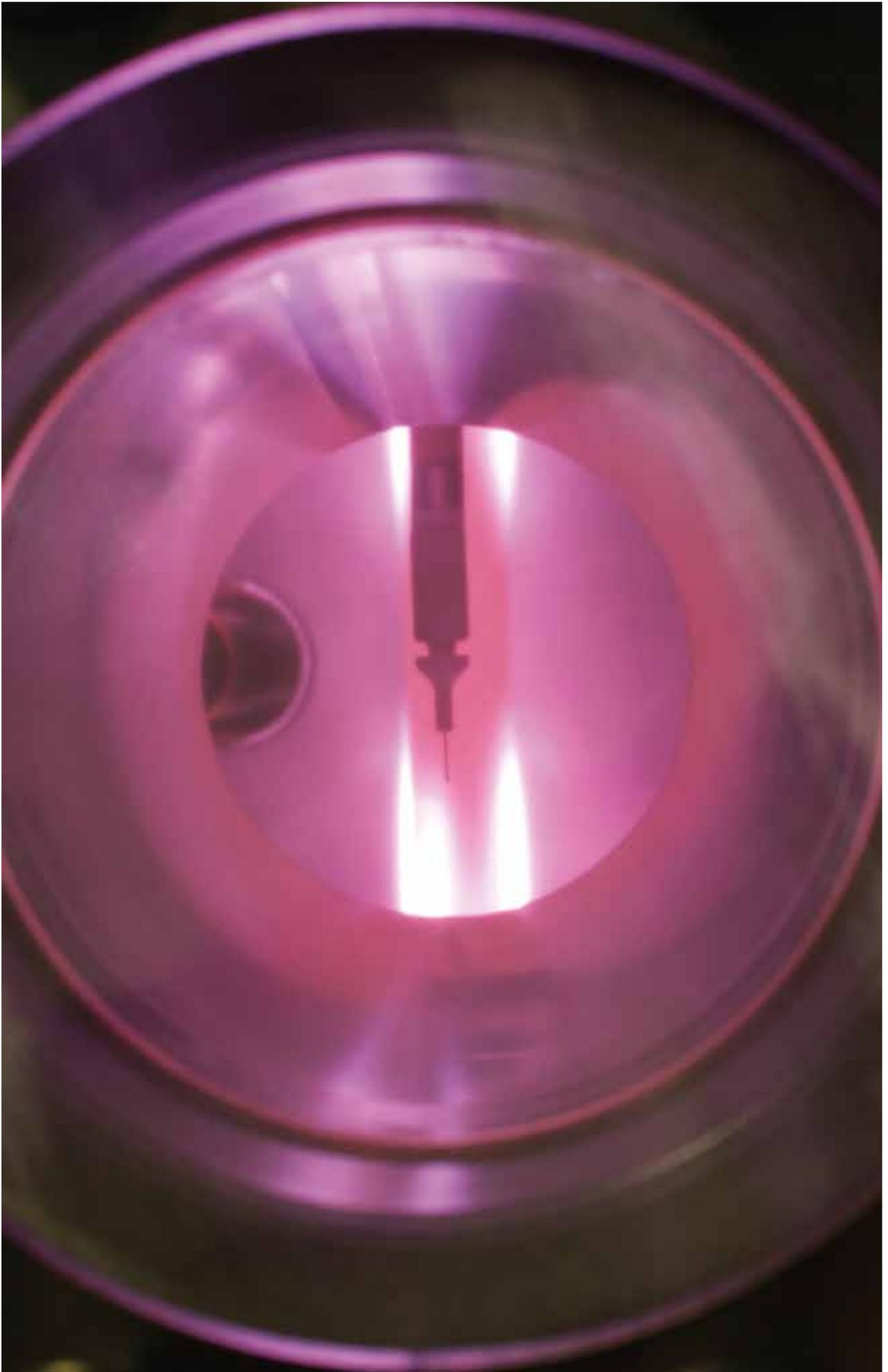
An der neue Kreuzleiter-Fertigungsmaschine wurden auch HTS CroCos aus Bändern mit Breiten von 3 mm und 2 mm hergestellt. Auch diese CroCos wurden in einem stabilen Prozess auf lange Länge gezogen. Diese HTS CroCos sollen für einen Windungsdemonstrator genutzt werden.

In Zukunft werden dann auch HTS CroCos aus 4 mm und 3 mm breiten Bändern gezogen werden. Geplant ist, solche CroCos in künftigen Fusionsmagneten zu verwenden.

Die folgende Tabelle zeigt, welche Ströme im Eigenfeld bzw. bei einem Magnetfeld von 12 T zu erwarten sind, wenn mit flüssigem Helium (4,2 K) bzw. mit flüssigem Stickstoff (77 K) gekühlt wird.

	6/4 mm CroCo	4/3 mm CroCo	3/2 mm CroCo
Durchmesser (inkl. Cu)	9,3 mm	7,7 mm	5,8 mm
Min. Biegeradius $R_{\min}$	~ 60 cm	~ 45 cm	~ 30 cm
$I_c$ T = 77 K, Eigenfeld	3,1 kA	2,1 kA	1,5 kA
$I_c$ (4,2 K, B 12 T, II c)	> 10 kA	~ 9,5 kA	5,0 kA

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu



*Gezündet! Das erste Wasserstoffplasma in der neuen Anlage HERMESplus zur Charakterisierung der Superpermeation an Metallfolien.*

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes

**Koordination: Dr. Christian Day**

Im Forschungsfeld Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neuartige Technologien, um den Brennstoffkreislauf und die damit verbundenen Nachbarsysteme eines zukünftigen Fusionskraftwerks effizienter zu machen. So lässt sich gewährleisten, dass der in situ erzeugte Brennstoff Tritium optimal ausgenutzt wird. Denn nur dann gelingt die Selbstversorgung des Kraftwerks ohne externe Anlieferung von Brennstoff – ein wesentlicher Vorteil von Fusionskraftwerken gegenüber anderen Kraftwerkstypen.

Das Forschungsfeld umfasst die folgenden Forschungsthemen:

- Vakuumtechnologie und Prozessintegration
- Tritiumextraktion und -rückgewinnung
- Strömung verdünnter Gase
- Vakuumhydraulik

Die Arbeiten decken alle drei Schlüsseltechnologien des Brennstoffkreislaufs ab: Materiejektion, Vakuumtechnik und Tritiumtechnologie. Im Jahr 2018 wurde die Architektur des gesamten Brennstoffkreislaufs für das Demonstrationskraftwerk DEMO erstmals zusammengeführt. Ein erster quantitativer Betriebspunkt wurde berechnet. Das neue Konzept sieht drei Teilkreisläufe vor: Der erste Teilkreislauf führt unverbrannten Brennstoff direkt aus den Vakuumpumpen an die Pelletinjektoren zurück. Beim zweiten Teilkreislauf handelt es sich um einen kontinuierlich betriebenen Bypass des Restgases mit Isotopenseparation innerhalb der Tritiumanlage. Der dritte Teilkreislauf schließlich ist der mit Kryodestillation und Wasserdetriitierung ausgerüstete Umlauf, der die verbleibenden Wasserstoff-Isotopologen in die reinen Wasserstoff-Isotope überführt. Diese Arbeiten sind fest im europäischen Fusionsprogramm EUROfusion verankert, in dem Forscher erstmals den Brennstoffkreislauf mit allen Untersystemen ganzheitlich bearbeiten, um entsprechende Optimierungspotenziale auszuschöpfen. Das Management des Arbeitspakets TFV



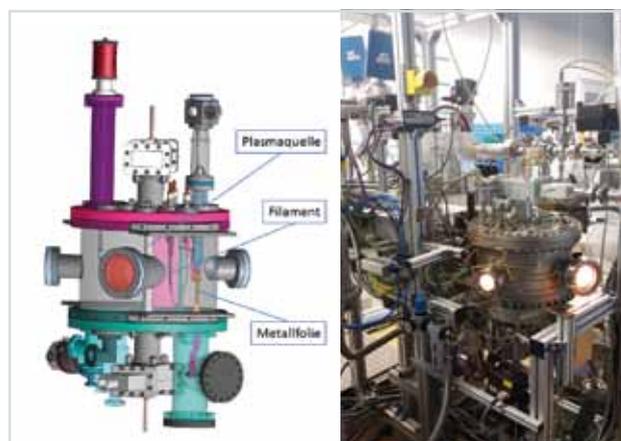
**Abb. 1: Jahresabschlusstreffen des TFV-Teams, in dem ITER, CCFE (Großbritannien), ENEA (Italien), IPP (Garching) und Consorzio-RFX (Italien) zusammenarbeiten.**

(Tritium-Materiezufuhr-Vakuum) im DEMO-Projekt etablierte sich 2018 (Abbildung 1). Nahziel ist, ein in sich konsistentes vorkonzeptionelles Design zu erarbeiten; dieses soll 2020 verabschiedet werden.

### Vakuumtechnologie und Prozessintegration

Dieses Forschungsthema erstreckt sich auf alle vakuumtechnischen Aspekte einer Fusionsanlage. So umfassen die Arbeiten die Entwicklung relevanter Technologien für die entsprechenden Teilsysteme des Brennstoffkreislaufs, aber auch für die Vakuumsysteme außerhalb des klassischen Brennstoffkreislaufs, beispielsweise für die Plasmakammer, wobei sie Ausgasung und Gasspeicherung einbeziehen. Sie befassen sich auch mit Vakuumtechnologien für andere Großanlagen in der Fusion, wie für die Europäische Neutronenquelle IFMIF-DONES oder für die derzeit gebaute Anlage JT-60SA in Japan.

Das für DEMO in den vergangenen Jahren entwickelte neue Vakuumkonzept des Brennstoffkreislaufs arbeitet, anders als die Kryo-Vakuumpumpen für ITER, kontinuierlich und ohne Kryogen. Es besteht aus drei Pumpstufen. Zur Separation des unverbrannten Brennstoffs DT sollen in einer ersten Stufe superpermeable Metallfolien verwendet werden. Dies ermöglicht sowohl eine Separation von hochreinem Wasserstoff aus dem Fusionsabgas als auch eine Kompression. Zur Charakterisierung der wesentlichen Schritte in einer Metallfolienpumpe wurde 2018 die neue Versuchsanlage HERMESplus aufgebaut und in Betrieb genommen (Abbildung 2).



**Abb. 2: HERMESplus, die neue Versuchsanlage zur Charakterisierung der Superpermeation.**

Die neue Anlage hat zwei verschiedene Möglichkeiten, den für die Ausbeutung der Superpermeation benötigten energetischen (suprathermalen) Wasserstoff zu pro-

duzieren. Bei der ersten Möglichkeit handelt es sich um eine Filamentquelle; sie soll als Referenz dienen, vor allem um Vergleiche mit den Filamentdaten aus der Literatur zu ermöglichen. Die zweite Möglichkeit ist eine neuartige mikrowellengetriebene Plasmaquelle. Diese kommt eventuell für die DEMO-Anwendung infrage, besonders dann, wenn es gelingt, den Zündbereich in Richtung geringerer Dichten zu erweitern. Das eingebaute Folienmodul aus Niob selbst ist zylindrisch angeordnet. Es wurde an der Universität St. Petersburg hergestellt; das ITEP kooperiert eng mit der Arbeitsgruppe um Alexander Livshits, einen der Pioniere auf diesem Gebiet. Bei der Inbetriebnahme von HERMESplus war auch ein russischer Gastwissenschaftler zugegen (Abbildung 3).

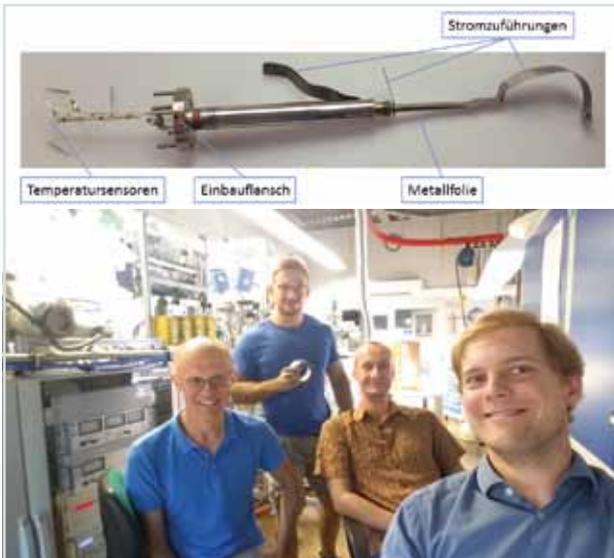


Abb. 3: Das Folienmodul aus Niob (oben) und das HERMES-Team (unten) bei der Inbetriebnahme – Andrei Busniuk, Yannick Kathage, Stefan Hanke und Benedikt Peters (von links).

Abbildung 4 zeigt erste Messungen am Folienmodul. Sie zeigen, dass sich mit Superpermeation deutlich höhere

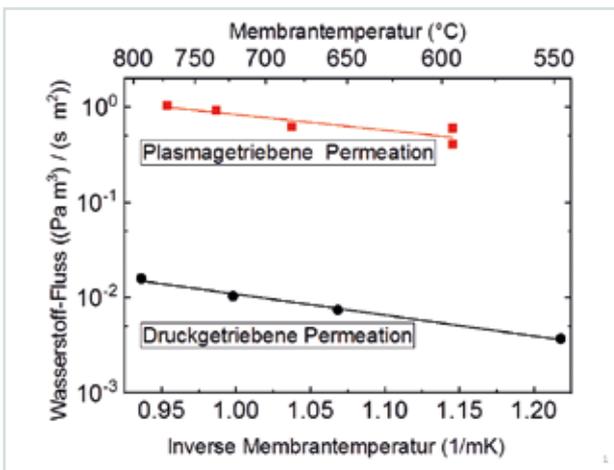


Abb. 4: Erste Ergebnisse für die Superpermeation an Nb.

Stoffströme als mit der klassischen druckgetriebenen Permeation prozessieren lassen.

Eine weitere Vakuumtechnologie, die an verschiedenen Stellen des Brennstoffkreislaufs eingesetzt wird, basiert auf Gettermaterialien (NEG). Das auf diesem Gebiet führende Unternehmen SAES Getters hat dafür in den vergangenen Jahren ein neues Material mit dem Verkaufsnamen ZaO entwickelt. Dieses erlaubt, signifikant höhere Beladungen an Wasserstoff aufzunehmen. Dadurch lässt es sich bei deutlich moderateren Vakuumdrücken verwenden als die konventionelleren Gettermaterialien. Das neue Material liegt in Form von Scheiben mit einem Durchmesser von 25 mm vor. Besonders interessant ist die potenzielle Anwendung für die Dichtekontrolle im Gasneutralisator der Neutralteilchenheizung von DEMO. Dafür ist ein extrem hohes Saugvermögen erforderlich, das sich mit etwa 1,5 Millionen NEG-Scheiben erreichen lässt. Zur Entwicklung eines belastbaren Designs müssen die thermischen Effekte – besonders bei der Regeneration, die Temperaturen um 600 °C erfordert – und die erschwerte Zugänglichkeit der Scheiben durch Abschattungseffekte genau verstanden werden. Dazu organisierte das ITEP in Zusammenarbeit mit SAES und Consorzio-RFX ein mehrstufiges F&E-Programm, das Scheibenanordnungen auf verschiedenen Skalen experimentell untersuchte. Dazu einige Angaben: rohe Metalllegierung; Einzelscheibe; 12/31 Scheiben in Stapelanordnung mit einem zentralen axialen Heizer; 270 Scheiben – sechs Stapel zu je 45 Scheiben – in einem Hexagon-Modul mit zentralem Heizer (siehe Abbildung 5). Darauf aufbauend wurde 2018 ein Detaildesign einer ersten Testpumpe entwickelt. Diese Pumpe wird derzeit gebaut. Sie wird 34 Hexagon-Module mit insgesamt mehr als 9.000 Einzelscheiben umfassen. 2019 wird sie in der Anlage TIMO-2 experimentell untersucht. Dafür wird derzeit die TIMO-Infrastruktur angepasst und aktualisiert.



Abb. 5: Hexagon-Modul mit 270 NEG-Scheiben.

Der Bereich Vakuumtechnik arbeitet seit vielen Jahren mit dem japanischen Tokamak JT-60SA zusammen, der 2020 in Betrieb gehen wird. 2018 wurde das ITEP beauftragt, das Kryovakuumpumpensystem zu entwickeln und herzustellen. Dieses wird in einer längeren Upgrade-Phase 2022 eingebaut werden.

Für die Materialtestanlage IFMIF-DONES, die ab 2020 gebaut werden wird, nahm das ITEP umfangreiche Vakuummodellierungen vor. DONES ist ein Beschleuniger, der an einem Flüssiglithium-Target ein fusionstypisches Neutronenspektrum erzeugt, mit dem sich Materialien für Anwendungen in der Fusion prüfen lassen.

2018 wurde auch die Anlage TRANSFLOW für Messungen der Leitwerte an Mikrokanälen mit verschiedenen Oberflächenfunktionalisierungen adaptiert. Diese Messungen laufen in Zusammenarbeit mit der Universität

Bremen (Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien – UFT) im Rahmen eines DFG-Projekts.

Kontakt: Christian.Day@kit.edu

## Tritiumextraktion und -rückgewinnung

Aufgrund seines geringen natürlichen Vorkommens wird Tritium im Fusionsreaktor in ausreichender Menge selbstständig erbrütet. Ein wesentliches Ziel des Projekts zum Bau eines Demonstrationskraftwerks ist daher, die Realisierung dieser Tritium-Selbstversorgung zu zeigen. Im europäischen DEMO-Reaktor wird Tritium durch den Neutronenbeschuss von Lithium gewonnen. Das Lithium liegt in Brutblankets (BB) an der ersten Wand des Tokamaks entweder in Form von festen Kügelchen als Lithium-Keramik ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) oder in flüssiger Form als eutektische Mischung mit Blei ( $\text{Pb16Li}$ ) vor. Das gewonnene Tritium muss mit einer Effizienz von mindestens 80 % extrahiert werden, um die Selbstversorgungsbedingung zu erfüllen. Daher werden geeignete Technologien zur Extraktion des erbrüteten Tritiums aus den Blankets in DEMO untersucht. Derzeit wird am Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) für beide Konzepte ein Verfahren für die entsprechenden Anforderungen der Tritium-Extraktion entwickelt.

### $\text{Li}_4\text{SiO}_4$

Das TLK untersucht die Verwendung von Zeolith-Membranen (MFI-Typ), um Tritium aus dem Spülgas für feste BB (99,9 % He, 0,1 %  $\text{H}_2$ , Spuren von HT und HTO, bei einem Gesamtfluss von  $10.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) zu gewinnen. HT und HTO lassen sich durch Permeation an den Membranen aus dem Helium abtrennen. Dank ihrer guten Separierungseigenschaften, ihrer chemischen und radiologischen Stabilität und ihres modifizierbaren Einsatzes sind Zeolith-Membranen besonders gut geeignet. Die Trennwirkung einer Membran ist durch das Verhältnis der Permeanzen für die Komponenten einer Gasmischung bedingt. Die Permeanz beschreibt die Menge an transportiertem Gas durch einen Quadratmeter einer Membran in einer Sekunde bei einer Druckdifferenz von 1 Pa entlang der Membran. 2018 liefen Messungen für He,  $\text{H}_2$  und  $\text{D}_2$  in einem Temperaturbereich zwischen 298 K und 410 K. Zusätzlich wurden Experimente mit  $\text{H}_2/\text{D}_2$ -Mischungen durchgeführt sowie ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Permeanz und der effektiven Masse der Mischung als gewichteter Mittelwert der Massen der Moleküle bestimmt. Basierend auf diesem Zusammenhang und ausgehend von den gemessenen Permeanzen erfolgte eine Extrapolation für die verbleibenden Isotopologen (HD, DT, HT,  $\text{T}_2$ ). In Abbildung 6 sind die Permeanzen (rote Punkte) aller Wasserstoff-Isotopologen bei 298 K (experimentelle Werte für  $\text{H}_2$  und  $\text{D}_2$ , extrapolierte für die übrigen Isotopologen) zu sehen. Die daraus resultierende Selektivität der Membran (Verhältnis zwischen den Permeanzen, blaue Quadrate), unter Hinzunahme der Permeanz von He geht aus Abbildung 6 ebenfalls hervor. Dies erlaubt eine erste Beurteilung des Separationsfaktors der Membran. Die Extrapolation der Permeanzen wurde bereits verifiziert durch Messungen mit HD, erzeugt durch den Einsatz eines Katalysators. Weitere Messkampagnen mit der ZEMTEX-Anlage, die am TLK entworfen und für tritiierte Isotope in Betrieb genommen wurde, sind geplant (HT, DT,  $\text{T}_2$ ). Weitere Experimente mit Tritium werden zudem auch mit tritiiertem Wasser durchgeführt, da zu

erwartet ist, dass das Spülgas nach dem Durchströmen der Kugelschüttung ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) Spuren von tritiiertem Wasserdampf (beispielsweise HTO) enthält.

### Pb16Li

Zusätzlich entwickelt das TLK eine Technologie, um Tritium aus flüssigem Lithiumblei wiederzugewinnen.

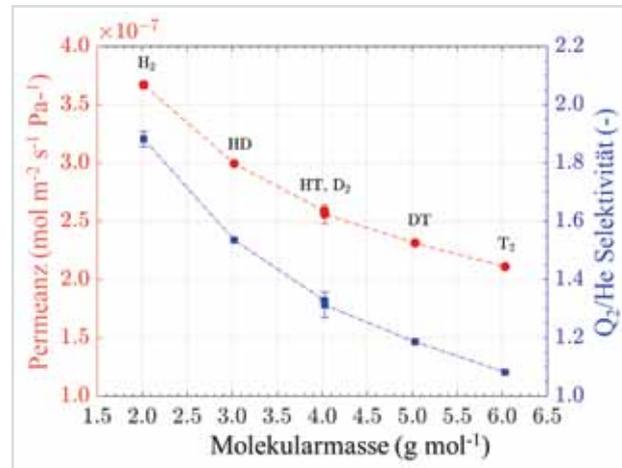


Abb. 6: Permeanzen (linke Achse, rote Punkte) der verschiedenen Wasserstoff-Isotopologen bei 298 K durch eine MFI Zeolith-Membran – Entsprechende Selektivitäten (rechte Achse, blaue Quadrate) unter Berücksichtigung der experimentellen Permeanz von He bei 298 K.

Diese Vakuumsiebtechen-Technologie (Vacuum Sieve Tray) basiert auf der Bildung von oszillierenden Tropfen. Sie entstehen, wenn die flüssige Legierung durch eine Anordnung von submillimetergroßen Düsen strömt (periodische Schwingung zwischen abgeflachter und gestreckter Form des Tropfens bei Frequenzen bis zu 200 Hz). Am TLK wurde eine Anlage entwickelt und aufgebaut, um Experimente zunächst mit Deuterium und dann mit Tritium durchzuführen. Damit wird zunächst der Einfluss der Betriebsbedingungen, wie Temperatur, Lösungsgleichgewicht und vorgegebenes Vakuumniveau in der Extraktionskammer, auf die extrahierte Menge Deuterium untersucht. Darüber hinaus ist die Anlage auch für Mehrdüsen-Anordnungen konzipiert, damit sich die mögliche Wiederabsorption von Deuterium bestimmen lässt, wenn mehrere Säulen an Tropfen direkt nebeneinander herunterfallen. Die Anlage wurde erfolgreich in Betrieb genommen; Kalibrierung der Sensoren, Dichtheitsprüfung und Demonstration des sicheren Betriebs liefen wie geplant. Erste Experimente ohne Pb16Li wurden durchgeführt. Diese bestanden darin, die Permeationsrate von Deuterium durch die Wände der Kammer, in denen das Deuterium vor der Extraktionsphase gelöst ist, bei verschiedenen Temperaturen und Drücken zu messen. Anhand dieser Ergebnisse wird es möglich sein, das Deuterium, das in Pb16Li gelöst ist, und das Deuterium, das durch die Permeation durch die Wände der Kammer entsteht, zu unterscheiden.

Kontakt: Laetitia.Frances@kit.edu

## Strömung verdünnter Gase

Zur Auslegung von komplexen Vakuumsystemen wie im Fusionsbrennstoffkreislauf ist es unerlässlich, verdünnte Gasströmungen quantitativ zu berechnen. Dies geschieht zum Beispiel durch Lösen der Boltzmann-Gleichung, die die Strömung im gesamten Bereich der Verdünnung beschreibt. Der Institutsbereich Vakuumtechnik entwickelte dazu über viele Jahre den DSMC-Algorithmus weiter, der ein statistisches Verfahren ist und gegenüber deterministischen Methoden den Vorteil besitzt, auch komplexe Geometrien vernünftig beschreiben zu können.

Dieses Forschungsthema konzentriert sich im Wesentlichen auf die Physik des Teilchenabtransports im Divertor eines Tokamaks, besonders auf den Bereich unterhalb der Divertorkassetten. Dort ist das Plasma wieder in Neutralgas umgewandelt, und in diesem Bereich koppeln die Pumpsysteme an. Das Plasmaszenario für DEMO unterscheidet sich wesentlich von dem für ITER. Daher gilt es, ein Divertorplasma im sogenannten Detachment Modus aufrechtzuerhalten. Nur dann können die resultierenden Wärmelasten von den Divertormaterialien bei gleichzeitiger Neutronenstrahlung beherrscht werden. Da dieser Plasmazustand noch nicht ganz verstanden ist, werden viele Kontrollmöglichkeiten in das Design der Maschine eingebaut. Die Pumpsysteme müssen das bei der Fusionsreaktion gebildete Helium abziehen, und zwar zusammen mit dem unverbrannten Brenngas und anderen benötigten Hilfsgasen, die dem Plasma zugefügt werden, um die Stabilität zu erhöhen. Die Divertorstrecke muss nach oben offen sein, um die Teilchen aufnehmen und abführen zu können. Andererseits wäre eine Verdichtung nützlich, um im gleichen Volumen eine höhere Teilchenzahl auszuschleusen zu können. In bisherigen Fusionsanlagen wurde daher der Divertor mit einem sogenannten Dom versehen. Abbildung 7 zeigt das derzeitige Referenzdesign des Divertors in DEMO.

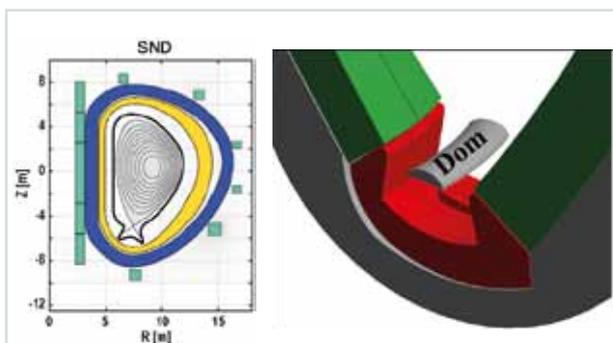


Abb. 7: Der DEMO-Referenzdivertor (Single Null).

Zur Modellierung der relevanten gasdynamischen Prozesse im Divertor wurde das DIVGAS-Paket etabliert, eine leistungsstarke Software für DSMC-Rechnungen. 2018 wurden ausführliche Parametervariationen gerechnet, um die Notwendigkeit eines Doms auf dem Divertor zu untersuchen. Einerseits reduziert der Dom die Rückströmung zum Plasma und erleichtert das Erreichen des Detachment Modus. Andererseits ist er eine hochkomplexe Komponente, für welche die Materialtechnik an die Grenze gehen muss, bedingt durch die äußerst hohen lokal auftretenden Wärmelasten an dieser Stelle. Rechnungen zeigen, dass der Dom bei glei-

chem Pumpenwirkungsgrad von 20 %, der von der Pumpentechnologie vorgegeben wird und nicht erheblich verändert werden kann, den gepumpten Gasanteil um etwa 30 % erhöht (Abbildung 8). Dies ist ein beträchtlicher Effekt, der ein klares vakuumtechnisches Argument für den Dom liefert.

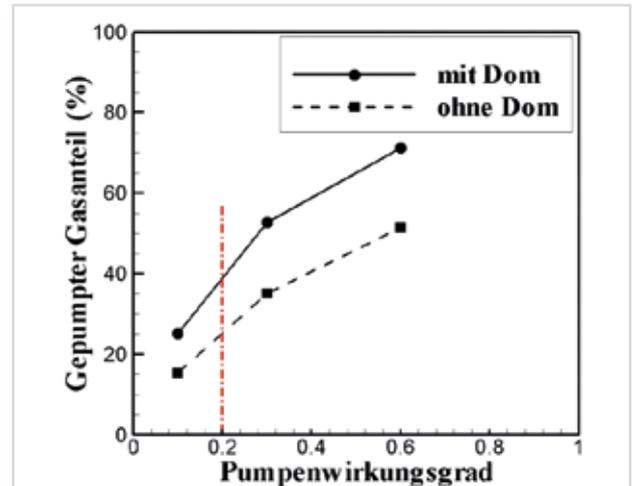


Abb. 8: Gepumpter Gasanteil für die Single-Null-Konfiguration mit und ohne Divertordom.

Parallel dazu wird auch an alternativen Divertorkonzepten gearbeitet, um eventuell durch eine andere magnetische Konfiguration die Lasten auf den Divertor zu verringern. Abbildung 9 zeigt erste Resultate für die sogenannte XD-Konfiguration, bei der die Divertortargets asymmetrisch ausgedehnt sind. Der berechnete gepumpte Gasanteil im derzeit technisch machbaren Bereich des Pumpenwirkungsgrads ist deutlich kleiner als beim Referenzdesign. Um ähnlich große gepumpte Gasanteile zu realisieren wie beim Referenzdesign, sind Pumpenwirkungsgrade ab 50 % erforderlich, wofür technisch keine Lösung besteht. Die XD-Konfiguration stellt daher vom vakuumtechnischen Standpunkt her keine Lösung dar.

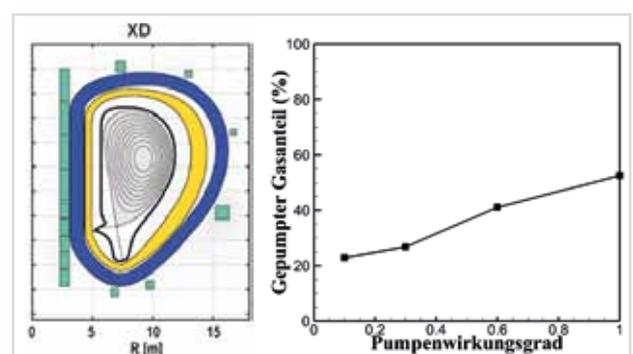


Abb. 9: Gepumpter Gasanteil für die XD-Konfiguration.

Die Thematik der Divertorentwicklung wird in den nächsten Jahren noch intensiver behandelt werden. So werden vor allem weitere Konfigurationen sowie Divertoren mit Flüssigmetallen betrachtet werden.

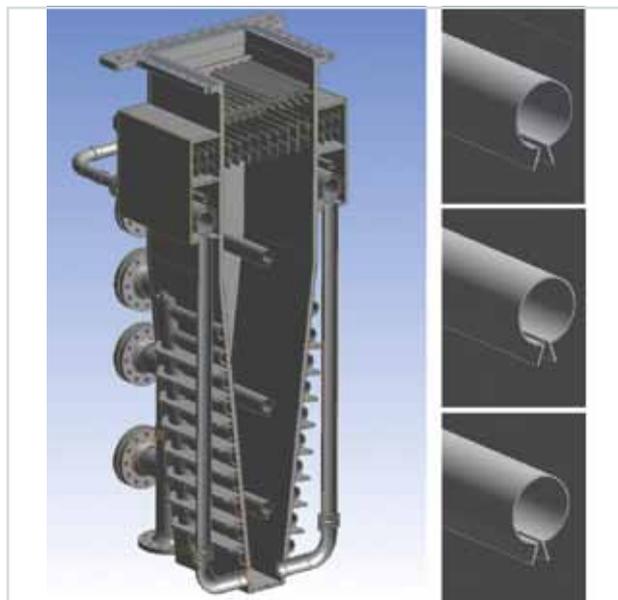
Kontakt: Stylianos.Varoutis@kit.edu

## Vakuumhydraulik

Das neue Forschungsthema Vakuumhydraulik zielt darauf, alle Aktivitäten zu bündeln und weiter zu stärken, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, vor allem Flüssigmetallen, in Maschinen und Prozessen unter Vakuum befassen. Dazu passend entwickelt der Institutsbereich Vakuumtechnik auch Prozesse für den Umgang mit diesen Arbeitsmitteln, wie Verfahren zur Aufreinigung und Prozessierung von Quecksilber und zugehörige analytische Verfahren. Das Forschungsthema existiert mit diesem Profil nur am KIT. Alle Experimente dazu laufen in einer gemeinsamen Halle in Bau 602.

Das Referenzkonzept für das Torusvakuumssystem von DEMO sieht stromabwärts der Metallfolienpumpen (vergleiche Forschungsthema Vakuumtechnologie und Prozessintegration) eine Kombination aus quecksilberbasierten Hoch- bzw. Grobvakuumumpen vor. Aktuell wird eine lineare Quecksilberdiffusionspumpe entwickelt, die für das Pumpen von Tritium in Magnetfeldern und mit einem Minimalinventar am Arbeitsmittel Quecksilber ausgelegt ist. Zudem lässt sich dieses spezielle Pumpendesign relativ einfach über die Vergrößerung der Länge des rechteckigen Pumpeneinlasses auf das in der Fusion erforderliche hohe Saugvermögen skalieren.

Die Herstellungszeichnungen für eine erste Testpumpe, die in der Hauptwerkstatt hergestellt und in der THESEUS-Anlage betrieben werden soll, wurden angefertigt (Abbildung 10). Mit dieser Pumpe soll ein eigens für Diffusionspumpen entwickelter Designcode validiert werden, mit dem sich die Pumpen für die speziellen Anforderungen auslegen lassen, nämlich hohes Saugvermögen bei für Hochvakuumumpen untypisch hohen Einlassdrücken und Gasdurchsätzen.



**Abb. 10: Design der linearen Testdiffusionspumpe.**  
Der Schnitt zeigt das Eintritts-Baffle unter dem rechteckigen Einlassflansch und die Treibmitteldüsen.

Zum Testen dieser Pumpe bedarf es eines Labors, um quecksilberbehaftete Pumpenkomponenten, beispielsweise die Düsenstöcke, für eventuelle Modifikationen zu reinigen. Als besondere Aktivität im Forschungsthema Vakuumhydraulik wurde 2018 der Aufbau des

Quecksilberlabors HgLab Karlsruhe abgeschlossen. Das Labor wird in den kommenden Jahren die experimentellen Arbeiten zur tritiumkompatiblen Vakuumpumpenentwicklung unterstützen sowie Arbeiten zur Lithium-Isotopen-Trennung ermöglichen. Auch für die Analyse sich ansammelnder Verunreinigungen im Quecksilber während des Betriebs der Pumpen, für Korrosionstests sowie für die Aufreinigung und Lagerung von Quecksilber nach erfolgten Tests wird das Labor als Arbeitsplatz benötigt (Abbildung 11).



**Abb. 11: Inbetriebnahme des HgLab Karlsruhe in Bau 602.**

Das Labor besteht aus einem mobilen 20-Fuß-Container, der mit Schleusenbereich/Umkleide, zwei 1800-mm-Umluftarbeitsplätzen, einer leistungsfähigen Klimatisierung/Lüftung und der erforderlichen Infrastruktur einschließlich Kühlwasserversorgung, Gas-, Vakuum- und VE-Wasserversorgung sowie Reinstwasseranlage ausgestattet ist. Der Laborraum wird mit Atom-Adsorptions-Spektrometrie kontinuierlich auf den Quecksilbergehalt in der Raumluft überwacht. Für die Analyse von Flüssigmetallen steht ein massenspektroskopisches Analyseverfahren (Agilent ICP-MS 7900) bereit, das ebenfalls zum Labor gehört und für die Spurenanalyse von Verunreinigungen in Quecksilber sowie für die Quantifizierung des Lithium-Isotopen-Gehalts in wässrigen Lösungen verwendet werden wird. Die Entwicklung entsprechender ICP-MS Methoden wurde bereits begonnen; sie ist essenziell für alle Isotopentrennungs- und Quecksilberaufreinigungsarbeiten in den nächsten Jahren.

2018 wurde auch ein großer Flüssigkeitsringpumpstand vorbereitet, bestehend aus zwei vollständig tritiumkompatiblen Flüssigkeitsringpumpen und einer Quecksilber-Diffusionspumpe als Booster für den Einsatz an JET in Großbritannien. An dieser weltgrößten Fusionsmaschine soll der Stand während der nächsten Tritiumkampagne eingesetzt werden, um den Torus kontinuierlich zu evakuieren. Dies wird wichtige Erkenntnisse zu Betrieb und Zuverlässigkeit der Ringpumpentechnologie mit Flüssigmetallen wie Quecksilber als Arbeitsmedium liefern. Nachdem der Aufbau des Systems in Bau 406 in der TOSKA-Halle beendet war, wurde die Einheit zur THESEUS-Anlage in Bau 602 transportiert und mit dieser Anlage verbunden. Anschließend wurden Verkabelung und Isolierung vorgenommen, gefolgt von aufwendigen Tests aller verbauten Komponenten wie Heizungen, Messstellen und Frequenzumrichter. Erste Tests mit Quecksilber laufen im Februar 2019.

Kontakt: Thomas.Giegerich@kit.edu



Offizielle Einweihung des Karlsruhe Tritium Neutrino Experiments KATRIN am 11. Juni 2018 in der Aula des FTU. Vertreter der Kollaboration, des KIT Präsidiums und der internationalen Finanzierungsträger drücken gemeinsam mit den Nobelpreisträgern Takaaki Kajita (6. von links) und Arthur McDonald (6. von rechts) den Startknopf.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen

Leitung: Dr. Beate Bornschein

Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) ist ein Isotopenlaboratorium mit einer Umgangsgenehmigung für 40 g ( $1,5 \cdot 10^{16}$  Bq) Tritium, 100 kg abgereichertes Uran sowie Rubidium und Krypton als Prüfstrahler zu Kalibrierzwecken. Auf einer Laborfläche von rund 1.000 Quadratmetern stehen mehr als 15 Handschuhkästen zur Verfügung. Sie dienen dem sicheren Einschluss der tritiumführenden Versuchsapparaturen und bieten ein Experimentiervolumen von rund 125 m<sup>3</sup>. Die Versuchsanlagen zur Handhabung von Tritium sind mit einem geschlossenen Tritiumkreislauf sowie dezidierten und zentralen Tritiumrückhaltesystemen (TRS) verbunden. Sie sind mit Prozessleittechnik ausgestattet, die auf die individuellen Anforderungen der Wissenschaft abgestimmt ist. Somit erfüllt das TLK sämtliche Voraussetzungen für die Planung, Aufstellung und Durchführung von Experimenten mit reinem Tritium und mit Tritiumgasmischungen.

Ein Arbeitsschwerpunkt des TLK liegt auf der Entwicklung von Technologien für den Brennstoffkreislauf von Fusionsreaktoren im Programm „Fusion“ (FUSION). Der zweite umfangreiche Arbeitsschwerpunkt liegt auf dem Aufbau, der Inbetriebnahme und dem Betrieb tritiumführender Systeme des Karlsruhe Tritium Neutrino Experiments KATRIN zur Messung der Ruhemasse des Elektronantineutrinos im Programm „Materie und Universum“ (MU).

Im Forschungsfeld Physik und Technologie von Wasserstoff-Isotopologen bearbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die folgenden Themen:

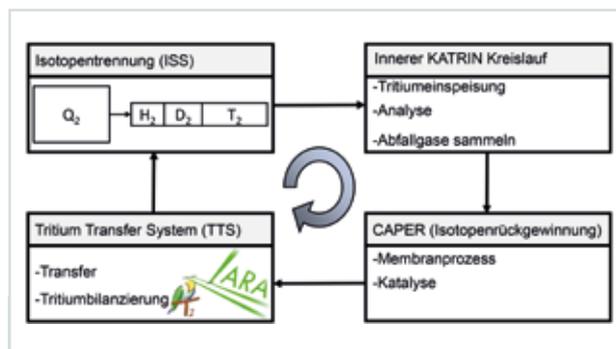
- Tritiumanlagen und -prozessierung
- Tritium- und Wasserstoffanalytik
- Physik der Wasserstoff-Isotopologen
- Suche nach neuer Physik

### Tritiumanlagen und -prozessierung

Das Forschungsthema Tritiumanlagen und -prozessierung umfasst alle Tätigkeiten, die der Weiterentwicklung von Verfahren zur Handhabung von Tritium dienen und ist daher eng mit angrenzenden Themen verbunden.

2018 wurden im Rahmen dieses Forschungsthemas im geschlossenen Tritiumkreislauf des TLK mehr als  $7 \cdot 10^{15}$  Bq (19,6 g) Tritium in ca. 30 mol Wasserstoff-Isotopologen sicher und ohne sicherheitsrelevante Zwischenfälle prozessiert. Dieses Gas wurde mit der Isotopentrennanlage auf eine Reinheit an 3H von > 98 % angereichert. Bei einem in fester Form als Urantrinitrid gelagerten momentanen Inventar von 26 g war der geschlossene Tritiumkreislauf des TLK für diese Aufgabe unverzichtbar.

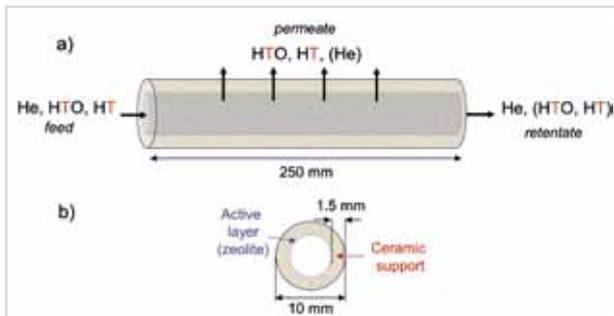
Hervorzuheben für das Jahr 2018 ist die Versorgung der ersten Tritiummesskampagnen von KATRIN. Im Mai und Juni 2018 wurden definierte Gasgemische für KATRIN präpariert und in den KATRIN-Kreislauf eingespeist. Eine Gasmenge von insgesamt 4,1 mol mit  $5,4 \cdot 10^{13}$  Bq Tritium wurde prozessiert und vollständig zurückgewonnen. Dabei war durchweg eine hohe Verfügbarkeit des TLK Tritiumkreislaufs und der Prozessschritte Tritiumreinigung, Isotopentrennung und Tritiumbilanzierung gewährleistet (siehe Abb. 1).



**Abb. 1: Vereinfachtes Schema des Tritiumkreislaufs zur Versorgung des KATRIN-Experiments. Tritium wird im TTS bereitgestellt, gegebenenfalls in der Isotopentrennung angereichert, um dann in den inneren Tritiumkreislauf von KATRIN transferiert zu werden. Verunreinigte Tritiumgasgemischungen werden in der CAPER-Anlage gereinigt, bevor nach einer Bilanzierung im TTS ein erneutes Einspeisen über die ISS erfolgen kann.**

Zusätzlich wurde im Rahmen der Entwicklung einer Trennkolonne zur Destillation von tiefkaltem Tritium (Cryo Destillation – CD), die Charakterisierung einer Kolonnenpackung mit Deuterium (D) und Protium (H) abgeschlossen. Dabei wurden alle wichtigen Auslegungskriterien für eine Kolonne gemessen, die mit Tritium betrieben werden soll, sodass 2019 die Auslegung einer Tritiumkolonne erfolgen kann. Zusätzlich wurden die 2017 begonnenen und in Kooperation mit dem rumänischen Institut ICIT durchgeführten Experimente zur Wasserdetriierung fristgerecht abgeschlossen. Dabei wurden Stoffübertragungskoeffizienten zum Isotopenaustausch zwischen HTO und H<sub>2</sub> innerhalb einer LPCE (Liquide Phase Catalytic Exchange)-Trennkolonne von drei Meter Länge und 100 mm Durchmesser bei 5 kg h<sup>-1</sup> im Gegenstrom mit 8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> Wasserstoff ermittelt. Da bei der Handhabung von Tritium stets tritiiertes Wasser (HTO) anfällt, ist es unerlässlich, zuverlässige Prozesse zu dessen Dekontamination zu beherrschen. Dazu lässt sich eine Kombination aus LPCE-Prozess und CD zur Rückgewinnung von Tritium aus HTO einsetzen.

Außerdem wurde das Experiment „Zeolite Membranes for Tritium Experiment (ZEMTE<sub>x</sub>)“ erfolgreich abgeschlossen (siehe Abb. 2). Dabei wurden alle Experimente mit Tritium (HT) und tritiiertem Wasser (HTO) abgeschlossen. (Details zu den Ergebnissen siehe Forschungsthema Blanket- und Tritiumtechnologie).



**Abb. 2:** Im Experiment ZEMTE<sub>x</sub> wird die Abtrennung von HTO aus einem Gasgemisch mithilfe einer Zeolithmembran erprobt: Ein Gasgemisch wird in das Membranrohr eingespeist (Feed); über das Permeat wird überwiegend HTO und HT entnommen, während das Retentat an HTO und HT abgereichert ist.

Kontakt: Stefan.Welte@kit.edu

## Tritium- und Wasserstoffanalytik

Die genaue Bilanzierung und die quantitative Analyse tritiiertter Verbindungen ist unbedingte Voraussetzung für den sicheren Betrieb des TLK und die darin vorgenommenen Experimente. Die Vielfalt der eingesetzten Prozessmedien und der experimentellen Bedingungen wie Druck, Temperatur, Tritiumkonzentration und Phasenzustand stellt hohe Anforderungen an die eingesetzte Tritiumanalytik. Die langjährige Erfahrung im Einsatz von klassischen Tritiumanalytikmethoden, beispielsweise Kalorimetrie, Ionisationsstrommessung und Gaschromatographie, bildet eine der Stärken des TLK. Darüber hinaus verlangen die Anforderungen von KATRIN und der Fusion im Bereich Analytik die Neu- und Weiterentwicklung hochpräziser Methoden wie der Beta-induzierten Röntgenspektrometrie (BIXS), der Laser-Raman-Spektroskopie und der Infrarotspektroskopie. Dabei geht es nicht nur um die Systementwicklung, sondern auch um die Verbesserung der erforderlichen Kalibrierverfahren. Ein Schlüsselexperiment dafür stellt TRIHYDE dar.

### TRIHYDE

Zur Weiterentwicklung und Kalibrierung der bestehenden Tritiumanalytik benötigt das TLK genaue Gasmischungen aller sechs Wasserstoff-Isotopologen in einem weiten Druck- und Konzentrationsbereich. Dazu wurde der Tritium-Hydrogen-Deuterium (TRIHYDE)-Kreislauf aufgebaut. In dieser Anlage lassen sich mithilfe zweier exakt bekannter Mischvolumina anhand des Druckverhältnisses Gaszusammensetzungen in einem weiten Konzentrationsbereich mit Unsicherheiten < 2 % herstellen. Die Gaszusammensetzungen werden anschließend in situ mithilfe verschiedener Messtechniken analysiert.

Ein Ziel von TRIHYDE ist die Kalibrierung des am TLK entwickelten Laser-Raman-Systems (LARA) zur Überwa-

chung der Isotopenzusammensetzung der Tritiumquelle für KATRIN. Dabei hat die Bestimmung der Isotopenzusammensetzung der Quelle direkten Einfluss auf die Neutrinomassenbestimmung. Weitere Analyseverfahren wie Beta-induzierte Röntgen-Spektrometrie (BIXS), Massenspektrometer oder Ionisationskammern können inline kalibriert und verglichen werden.

Nach dem erfolgreichen verfahrenstechnischen und elektrischen Aufbau laufen zurzeit erste Messungen mit Kalibriergasen aus Wasserstoff und Deuterium. Parallel dazu wird der Messbetrieb mit Tritium vorbereitet; er startet Anfang 2019. Der Palladium-Permeator zur Reinigung von Tritiumproben wurde erfolgreich getestet und integriert; die Schnittstelle zwischen Handschuhbox und LARA-System wurde installiert.

### Optimierung der BIXS-Systeme

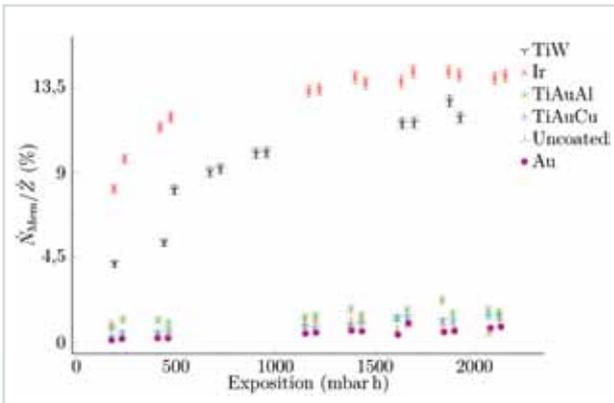
BIXS-Systeme zum hochsensitiven Nachweis von Beta-induzierter Röntgenstrahlung aus tritiierten Verbindungen sind derzeit durch Tritiumabsorption innerhalb der Analytiksysteme selbst noch in ihrer Genauigkeit limitiert. Um diesen sogenannten Tritiummemoryeffekt zu reduzieren, werden alternative Messzellenbeschichtungen mit möglichst geringer Tritiumaufnahme gesucht. Um eine Vorauswahl interessanter Beschichtungsmaterialien zu treffen, wurde eine Beladungsvorrichtung entwickelt (Abb. 3), mit der mehrere Materialproben simultan einer Tritiumatmosphäre ausgesetzt werden können. Über die indirekte Bestimmung der Oberflächenaktivität durch wiederholte Wischtestnahme können Proben mit möglichst geringer Tritiumaufnahme gesucht werden. Erste systematische Untersuchungen mit Edelstahlproben zeigten, dass diese Methode eine Reproduzierbarkeit der nachgewiesenen Oberflächenaktivität von 10 % erreichen kann.



**Abb. 3:** Beladungsvorrichtung mit Probenhalter zur Vorauswahl von Materialien für anschließende Untersuchungen mit BIXS.

Materialproben, die sich mit dem Beladungstest als vielversprechend erwiesen haben, werden anschließend mit dem am TLK entwickelten Tritium Activity Chamber Experiment (TRACE) 3.0 weiter untersucht. Dieses spezielle modulare BIXS-System erlaubt, unterschiedlich beschichtete Messzellen im Hinblick auf den Tritiummemoryeffekt zu charakterisieren, ohne eine Detektorkontamination beim Wechsel der Messzellen zu riskieren. In ersten Testmessungen wurden Au-, Ir-, TiW-, TiAuAl- und TiAuCu-Schichtsysteme sowie unbeschichtete Edelstahlmesszellen charakterisiert (Abb. 4). Sie wurden

wiederholt einem Referenzdruck von 1.100 Pa molekularem Tritium ausgesetzt, welches die Obergrenze des Bereichs darstellt, in dem Selbstabsorption von Röntgenstrahlung im Gas noch keine Bedeutung besitzt. Den geringsten Tritiummemoryeffekt zeigten die gold-



**Abb. 4:** Relativer Tritiummemoryeffekt (Untergrundsignal bei evakuierter Zelle gegenüber Referenzsignal bei 1100 Pa) als Funktion der integralen Beladung von verschiedenen untersuchten Messzellenbeschichtungen.

beschichtete und die unbeschichtete Edelstahlmesszelle. Weitere Untersuchungen folgen, sobald die Messungen mit dem Beladungstest abgeschlossen sind.

### Neuentwicklung der LARA Software

Die bisherige Laser-Raman-Spektroskopie-Betriebssoftware ist das Ergebnis einer jahrelangen iterativen Entwicklung mit Schwerpunkten auf automatisierter Untergrunddiskriminierung, Peakerkennung und Peakfitting in den Ramanspektren. Mit dem Übergang des KATRIN-Experiments von der Entwicklungs- in die Messphase haben sich die Anforderungen an Robustheit, Stabilität und Nutzerfreundlichkeit der komplexen Instrumentensoftware erhöht. Daher wurde die LARA Aufnahme- und Analysesoftware mit der Unterstützung eines zertifizierten LABVIEW-Entwicklers von Grund auf neu entwickelt. Dies ermöglicht in den künftigen KATRIN-Messphasen einen stabilen Betrieb, eine erleichterte Wartung sowie – dank des modularen Aufbaus – die Möglichkeit, die Software für zukünftige Anwendungen zu erweitern.

Kontakt: Marco.Roellig@kit.edu

## Physik der Wasserstoff-Isotopologen

Das Forschungsthema Physik der Wasserstoff-Isotopologen nutzt alle Wasserstoffisotope, Protium (H), Deuterium (D) und Tritium (T), sowie die molekularen Isotopologen H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, HD, HT und DT, um Erkenntnisse über grundlegende physikalische Vorgänge zu erlangen. Dabei ergeben sich große Überschneidungen mit anderen Forschungsthemen, speziell was kryogene Stoffeigenschaften, Tritium- und Wasserstoffanalytik, Suche nach neuer Physik sowie Tritiumextraktion und -rückgewinnung betrifft, sodass die Erkenntnisse themenübergreifend verwendet und erweitert werden.

Derzeit geht es vor allem um vier Fragen. Erstens werden für das KATRIN-Experiment molekulare und ato-

mare Austauschprozesse im inneren Tritiumkreislauf sowie die Bildung von Molekülclustern in der 30 K kalten gasförmigen Tritiumquelle untersucht, da diese Prozesse einen direkten Einfluss auf die Systematik des Experiments haben (siehe KATRIN). Zweitens wird die Molekülstruktur von tritiierten Wassermolekülen mit hochgenauer Spektroskopie untersucht, wodurch sich die Molekültheorie testen lässt. Dies kann drittens zur Entwicklung von laserbasierten Detektoren für die atmosphärische Überwachung in und um Kraftwerke dienen. Viertens geht es um die katalytische Umwandlung der Ortho-Para-Modifikation von Wasserstoff und die Löslichkeit von Tritium in flüssigen Lithium-Blei-Legierungen.

### Löslichkeit von Tritium in flüssigen Lithium-Blei-Legierungen

Die Löslichkeit von Tritium in Lithium-Blei-Legierungen (LiPb) wird durch die Sieverts-Konstante definiert. Dieser Parameter ist von zentraler Bedeutung für Fusionskraftwerke, um zentrale Verfahren im Tritiumkreislauf auszuwählen und ausulegen, speziell die Tritiumextraktion aus LiPb. Auch wirkt er sich auf die Menge des Tritiuminventars im Regelbetrieb aus und ist damit von zentraler sicherheitstechnischer Bedeutung. Bisherige Studien dieses Tritium-LiPb-Systems erbrachten jedoch aufgrund unterschiedlicher Messmethoden und systematischer Effekte keinen konsistenten Wert. Gemessen wird die Löslichkeit typischerweise, indem in einem Behälter eine genau bekannte Menge Tritium vorgehalten wird; dieses wird dann in einen Behälter entspannt, der LiPb enthält. Die Differenz zwischen Anfangs- und Enddruck lässt auf die im LiPb gelöste Tritiummenge schließen.

Die Herausforderung besteht darin, parasitäre Volumina und Sorptionsvorgänge an Oberflächen so klein wie möglich zu halten, um die Messung nicht zu verfälschen. Gleichzeitig muss das LiPb auf über 300 °C erhitzt werden, was den Temperaturen im späteren Einsatz entspricht, und nur tritiumkompatible Komponenten mit hochvakuumverträglicher Dichtigkeit dürfen verwendet werden. Um die parasitären Effekte zu minimieren, kommen in der zentralen Kammer nur spezielle Gläser infrage, die sich jedoch nicht mit LiPb vertragen. Daher muss ein spezieller Einsatz gefertigt werden, der das LiPb von der Glaswand trennt. 2018 wurde mit dem detaillierten Design der zentralen Messkammer begonnen, wobei besonders die Abdeckung eines möglichst großen Sensitivitätsbereichs angestrebt wird, um über den gesamten in der Literatur dargelegten Bereich messen zu können.

### Kryogene Ortho-Para-Wasserstoffkatalyse

Molekularer Wasserstoff existiert in zwei Formen: als Ortho (o)- und als Para (p)-Wasserstoff. Bei Raumtemperatur liegt das op-Gleichgewicht bei etwa 3:1, bei 20 K liegt es fast vollständig bei reinem Para-Wasserstoff. In der flüssigen Phase findet die exotherme op-Konversion auf natürlichem Weg innerhalb von einigen Stunden bis wenigen Tagen statt. Die dabei freiwerdende Energie führt zum Verdampfen des Wasserstoffs und macht dadurch eine dauerhafte Lagerung unmöglich. Daher ist es notwendig, die op-Konversion bereits während der Verflüssigung mithilfe von Katalysatoren zu erzwingen. Genaue Daten, speziell auch zu neueren Katalysatoren, fehlen jedoch, weshalb Wasserstoffverflüssiger in Bezug auf die Katalysatormenge meist überdimensioniert sind

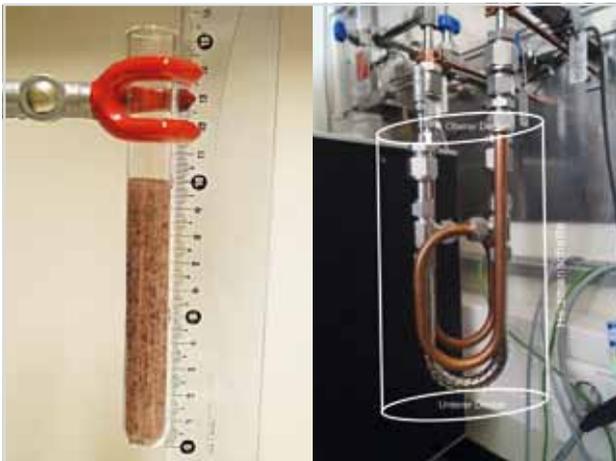


Abb. 5: Silikatschüttung mit Eisenoxid vermischt (links), neuer Konverter aus Kupfer (rechts).

damit ineffizient sind. Etwa ein Drittel des Energieverlusts wäre durch genauere Kenntnis der Katalyseeigenschaften und durch bessere Katalysatoren vermeidbar.

2018 wurde ein auf der Raman-Spektroskopie basierendes Verfahren zur Charakterisierung solcher Katalysatoren erfolgreich getestet; die Ergebnisse wurden modelliert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse führten zu einem verbesserten Katalysatordesign (siehe Abb. 5). Der neue Konverter besteht aus einem Kupferrohr; das Katalysatormaterial wird mithilfe eines katalytisch inaktiven Substrats verdünnt, sodass der Energieeintrag durch die  $o$ -Umwandlung auf einen größeren Bereich verteilt wird und somit besser abgeführt werden kann. Zudem wurde ein wichtiger Vorteil dieser neuen Methode demonstriert. Der  $o$ -Konversion liegen zwei Prozessgruppen zugrunde, die eine entgegengesetzte Temperaturabhängigkeit haben (siehe Abb. 6). Bei der Chemisorption werden die Moleküle aufgespalten, was mit steigender Temperatur besser gelingt. Bei der Physisorption werden nur die Kernspins der beiden Kerne entkoppelt, das Molekül bleibt jedoch erhalten, was bei tiefen Temperaturen besonders effektiv ist. In Summe führt das zu einem Minimum der Konversionsleistung etwa bei Raumtemperatur. Wie sich zeigte, lassen sich durch die Verwendung von Deuterium als Tracer und die gleichzeitige Analyse der  $o$ - $p$ -Zusammensetzung und der chemischen Zusammensetzung mithilfe der Raman-Spektroskopie in situ die beiden Prozessstypen unter-

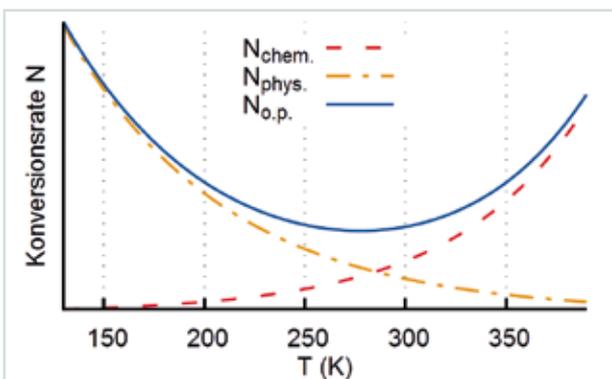


Abb. 6: Chemi- und physisorbierende Prozesse tragen beide zur Ortho-Para-Konversion bei, haben jedoch eine entgegengesetzte Temperaturabhängigkeit.

scheiden. Dies vermittelt einen direkten Einblick in die elementaren Reaktionen und wird eine genauere Modellierung der Katalyse erlauben.

Kontakt: Robin.Groessle@kit.edu

## Suche nach neuer Physik

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik bleibt trotz seines enormen Erfolgs unvollständig. Es kann Dunkle Materie nicht erklären und liefert keine Antwort auf die Frage, warum die Allgemeine Relativitätstheorie auf kleinen Skalen nicht mit der Quantenphysik kompatibel ist. Darüber hinaus sollten Neutrinos laut Standardmodell masselos sein, doch die Beobachtung von Neutrino-flavour-Oszillationen weist eindeutig auf eine winzige Masse hin. Alle diese Unzulänglichkeiten verlangen eine experimentelle Suche nach neuer Physik, die uns ein neues Verständnis des Universums und der grundlegenden Prinzipien liefern wird.

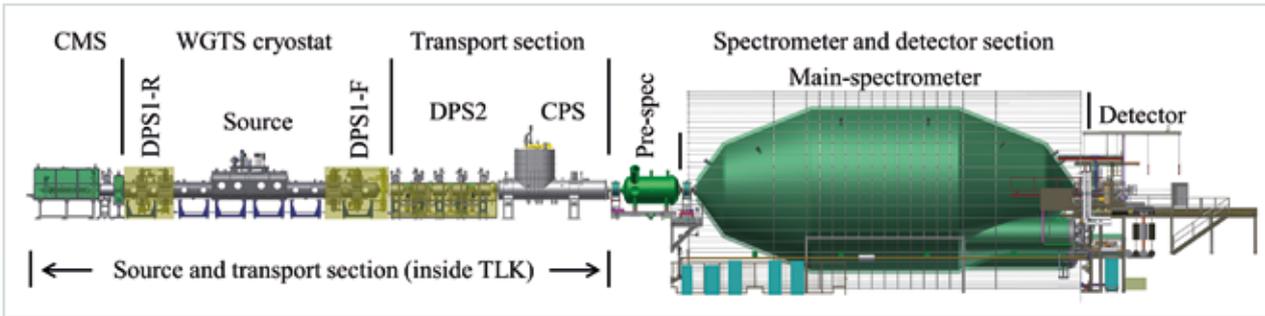
### Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN

Ziel des Karlsruhe Tritium Neutrino Experiments KATRIN ist die modellunabhängige Messung der Neutrinomasse mit einer Sensitivität von 200 meV/c<sup>2</sup>. Die Motivation für KATRIN ergibt sich aus der Schlüsselrolle von Neutrinos in der Astroteilchenphysik, wie beispielsweise als heiße Dunkle Materie bei der Evolution großräumiger Strukturen im Universum.

Das Prinzip von KATRIN basiert auf der präzisen Vermessung des Spektrums von Elektronen aus dem  $\beta$ -Zerfall molekularer Tritiums nahe dem kinematischen Endpunkt von 18,6 keV (maximale, beim  $\beta$ -Zerfall freiwerdende Energie). Elektronen aus einer fensterlosen, gasförmigen Tritiumquelle ( $10^{11}$  Zerfälle/s) werden durch Magnetfelder von supraleitenden Magneten (bis zu 6 T) adiabatisch, das heißt ohne deren Energie zu verändern, durch die 70 Meter lange Experimentiereinrichtung geführt. Ein System aus zwei elektrostatischen Retardierungsspektrometern erlaubt, die Elektronenenergien mit einer Auflösung von 0,93 eV zu bestimmen (siehe Abb. 7).

2018 nahm die weltweite Kollaboration mit mehr als 150 Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern unter Federführung des KIT dieses Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik im Tritiumlabor Karlsruhe in Betrieb. Design, Aufbau und erfolgreiche Ausführung des Experiments KATRIN stellen höchste Anforderungen an die Prozesstechnik, besonders die Tritiumverfahrenstechnik, die Ultrahochvakuumtechnik und die Kryotechnik sowie die Stabilisierung der Hochspannung. Im Rahmen von KATRIN hat das ITEP die verantwortliche Leitung für die Tritiumprozesstechnik sowie für die Kryotechnologie inne. Die Arbeit des ITEP ist zu mehr als 95 % im so genannten Quell- und Transportsystem angesiedelt (siehe Abb. 7) Wegen der Handhabung großer Mengen Tritium (40 g/Tag) wurde das System komplett im und mit der Expertise des TLK aufgebaut.

Hauptbestandteil ist ein WGTS (Windowless Gaseous Tritium Source) genanntes, supraleitendes Magnetsystem von 16 Meter Länge, das in seinem  $\approx 30$  K kalten Strahlrohr die gasförmige Tritiumquelle beherbergt. Außerdem befinden sich auf der Strahlachse im rückwärtigen Teil das sogenannte Kalibrations- und Monitoringsystem



**Abb. 7:** Schematische Darstellung des internationalen Großexperiments KATRIN. Die bei  $\beta$ -Zerfällen in einer hochintensiven, fensterlosen, molekularen Tritiumquelle (WGTS) entstehenden Elektronen werden über eine Tritiumpumpstrecke mit den aktiven und passiven Elementen DPS2 und CPS zu einem System aus zwei elektrostatischen Spektrometern (Vor- und Hauptspektrometer) geführt. Die analysierten Elektronen werden mithilfe eines Halbleiterdetektors nachgewiesen.

(CMS) und im vorderen Teil – Richtung Spektrometer – das Transportsystem. Dieses hat die Aufgabe, die  $\beta$ -Elektronen aus dem Tritiumzerfall ins Spektrometer zu leiten und gleichzeitig mithilfe von Pumpen den Tritiumgasfluss ins Spektrometersystem um mehr als zwölf Größenordnungen zu reduzieren. Dies geschieht einerseits mithilfe der differentiellen Pumpstrecke (DPS2) durch den Einsatz von Turbomolekularpumpen und andererseits – als letzte Stufe – mit der kryogenen Pumpstrecke (CPS), die bei 3,5 K bis 4 K betrieben wird. Sowohl DPS2 als auch CPS stellen supraleitende Magnetkryostatsysteme von sieben bzw. neun Meter Länge dar.

2018 wurden der Aufbau und die Inbetriebnahme der Tritiumkreisläufe abgeschlossen. Für den Tritiumbetrieb von KATRIN ist es erforderlich, dass alle tritiumführenden Systeme mit einer zweiten Hülle ausgestattet sind, die im Fall eines Lecks im Primärsystem eine weitere Barriere für das radioaktive Gas darstellt. Sie wird in der Regel als Handschuhbox ausgeführt, die an Tritiumrückhaltesysteme (TRS) und Unterdruckhaltungen (UDH) angeschlossen ist. Die dazu nötigen Instrumentierungssysteme und Rohrleitungen wurden installiert. Die Handschuhboxen wurden geschlossen und nach umfangreichen Lecksuchen und Leckagebeseitigungen zusammen mit den TRS und den UDH in Betrieb genommen. Die Mess- und Automatisierungsgruppe des TLK erfüllte 2018 bei den Arbeiten an KATRIN ein umfassendes Spektrum von arbeitsintensiven Aufgaben.

Aufbau und Inbetriebnahme der ersten und der zweiten Hülle gelangen fristgerecht. In der ersten Hälfte des Jahres 2018 gingen alle Gaskreisläufe gemeinsam in Betrieb, zunächst im Rahmen der inaktiven Inbetriebnahme mit Deuterium und dann nach erfolgtem Umschluss auf Tritium in der First Tritium Kampagne mit radioaktivem Tritium (siehe Highlight). Anschließend an die First Tritium Kampagne wurde die Rear-Section ertüchtigt, und mit einer quenchkondensierten Kryptonquelle wurden in der CPS Messungen mit dem Spektrometer durchgeführt. Danach erfolgte die STS3a-Messphase mit Deuterium. In dieser Messphase wurden unter anderem die Inbetriebnahme sowie systematische Messungen mit der E-Gun der Rear-Section durchgeführt (siehe Highlight), sowie Testmessungen mit dem Gas beigemischt radioaktivem Kr-83m vorgenommen.

### Hochauflösende Laser Spektroskopie

Ein zweiter Weg der Suche nach neuer Physik basiert auf Vergleichen zwischen hochauflösenden Messungen in

Testsystemen und hochgenauen theoretischen Berechnungen. Mit fortschreitenden Verbesserungen der experimentellen und theoretischen Genauigkeit können Abweichungen eindeutig auf neuartige Effekte hinweisen. Ein geeignetes Testsystem ist molekularer Wasserstoff, der aufgrund seiner Einfachheit eine hochgenaue Berechnung des Molekülpotenzials und der Energieniveaus erlaubt. Bisher bezogen sich alle hochauflösenden Messungen ausschließlich auf die stabilen Isotopologen  $H_2$ ,  $HD$  und  $D_2$ . Hingegen wurden  $HT$ ,  $DT$ , und  $T_2$  bisher aus Präzisionsuntersuchungen ausgeschlossen, unter anderem aufgrund der radiochemischen Aggressivität von Tritium. In Zusammenarbeit mit der Vrije Universiteit Amsterdam beabsichtigen Forscher am TLK, die hochauflösende Spektroskopie von molekularem Wasserstoff weiter voranzutreiben und dabei erstmals auch die drei radioaktiven Moleküle einzubeziehen. Im ITEP-Jahresbericht 2017 waren die ersten hochauflösenden Messungen an  $T_2$  vorgestellt worden – fünfmal genauer als Untersuchungen aus dem Jahr 1987. Im Jahr 2018 wurde die Messmethodik, die sogenannte Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS), in Zusammenarbeit von TLK und VU Amsterdam noch weiter verbessert. So wurde ein weiterer Faktor 50 an Genauigkeit gewonnen (veröffentlicht in Phys. Rev. Lett).

Damit sind diese Messungen auch genauer als die bisherigen theoretischen Vorhersagen für die Vibrationslevel von  $T_2$ . Die Verbesserung der Messungen ist hauptsächlich auf eine genauere Kenntnis der Wellenlängen der eingesetzten Laser und eine bessere Kontrolle der systematischen Fehlerquellen zurückzuführen.

Kontakt: Magnus.Schloesser@kit.edu



**Abb. 8:** Blick in den KATRIN-Kontrollraum während der ersten Tritiumkampagne im Mai und Juni 2018.

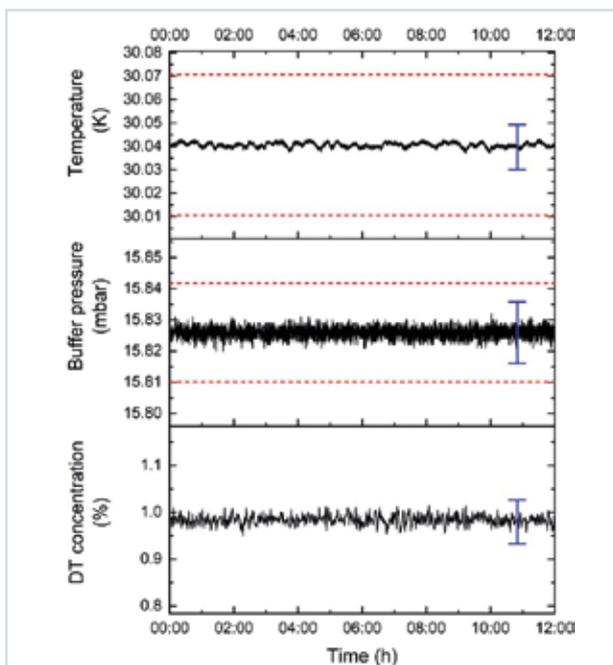
## Highlight Erste Tritiummessphase mit KATRIN

Nach der Anlieferung der letzten Großkomponente von KATRIN, nämlich der fensterlosen Tritiumgasquelle (WGTS), wurde der Aufbau des Experiments abgeschlossen. 2016 wurden erste Photoelektronen durch die 70 Meter lange Anlage bis zum Detektor geleitet, wo sie letztlich nachgewiesen wurden. Damit wurde die elektromagnetische Transporteigenschaft des KATRIN-Experiments eindrucksvoll demonstriert und optimiert. 2017 wurde metastabiles Krypton,  $^{83m}\text{Kr}$ , als Elektronenquelle verwendet. Dieses radioaktive Gas entsteht beim Zerfall von seinerseits radioaktivem Rubidium,  $^{83}\text{Rb}$ . Anders als Tritium, das ein kontinuierliches Spektrum aufweist, emittiert  $^{83m}\text{Kr}$  seine monoenergetischen Konversionselektronen bei definierten Energien bis zu 32 keV. Damit ist dieses Gas dazu prädestiniert, das KATRIN-Experiment zu charakterisieren und seine Energiemessung zu kalibrieren.

Nachdem die letzten technischen Arbeiten und Inbetriebnahmen erfolgreich abgeschlossen worden waren, wurde bereits im Frühjahr 2018 erfolgreich demonstriert, dass die im TLK aufgebauten komplexen Tritiumkreisläufe zusammen mit der KATRIN-Quelle mit Deuterium betrieben werden können. Dabei wurden erste Stabilitätsanalysen und Parameteroptimierungen vorgenommen.

Der erste Betrieb des kompletten KATRIN-Experiments mit Tritium fand im Mai 2018 statt. Ziele der Messungen waren:

- Inbetriebnahme des gesamten KATRIN-Experiments mit Spuren von Tritium (0,5 % der nominalen Aktivität, was in etwa 500 MBq entspricht)
- Demonstration der Rückhaltung von neutralem Tritium und Ionen aus dem Quellbereich in Richtung des Spektrometers



**Abb. 7:** Stabilität der fundamentalen Quellparameter – Quelltemperatur, Einspeisedruck, DT Konzentration – über eine Dauer von zwölf Stunden. Die blauen Balken zeigen die systematische Unsicherheit der Messungen an. Die roten Linien markieren die 0,1 % Stabilitätsanforderung.

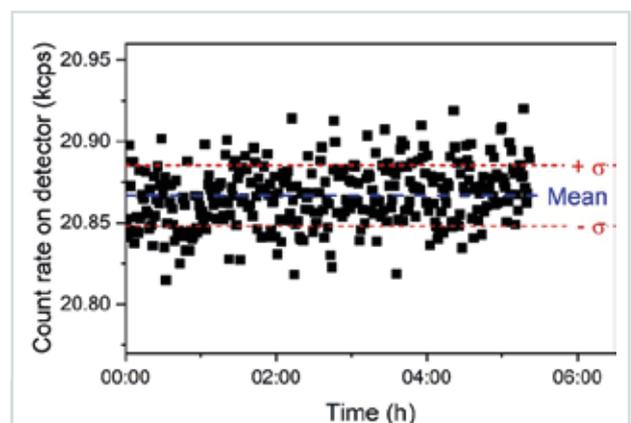
- Untersuchung der Stabilität des gesamten KATRIN-Systems
- Erstmalige Messung eines Tritiumendpunktspektrums, um die Analyseverfahren zu testen und Auswertestrategien zu optimieren

Jedes dieser Einzelziele stellt einen wichtigen Meilenstein für den zukünftigen Messbetrieb des KATRIN-Experiments dar, der darauf zielt, die Neutrinomasse mit der Designsensitivität von 0,2 eV/c<sup>2</sup> zu bestimmen.

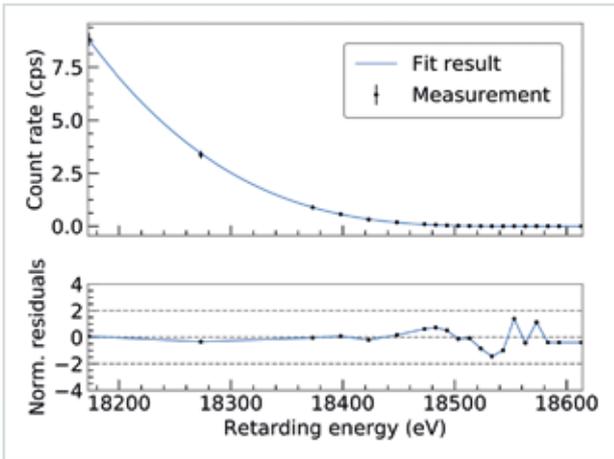
Die erste Tritiuminjektion in den KATRIN-Tritiumkreislauf fand am 18. Mai 2018 statt. Dabei wurden nur geringe und genau kontrollierbare Mengen verwendet, um mögliche Risiken zu minimieren. Nach dieser erfolgreichen Demonstration mit geringsten Tritiumspuren wurde der Kreislauf mit einer zuvor bereiteten Gasmischung aus 1 % DT und ca. 99 % D<sub>2</sub> gefüllt, um eine kontinuierliche Zirkulation für die geplanten zwei Messwochen zu gewährleisten. Zunächst liefen Messungen zur Überprüfung der Ionenrückhaltung. Dies ist für die Sicherheit und den Untergrund des KATRIN-Experiments wesentlich und gelang in nur wenigen Messtagen.

Eine stabile Aktivität der Tritiumquelle lässt sich nur dann gewährleisten, wenn folgende Parameter ihrerseits stabil im Bereich von 0,1 % sind: die Strahlrohrtemperatur, die Einspeiserate, die durch einen druckstabilisierten Behälter festgelegt ist, sowie die Zusammensetzung des Tritiumgases. Abb. 9 zeigt den Verlauf dieser Parameter über einen exemplarischen Zeitraum von zwölf Stunden. Dies veranschaulicht, dass die genannten Stabilitätskriterien der Tritiumquelle erfüllt werden.

Im nächsten Schritt wurde die Stabilität des gesamten KATRIN-Experiments demonstriert – sie ist letztendlich für die Neutrinomassenmessung entscheidend. Dazu wurde die Retardierungsspannung am Hauptspektrometer auf einen konstanten Wert eingestellt, sodass alle Tritiumelektronen mit einer Energie von 1000 eV unterhalb des Betaspektrumendpunkts an den Detektor gelangen. Abb. 10 zeigt die Zählrate über eine Dauer von fünf Stunden. Die erwartete Ratenschwankung für eine Präzisionsanforderung von 0,1 % bei gegebener Rate beträgt ca. 18,6 Ereignisse pro Sekunde, was mit der gemessenen tatsächlichen Stabilität sehr gut übereinstimmt. Mithin demonstrierte die grundlegende systemübergreifende Stabilitätsuntersuchung, dass das KATRIN-Experiment selbst bei



**Abb. 8:** Elektronenzählrate am KATRIN-Detektor über fünf Stunden bei konstanter Spektrometer-Retardierungsspannung.



**Abb. 10:** Eines der ersten Tritium-Betaspektren von KATRIN. Der Scan dauert rund drei Stunden. Die auf die statistischen Fehler normierten Residuen zeigen eine Übereinstimmung von Daten und Modell, die besser ist als zwei Standardabweichungen.

geringsten Tritiummengen die Designanforderung erfüllen kann.

Darüber hinaus wurden mit KATRIN erstmals Tritiumspektren aufgenommen. In Abb. 11 ist ein Spektrum aus einem der ca. 70 Beta-Scans in der Endpunktregion zu sehen. Diese Spektren ließen sich hervorragend mit dem für KATRIN entwickelten Quell- und Transmissionsmodell fitten, ohne dass zusätzliche Korrekturen an den Daten notwendig waren. Das beweist die hohe Qualität des Experiments, der damit produzierten Daten und des Verständnisses der zugrunde liegenden Physik. Diese ersten spektroskopischen Daten wurden nicht für eine Bestimmung der Neutrinomasse genutzt, da die Statistik bei dieser kurzen Messdauer und der geringen Quellaktivität nicht ausreichend wäre. Daher wurde der Endpunktwert – der höchste Energiewert, bei dem das Betaspektrum endet – gefittet und als Messgröße für systematische Untersuchungen verwendet.

Abb. 12 zeigt die Evolution dieses Endpunktwertes über die einzelnen Runs (Spektrenscans). Ersichtlich ist, dass die einzelnen Werte lediglich mit einer statistisch erwartbaren Schwankung um den Mittelwert verteilt liegen. Nachdem die KATRIN-Stabilität anhand der Einzelparameter und anhand der Zählrate bei konstanter Retardierungsspannung demonstriert worden war, wurde abschließend gezeigt, dass auch die Aufnahme und die Auswertung der  $\beta$ -Spektren robust und zuverlässig sind. Dies ist für spätere Neutrinomassenanalysen von entscheidender Bedeutung.

Die Tritiumspektren wurden darauf untersucht, inwiefern es die Fitergebnisse beeinflusst, wenn nur bestimmte Bereiche des Detektors ausgewertet werden oder wenn einzelne Runs zusammengefasst werden. Diese Erkenntnisse fließen in eine künftige Mess- und Analysestrategie ein.

Nach der erfolgreichen ersten Messphase mit geringen Tritiummengen sowie anschließenden Charakterisierungsmessungen des Hauptspektrometers mit der kondensierten  $^{83m}\text{Kr}$  Quelle startete im Herbst 2018 die Messphase STS IIIa. In dieser Messphase liefen grundlegende

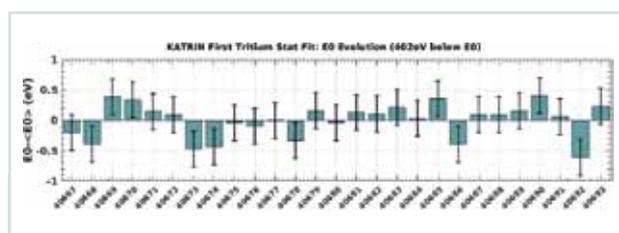
Messungen, um die systematischen Unsicherheiten in Bezug auf die Neutrinomasse zu messen, zu verstehen und zu minimieren. Dazu wurde erstmals die Elektronenkanone (E-Gun) der Quellsektion von KATRIN verwendet. Die E-Gun erzeugt ihre Elektronen durch Photoemission, wobei dank des Einsatzes einer schmalbandigen UV-Quelle die Energieverteilung der Elektronen ebenfalls schmalbandig ist. Nur mit diesen genau definierten Elektronen sind die für KATRIN essenziellen Messungen zur Gasmenge innerhalb der Quelle sowie zum Energieverlust der Elektronen beim Passieren der Quelle möglich.

Weiterhin liefen während STS IIIa wichtige Untersuchungen mit gasförmigem  $^{83m}\text{Kr}$ , das dem zirkulierenden Deuterium in der Quelle zugefügt wurde. Aus Messungen der Konversionselektronenspektren der 32 keV und 9,4 keV Gammaübergänge des metastabilen Krypton-83 lassen sich selbst kleinste Veränderungen im elektrischen Potenzial im Inneren der Gassäule bestimmen, die zu einer systematischen Verschiebung der gemessenen Neutrinomasse führen würden. Als weiterer essenzieller Parameter für das Startpotenzial der Betaelektronen wurde die Austrittsarbeit der Rear Wall bestimmt, einer Goldplatte, welche die Quelle abschließt.

Insgesamt hat KATRIN während der Messphase STS IIIa die gesamte in den vorangegangenen Jahren aufgenommene Datenmenge innerhalb weniger Wochen fast verdoppelt und nach ausführlichen Auswertungen gezeigt, dass die extrem niedrigen systematischen Unsicherheiten, für die das Experiment entworfen wurde, sich erreichen lassen.

Ende Februar 2019 findet die nächste Tritiummesskampagne statt, bei der in Etappen die Tritiumaktivität stufenweise auf 100 % gefahren wird. Bei jeder Stufe wird dabei die Messung der Tritiumrückhaltung (Neutralgas und Ionen) durchgeführt, um weiterhin einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Nach dieser Startphase und wenigen systematischen Untersuchungen, beispielsweise Studien des Quellplasmas sowie die Messung des Elektronenenergieverlusts in Tritiumgas, werden dann in der insgesamt 60-tägigen Kampagne die eigentlichen Neutrinomassenscans durchgeführt. Dabei werden die systematischen und statistischen Unsicherheiten ausreichen, um eine erste Neutrinomassenanalyse mit einer Sensitivität von  $< 1$  eV durchzuführen. Diese Sensitivität wäre bereits doppelt so gut wie die bisherige Obergrenze von  $2 \text{ eV}/c^2$ , welche die Vorgängerexperimente in Mainz und Troizk festgelegt haben.



**Abb. 9:** Auswertung von 27 aufeinanderfolgenden Tritiumspektren. Aufgetragen sind die Differenzen zwischen einzelnen Energieendpunkten, die durch einen Fit an das Spektrum bestimmt wurden, und dem Durchschnitt aller bestimmten 27 Tritiumendpunktwerte. Ersichtlich ist, dass die Schwankung innerhalb des erwarteten Fehlers liegt.

# Preise und Auszeichnungen

Im Jahr 2018 erhielten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP verschiedene Auszeichnungen und Preise.

Privatdozent **Dr. Francesco Grilli** bekam vom IEEE Council on Superconductivity für sein herausragendes Engagement als Editor einer Sonderausgabe der IEEE Transactions on Applied Superconductivity eine Plakette verliehen.

Für den besten Vortrag auf dem Workshop „4<sup>th</sup> HTS4Fusion Conductor Workshop“ wurde **Dr. Michael Wolf** ausgezeichnet. Sein Vortrag „Status of the conceptual HTS DEMO TF coil design and progress on HTS CrossConductor Fabrication“ gab eine Übersicht über die am ITEP erzielten Ergebnisse auf diesem Gebiet. Das CrossConductor Leiterkonzept erreicht derzeit die höchsten Stromdichten für Leiter in der Fusion. Kürzlich wurde dieses Leiterkonzept auch an einen Industriepartner lizenziert.



*Preis für den besten Vortrag bei der 4. HTS4Fusion Konferenz für Michael Wolf*

**Dr. Anna Kario** erhielt auf der International Cryogenic Materials Conference (ICMC) den „Cryogenic Materials Award for Excellence“ für ihre Pionierarbeiten zur Entwicklung von fortgeschrittenen supraleitenden Roebel-Leitern. Der Award würdigt die besondere Leistung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unter 40 Jahren, die eine innovative Forschungsleistung erbracht und bereits internationales Renommee erworben haben.

Unser Doktorand **Simon Otten** erhielt ein „IEEE Council on Superconductivity Graduate Study Fellowship“ für seine exzellente Arbeit zu supraleitenden Roebel-Kabeln. In dieser Arbeit gewann Simon Otten neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Übergangswiderständen von Roebel-Leitern und deren AC-Verlusten; dazu entwickelte er ein leicht zu verstehendes Simulationsmodell. Nach 2015 und 2017 ging dieser renommierte Nachwuchspreis bereits zum dritten Mal an einen Doktoranden des ITEP.

**Dr. Magnus Schlösser** vom Tritiumlabor Karlsruhe wurde in das Eliteprogramm für Postdoktorandinnen und Postdoktoranden der Baden-Württemberg Stiftung aufgenommen. Damit verbunden ist eine Unterstützung seines Forschungsprojekts „Molecular physics and searches for Novel Physics from ultrahigh resolution spectroscopy of tritiated molecules“. Ziel des Projekts ist, mit hochgenauer Spektroskopie Unterschiede bei der Theorie und Praxis von Wasserstoff-Isotopologen zu zeigen. Diese Untersuchungen laufen in enger Kooperation mit der Universität Amsterdam.

**Stefan Zimmermann** erhielt zusammen mit **Klaus Hofmann** vom Facility Management eine Prämie des Freundeskreises des Forschungszentrums Karlsruhe für besondere Leistungsträger der Infrastruktur. Stefan Zimmermann und Klaus Hofmann waren nach der Fertigstellung von Bau 410 verantwortlich für die außergewöhnlich gute Koordination der Arbeiten für unseren Bau 416, der 2017 bezogen und offiziell eingeweiht wurde. Eine besondere Herausforderung bestand darin, die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Nutzer zusammenzuführen. So waren in Bau 416 neben den Büroarbeitsräumen ein Schülerlabor, ein Seminarraum, eine Ausstellungsfläche sowie verschiedene Labor- und Werkstatt Räume zu integrieren. Dies gelang ausgezeichnet, und das Gebäude wurde nahezu im Zeit- und Kostenplan fertiggestellt.

Über diese Anerkennungen der außergewöhnlich guten Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter freuen wir uns sehr. Wir danken ihnen allen herzlich für ihre exzellenten Beiträge.



*Schlüsselübergabe für Bau 416*

# Abgeschlossene Doktorarbeiten

## Dr. Sebastian Hellmann

### Forschung und Technologieentwicklung für supraleitende strombegrenzende Transformatoren

Auf supraleitenden Materialien basierende neuartige Netzkomponenten besitzen signifikante Vorteile gegenüber konventionellen Netzkomponenten und Schutzeinrichtungen. Durch eine intrinsische Strombegrenzung können sie zu einem zuverlässigen und unterbrechungsfreien Netzbetrieb beitragen sowie die steigenden Auswirkungen von Netzfehlern effizient eindämmen.

Die vorgestellte Arbeit zeigt dies am Beispiel eines Transformators, der mit einer supraleitenden Sekundärwicklung ausgestattet ist. Die intrinsischen Eigenschaften des supraleitenden Materials erweitern den Transformator um die Fähigkeit, auftretende Kurzschlussströme im Stromnetz aktiv und effizient zu reduzieren. Im Vergleich zu konventionellen Netzschutzeinrichtungen geschieht dies ohne nennenswerte Verzögerung nach dem Auftreten des Fehlers.

In der Arbeit ist das erforderliche Grundwissen zur Supraleitung sowie zur Funktion und zur Konzeption von supraleitenden strombegrenzenden Transformatoren dargestellt. Das theoretisch erarbeitete Wissen wird praktisch für den Bau eines Labordemonstrators der 1-MVA-Leistungsklasse und die anschließende experimentelle Evaluierung eingesetzt.

Die einzelnen Kapitel der Arbeit sind im Folgenden kurz zusammengefasst. Kapitel 1 vermittelt die Grundlagen der Supraleitung und ihrer Anwendung in der Energietechnik. Dabei geht es speziell auf Zusammenhänge ein, die für die Konstruktion und den Bau eines supraleitenden strombegrenzenden Transformators relevant sind. Das Kapitel schließt mit einer Literaturrecherche zum Stand der Technik von supraleitenden Transformatoren und zu weiteren Anwendungen der Supraleitung in der Energietechnik. Kapitel 2 erläutert den Auslegungsvorgang für supraleitende Transformatoren mit strombegrenzenden Eigenschaften. Dazu stellt es ein Verfahren vor, mit dem sich die zu erwartenden transienten Eigenschaften eines entworfenen Transformators simulieren und optimieren lassen. Schließlich stellt das Kapitel das erarbeitete Design für einen supraleitenden strombegrenzenden Transformator der 1-MVA-Leistungsklasse vor.

Kapitel 3 beschreibt verschiedene experimentelle Untersuchungen an supraleitenden Bandleitern. Die Untersuchungsergebnisse dienen dazu, den Auslegungsvorgang für supraleitende Transformatoren zu optimieren sowie

zu ermitteln, welcher kommerziell erhältliche Supraleiter für den Einsatz im entworfenen supraleitenden Transformator geeignet ist. Kapitel 4 beschreibt den Aufbau des supraleitenden strombegrenzenden Transformators. Es geht auf die einzelnen Transformator-Komponenten ein und erläutert die konstruktiven Details des Aufbaus.

Kapitel 5 stellt die experimentellen Untersuchungen am aufgebauten supraleitenden Transformator dar. Es beschreibt die vorgenommenen Messungen sowie die eingesetzten Messmethoden und Laboraufbauten. Die Messungen beziehen sich auf die Effizienz der Strombegrenzung des Transformators im Fehlerfall, den Wirkungsgrad und die Verlustmechanismen des Transformatoraufbaus bei verschiedenen Belastungen, die AC-Verluste der verwendeten Supraleiter sowie die Effektivität des eingesetzten Kühlkonzepts.

Kapitel 6 stellt die Ergebnisse der Messungen vor und diskutiert sie im Detail. Dabei wird deutlich, dass der aufgebaute Transformator bei einem Kurzschluss den Fehlerstrom im Maximum der ersten Halbwelle auf 68 % des prospektiven Kurzschlussstroms reduziert und dass dieser im Verlauf der Strombegrenzung weiter auf unter 30 % des prospektiven Werts absinkt. Die durchgeführten Verlustmessungen zeigen eine Gesamteffizienz von 99,08 % für ein dreiphasiges Transformatormodell unter Vollast. Darin enthalten sind die gemessenen AC-Verluste des Supraleiters mit 633 W. Weiter wird die Bestimmung der relativen Kurzschlussspannung von 2,89 % gezeigt. Zusätzlich werden die Messergebnisse mit den in Kapitel 2 erarbeiteten Simulationsergebnissen verglichen und zu einer weiteren Optimierung des vorgestellten Auslegungsvorgangs verwendet. Messergebnisse und Simulationsergebnisse stimmen weitestgehend überein. Dies bestätigt die Richtigkeit der verwendeten Simulationsmodelle.

## Dr. Yingzhen Liu

### Auslegung eines supraleitenden Windgenerators mit Gleichstrom

Die Offshore-Windkraft stellt eine wichtige erneuerbare Energie dar. Um die Stromgestehungskosten zu senken, empfiehlt sich die Entwicklung großer Windparks und leistungsstarker Turbinen.

Im Jahr 2015 betrug die Kapazität einer Windturbine durchschnittlich 4,2 MW. Allerdings existieren bereits Turbinen mit Kapazitäten von 6–8 MW, und Turbinen mit noch höheren Kapazitäten gelangen nach und nach zur Anwendungsreife. Der Trend zu immer höheren Nennleistungen und immer mehr Offshore-Anlagen erfordert Innovationen im Bereich der Stromerzeugung. Diese wiederum setzen niedrigere Turbinengewichte, kleinere Maße, höhere Wirkungsgrade, größere Zuverlässigkeit und geringere Kosten voraus.

Mit einem supraleitenden Generator lassen sich dank der hohen Stromtragfähigkeit und der nicht vorhandenen Gleichstromverluste der Supraleiter ein beachtliches Gewicht-Volumen-Verhältnis und ein hoher Wirkungsgrad erreichen. Die Gleichstromübertragung bringt für Offshore-Windparks weitab des Festlands einen wesentlichen gesamtwirtschaftlichen Vorteil.

Die vorgestellte Abschlussarbeit präsentiert ein auf supraleitenden Gleichstrom-Windgeneratoren und Gleichstromkabeln basierendes System zur Gleichstromerzeugung und -übertragung. Die vorgestellte Lösung ermöglicht sowohl den Betrieb eines extrem leistungsfähigen und kompakten Generators als auch den Einsatz eines neuartigen und ebenfalls äußerst leistungsfähigen Gleichstromanschlusses. Die Arbeit konzentriert sich auf eine Machbarkeitsstudie und auf die Entwicklung des supraleitenden Gleichstrom-Windgenerators. Durch Einsetzen der Länge des supraleitenden Bands (Kosten), der Masse, des Volumens und der Leistung in

eine vereinfachte objektive Funktion wird ein Optimierungsverfahren entwickelt. Zum Verknüpfen des elektromagnetischen Designs und der mechanischen Auslegung mit Eigenschaften der supraleitenden Bänder und Eisenwerkstoffe werden alle notwendigen analytischen Gleichungen abgeleitet. Um die Auslegungsgenauigkeit zu erhöhen, werden die analytischen Gleichungen zur Berechnung der Flussdichteverteilung im supraleitenden Gleichstromgenerator durch Finite-Elemente-Analysen verifiziert. In die Massenberechnung werden neben den aktiven Bauteilen auch die inaktiven Konstruktionswerkstoffe einbezogen.

Diesem Auslegungsverfahren folgend beschreibt die Arbeit die Entwicklung eines supraleitenden 10-kW-Gleichstrom-Demonstrationsgenerators. Dabei geht sie auf die Verluste des Demonstrators und seiner Kommutierung, seines Drehmoments und seiner Leistung bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ein. Vor der Entwicklung des Demonstrators werden die Eigenschaften von Schlüsselkomponenten, supraleitenden Bändern und Eisenwerkstoffen getestet und charakterisiert. Die Auseinandersetzung mit den verschiedenen Herausforderungen durch Materialien und die Verifizierung der Auslegung des Demonstrators ermöglichen die erfolgreiche Umsetzung des Konzepts. Um das Potenzial großer supraleitender Gleichstrom-Windgeneratoren für die Windindustrie zu ermitteln, wird ein supraleitender 10-MW-Generator konzipiert und mit konventionellen Synchrongeneratoren verglichen. Die Arbeit erörtert darüber hinaus die Einsparung eines teuren HTS-Bands durch Optimierung des Außendurchmessers des Rotors, der Polpaarzahl und der Höhe der supraleitenden Spule. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, die vorgestellte Lösung gegenüber herkömmlichen Generatoren wettbewerbsfähiger zu machen.

## Dr.-Ing. Bernd Wunderlich

### Entwicklung eines druckgetriebenen dynamischen Kolonnenmodells zur Erhöhung der Flexibilität von kryogenen Luftzerlegungsanlagen

Die Lastflexibilität großindustrieller Energieverbraucher gewinnt aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien zunehmend an Bedeutung. Zur Unterstützung der Netzstabilität sind viele verschiedene Prozesse verfügbar. Ein besonders aussichtsreiches Verfahren ist die kryogene Rektifikation von Luft. Luftzerlegungsanlagen haben einen hohen Energiebedarf und besitzen eine inhärente Speichermöglichkeit mit hoher Energiedichte.

Ein flexibler Betrieb mit komplettem Abschalten eröffnet die größten Einsparpotenziale, da dabei eine maximale Variation der Anschlussleistung erfolgt. Zur Vorhersage und Optimierung dieser dynamischen Vorgänge wurde ein Modellansatz für das Rektifikationssystem in Luftzerlegungsanlagen erarbeitet. Durch die größten Trägheiten ist die Rektifikation limitierend für die maximale Lastwechselgeschwindigkeit dieser Anlagen.

Mithilfe eines druckgetriebenen Strömungsansatzes wurde ein Modell für kryogene Packungskolonnen unter voller Berücksichtigung des gasförmigen und flüssigen Fluidinhalts entwickelt. Durch die druckgetriebene Modellierung von Prozessströmen und die Stabilisierung des Modells für Nullströmungen durch Regularisierungsfunktionen lässt sich ein detaillierter Anfahrvorgang von der einphasigen Gasströmung bis hin zum kryogenen Betrieb simulieren.

Im Hinblick auf eine Lastflexibilisierung wurden die folgenden vier Musterszenarien definiert sowie für eine typische Drucksäule simuliert und diskutiert:

- warmer Anfahrvorgang
- Lastwechsel im Betrieb
- Anlagenstopp
- kalter Wiederanfahrvorgang

Für einen warmen Anfahrvorgang ließ sich anhand typischer Verzögerungszeiten zeigen, dass das erste Abfließen von Flüssigkeiten vom obersten Boden bis in den Sumpf mit einer Verzögerungszeit von etwa drei Minuten abläuft. Bei Erreichen des Staupunkts und einer weiteren Ansammlung von Flüssigkeiten in der Packung ergeben sich Zeitskalen von zehn Minuten bis zum vollständigen Wechsel der Strömungsregime auf allen Kolonnenböden. Die größte Trägheit im Bereich von 20 Minuten bis zum Erreichen des stationären Zustands besitzen die Konzentrationsänderungen in Anlagen mit hochreinen Produkten.

Bei einem kalten Wiederanfahrvorgang ließ sich die Anfahrzeit einer Drucksäule durch Sensitivitätsstudien um 10 % verkürzen, wobei Auslegungsparameter wie die Lochfläche im Verteilersystem verändert wurden. Zu-

sätzlich zeigte sich, dass eine Speicherung von kryogenen Flüssigkeiten in einem Verteilersystem bei Anlagenstopp die Rückvermischung verringert und somit eine Zeitersparnis von 10 % erreicht.

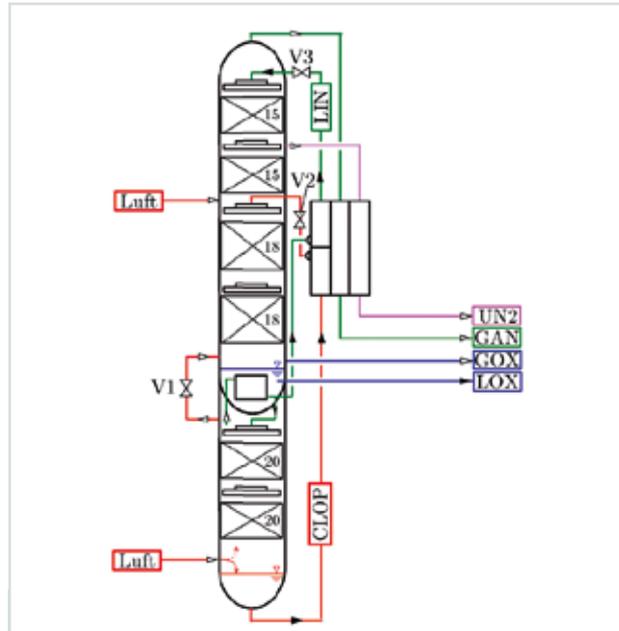


Abb. 1: Darstellung des simulierten Rektifikationssystems einer kryogenen Luftzerlegungsanlage.

Für das in Abbildung 1 dargestellte Doppelsäulensystem zeigte der gewählte Modellansatz den Einfluss der Druckdynamik auf das Betriebsverhalten des Hauptkondensators. Im Vergleich zur Simulation der Drucksäule dauert es im zweiten Beispielsystem 3,5 Stunden bis zur kompletten Ausbildung der Hydrodynamik. Die geforderten Produktreinheiten werden in etwa der gleichen Zeit erreicht. Bis sich eine stationäre Argonkonzentration in den beiden unteren Packungsbetten einstellt, vergehen etwas mehr als 9 Stunden.

Durch Anpassungen des Anlagendesigns und der Betriebsstrategie ließ sich die Lastwechselgeschwindigkeit einer Doppelsäule als Kernkomponente einer Luftzerlegungsanlage verbessern. Der verwendete Simulationsansatz bildet die Basis für die Erzeugung virtueller Anlagenmodelle (digitale Zwillinge), mit denen in Zukunft neuartige Regelalgorithmen entwickelt werden sollen. Dies ist notwendig, um die optimale Betriebsführung von Luftzerlegungsanlagen an variablen Energiemärkten zu ermöglichen.

Diese Arbeit erhielt den Linde Patent & Innovation Award 2017 sowie den DKV-Nachwuchspreis 2018.

## Dr.-Ing. Carolin Zoller

### Experimental Investigation and Modelling of Incidents in Liquid Helium Cryostats

Flüssighelium dient oft zur Kühlung supraleitender Magnete. Aufgrund der tiefen Betriebstemperaturen von 4 K und der niedrigen Verdampfungsenthalpie von Helium steigt der Druck in Flüssighelium-Kryostaten bei Störungen wie dem plötzlichen Verlust des Isoliervakuum schnell an. Der Auslegung von Sicherheitseinrichtungen kommt in der Kryotechnik daher besondere Bedeutung zu.

Allerdings erfassen die etablierten Regelwerke für die Dimensionierung die Bedingungen in der Kryotechnik und besonders bei Flüssighelium nur unzureichend. So werden Sicherheitseinrichtungen beispielsweise häufig unter der vereinfachenden Annahme einer konstanten Wärmestromdichte auf der Basis weniger experimenteller Daten ausgelegt. Dies kann zu einer Überdimensionierung der Sicherheitseinrichtungen und damit zu einer Erhöhung der Anschaffungskosten und des Platzbedarfs führen. Bei Sicherheitsventilen droht zudem instabiles Ventilverhalten mit reduzierter Abblasekapazität. Die physikalischen Mechanismen und die Prozessdynamik bei Störungen wurden bisher nicht vollständig analysiert. Da sich besonders der Wärmeübergang nicht rein analytisch modellieren lässt, sind in einem dynamischen Modell erhebliche Vereinfachungen erforderlich, die durch Experimente parametrisiert und validiert werden müssen.

In der vorgestellten Arbeit wurden die Abläufe bei Zusammenbruch des Isoliervakuum in Flüssighelium-Kryostaten untersucht, um die Zuverlässigkeit und Effizienz von Sicherheitseinrichtungen in der Kryotechnik zu verbessern. Wichtigstes Ergebnis ist der kryotechnische Sicherheitsversuchsstand PICARD, der geplant, aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen wurde. Mit einem Fassungsvermögen von 100 L kryogener Flüssigkeit, einem maximalen Arbeitsdruck von 16 bar(g) und der Möglichkeit, Helium-Abblasemassenströme von bis zu 4 kg/s zu messen, ermöglicht der Versuchsstand die systematische Untersuchung von Störungen in Kryostaten unter realistischen Bedingungen. Dazu wurde eine experimentelle Methode zur Messung der relevanten Pro-

zessparameter mit ausreichend geringer Messunsicherheit entwickelt. Die Methode verwendet 31 Sensoren und ein Datenerfassungssystem mit Abtastraten von bis zu 1 kHz, um Prozessdynamik, Temperaturgradienten und thermodynamische Ungleichgewichte zu berücksichtigen.

Zum Projekt gehörte eine erste Reihe von Experimenten im Rahmen einer eigens etablierten Kollaboration zwischen KIT und CERN. Das Isoliervakuum wurde mit Luft oder gasförmigem Stickstoff geflutet, wobei Belüftungsdurchmesser, Füllstand und Einstelldruck des Sicherheitsventils variiert wurden, um die Auswirkungen auf die Wärmestromdichte und damit auf die Prozessdynamik zu untersuchen. Die Ergebnisse der Versuche zeigen hohe Überdrücke im System während des instabilen Ventilhaltens. Außerdem lassen die experimentellen Daten auf hochdynamische Wärmestromdichten mit geringen Werten in dem für die Auslegung von Sicherheitsventilen relevanten Bereich schließen. Demnach sind kleinere Ventile mit zuverlässigerer Funktion erforderlich.

Die experimentellen Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer Modellierung der Prozessdynamik. Ein zuvor entwickeltes dynamisches Modell wurde auf der Basis der experimentellen Daten deutlich verfeinert, besonders was den Wärme- und Stoffübergang betrifft. Dadurch ließen sich sowohl der Kurvenverlauf als auch die Absolutwerte der Messergebnisse bei Zusammenbruch des Isoliervakuum mit guter Genauigkeit für ganz unterschiedliche experimentelle Bedingungen reproduzieren. Das verfeinerte Modell stellt daher gegenüber dem bisherigen Stand der Technik eine signifikante Verbesserung dar und besitzt großes Potenzial für weitere Verallgemeinerungen auf der Basis von zusätzlichen experimentellen Daten. Somit ist das Modell ein erster wichtiger Schritt zu einem umfassenden dynamischen Modell für die Auslegung von Sicherheitseinrichtungen in der Kryotechnik, auch vor dem Hintergrund der fortlaufenden deutschen und europäischen Normungsarbeit in diesem Bereich.

# Lehre und Bildung

## Vorlesungen, Seminare und Workshops

### Vorlesungen

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
**Supraleitende Systeme der Energietechnik** (Holzapfel)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Supraleitende Materialien** (Holzapfel) WS 17/18, WS 18/19  
**Energy Storage and Network Integration** (Noe)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Übungen zu Energy Storage and Network Integration**  
 (Noe, Kottonau) WS 17/18, WS 18/19  
**Projekt Management für Ingenieure** (Noe, Day) SS 18  
**Grundlagen und Technologie supraleitender Magnete**  
 (Holzapfel) SS 18  
**Superconducting Materials for Energy Applications**  
 (Grilli) SS 18

KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik  
**Vakuumtechnik** (Day) WS 17/18, WS 18/19  
**Übung zu Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 17/18, WS 18/19  
**Kältetechnik A** (Grohmann) WS 17/18, WS 18/19  
**Übungen zu Kältetechnik A** (Grohmann, Mitarbeiter)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Cryogenic Engineering** (Grohmann) WS 17/18, WS 18/19  
**Cryogenic Engineering -Exercises** (Grohmann, Mitarbeiter)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Physical Foundations of Cryogenics** (Grohmann)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Physical Foundations of Cryogenics -Exercises**  
 (Grohmann) SS 18  
**Kältetechnik B** (Grohmann) SS 18  
**Übungen zu Kältetechnik B** (Grohmann, Mitarbeiter) SS 18

KIT-Fakultät Maschinenbau  
**Fusionstechnologie A** (Bornschein, Day, Demange, Fietz, Frances, Weiss) WS 17/18, WS 18/19  
**Fusionstechnologiekolloquium\*** (Noe) SS 18  
**Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren** (Fietz, Weiss)  
 SS 18  
**Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf**  
 (Bornschein, Day, Frances) SS 18

KIT-Fakultät Physik  
**Hauptseminar Astroteilchenphysik: Neutrinos und dunkle Materie**  
 (GröBle)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Messmethoden und Techniken in der Experimentalphysik**  
 (Bornschein, Priester) SS 18

House of Competence  
**„Wissenschaftliches Schreiben und Präsentieren ...“ mit inhaltlich-konzeptioneller Beteiligung von Dr. B. Bornschein** SS 18

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau  
**Thermodynamik 1 für Maschinenbauer** (Neumann)  
 WS 17/18, WS 18/19  
**Thermodynamik 2 für Maschinenbauer** (Neumann) SS 18  
**Arbeitssicherheit und Umweltschutz** (Bauer) SS 18

\* Organisation mit ITEP Beteiligung

# Lehre und Bildung

## Doktorarbeiten – Masterarbeiten – Bachelorarbeiten

### Betreute Doktorarbeiten 2018

(\* akademischer Betreuer; \*\* abgeschlossen)

#### Kai Ackermann (SUPRA)

Präparation und Charakterisierung supraleitender Joints REBCO-basierter Bandleiter

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)\*

#### Rodrigo Antunes (TLK)

Experimental and numerical study on advanced inorganic membranes for tritium processes and qualification for tritium recovery in the breeding blanket

Betreuer: Dr. L. Frances, Prof. Dr. Margarida Cruz (Universität Lissabon)\*

#### Stefan Biser (SUPRA)

Entwicklung eines Tools zur analytischen Auslegung und Optimierung hybrid-elektrischer Luftfahrtantriebe

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Alexander Buchholz (SUPRA)

Prospective Life Cycle Analysis of high temperature superconductor tapes for future grid applications

Betreuer: Dr. M. Weil (ITAS), Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

#### Carl Bühler (SUPRA)

Neue RRP Leiterkonzepte für verbessertes Pinning durch interne Oxidation

Betreuer: Dr. S. Kauffmann-Weiss, Prof. M. Heilmaier (MACH)\*

#### Matthias Corduan (SUPRA)

Design, Konstruktion und Test einer rotierenden elektrischen Maschine basierend auf supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid (MgB<sub>2</sub>)

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Doppelbauer (KIT-ETIT), Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

#### Ester Diaz-Alvarez (TLK)

Tritium extraction from liquid breeding blanket based on the vacuum sieve tray technique

Betreuer: Dr. L. Frances, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

#### Wolfram Freitag (SUPRA)

Optimierung eines kontinuierlichen Prozesses zur Herstellung REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>-basierter supraleitender Bandleiter aus chemischen Präkursorenlösungen

Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr.-Ing. J. Sauer (IKFT)\*

#### Cristian Gleason-González (VAKUUM)

Modelling of rarefied neutral gas flow

Betreuer: Dr. S. Varoutis, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

#### David Gomse (KRYO)

Entwicklung eines Wärmeübertragers für MRC-Cryocooler

Betreuer: Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)\*

#### Lukas Grünewald (SUPRA)

Elektronenmikroskopische Untersuchung von eisen- und kupferbasierten Hochtemperatursupraleitern

Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr. D. Gerthsen (LEM)\*

#### Roland Gyuráki (SUPRA)

Investigation of quench dynamics in high-temperature superconductor tapes and assemblies

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Frédéric Sirois (École Polytechnique, Montréal, Canada), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Theresa Hanemann (FUSION)

Deformation Mechanisms in FCC and BCC High Entropy Alloys under various Conditions

Betreuer: Dr. K. Weiss, Prof. Dr.-Ing. M. Heilmaier (KIT, Mach)\*

#### Yannick Hörstensmeyer (VAKUUM)

Ein Prozess-Simulator zur Auslegung, Modellierung und Optimierung des inneren Brennstoffkreislaufs eines Fusionskraftwerks

Betreuer: Dr.-Ing. C. Day, Prof. Dr.-Ing. R. Stieglitz (INR)\*

#### Harald Itschner (SUPRA)

Entwicklung von Modellen zur speichergestützten Versorgung von Inselnetzen mit erneuerbaren Energien

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. K. Glöser (Hochschule Kaiserslautern), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Shahab Karrari (SUPRA)

Integration von Energiespeichern in Elektroenergiesysteme

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Bennet Krasch (TLK)

Spektroskopische Untersuchungen zu intermolekularen Effekten in der WGTS

Betreuer: Dr. R. Gröbke, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

#### Philip Kreideweis (SUPRA)

Entwicklung von Niederspannungsschaltanlagen

Betreuer: Dr. J. Geisbüsch, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Marco Langer (SUPRA)

Dünne Schichten pniktid-basierter Supraleiter für Detektoranwendungen

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)\*

#### Sven Meyer (SUPRA)

Elektrische Transporteigenschaften epitaktischer Fe-basierter Supraleiterdünnschichten

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)\*

**Sebastian Mirz (TLK)**

Untersuchung der Molekularen Effekte in allen sechs flüssigen Wasserstoffisotopologen mithilfe Infrarot- und Raman-spektroskopischer Methoden  
Betreuer: Dr. B. Bornschein, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

**Cyra Neugebauer (VAKUUM)**

Validation of a process for semi-continuous separation of hydrogen isotopes  
Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

**Simon Niemes (TLK)**

The TRIHYDE-Experiment: calibration grade gas samples of all six hydrogen isotopes in thermal equilibrium  
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT), Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

**Simon Otten (SUPRA)**

HTS Roebel cables with thermal and mechanical stabilizations  
Betreuer: Dr. W. Goldacker, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Benedikt Peters (VAKUUM)**

Entwicklung einer Metallfolienpumpe  
Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

**Ruslan Popov (SUPRA)**

Stromtragfähigkeit und Pinningeigenschaften RE BCO-basierter Dünnschichten und Bandleiter bei tiefen Temperaturen und in hohen Magnetfeldern  
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)\*

**Alan Preuß (FUSION)**

Development of high temperature superconductor (HTS) REBCO cables for large current applications  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Nicolo Riva (SUPRA)**

Quench behavior of high-temperature superconductor tapes for power applications: a strategy toward resilience  
Betreuer: Dr. F. Grilli, Dr. B. Dutoit (EPFL, Lausanne)\*

**Eugen Shabagin (KRYO)**

Entwicklung einer 10 kA HTS-Stromzuführung mit kryogenem Gemischkältekreislauf  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Fabian Schreiner (SUPRA)**

Aufbau eines supraleitenden DC Windkraftgenerators und Untersuchung der Netzanbindung  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Christina Weber (KRYO)**

Experimentelle Untersuchung und Modellentwicklung zum Einfluss der Zweiphasenströmung auf die Funktionsweise von Sicherheitseinrichtungen von Flüssighelium-Kryostaten  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt (CIW), Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (CIW)\*

**Friedrich Wiegel (SUPRA)**

Realisierung und Untersuchung der Bitübertragungsschicht unabhängiger Meshnetzwerke für Smart Grid Anwendungen  
Betreuer: Prof. Dr. V. Hagenmeyer (IAI), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Betreute Masterarbeiten in 2018**

(\* akademischer Betreuer; \*\* abgeschlossen)

**Max Aker\*\***

Materialstudien zur Unterdrückung des Tritiummemoryeffekts in BIXS Analytiksystemen  
Betreuer: Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik), Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Paul Blanchier\*\***

Thermal-hydraulic Analysis of an HTS conductor made of HTS Crocos for the European Demonstration Reactor (DEMO)  
Betreuer: Dr. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

**Stefanie Blust\*\***

Material characterization and transient 1D-Modelling of an absorption-based separation process  
Betreuer: Dr.-Ing. C. Day, Prof. Dr. Ing Sauer (IKFT)\*

**Joao Cordeiro**

Investigation of the delamination of (RE)BaCuO high-temperature superconductor tapes subjected to mechanical stress  
Betreuer: Dr. F. Grilli, Prof. Assoc. P. Branco (Instituto Superior Técnico, Lissabon)\*

**Federica de Silvestri**

Investigation of the Magnetic Levitation between HTS Bulks and permanent Magnets  
Betreuer: Dr. F. Grilli, Prof. Dr. A. Morandi (University of Bologna)\*

**Felix Kaiser\*\***

Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines supraleitenden induktiven Strombegrenzers für Power-Hardware-in-the-Loop-Untersuchungen  
Betreuer: Dr. J. Geisbüsch, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

**Yannik Kathage\*\***

Commissioning of the new HERMES setup and first experiments on superpermeation using a collisional plasma source  
Betreuer: B. Peters, Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)\*

**Dustin Kottonau\*\***

Untersuchung der Machbarkeit eines dreiphasigen CroCo-Leitersystems für supraleitende Energiekabel  
Betreuer: Dr.-Ing. J. Stammen (Uni Duisburg, Essen), Prof. Dr.-Ing. H. Hirsch (Uni Duisburg, Essen)\*

**Johannes Müller\*\***

High-resolution spectroscopy of tritiated water and analysis of the 2n1-Bande von HTO  
Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. J. Orphal (KIT, IMK-ASF)\*

**Mauro Naffarate**

Investigation of power grid topologies for a superconducting offshore DC wind turbine  
Betreuer: F. Schreiner, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

**Daniel Nickel**

Mechanische und elektromechanische Untersuchungen an HTS CroCo-Triplett-Leiterverbänden  
Betreuer: Dr. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

**Tiago Pomella Lobo\*\***

A quasi-2d model to simulate Thermodynamics and Kinetics of Hydrogen Isotopes Dissolution in Pb-Li and Steel

Betreuer: Dr. L. Frances, Prof. Dr. N.J. Lopes Cardozo (Technische Universität Eindhoven)\*

**Sabrina Schirle**

Experimentelle Untersuchung des Vakuumzusammenbruchs in Helium-Kryostaten mit Superisolation

Betreuer: C. Weber, Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (ITTK)\*

**Jonas Schwenzler**

Basic characterization of a mercury based mass transfer process for lithium isotope separation

Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

**Arne Smolinski\*\***

Experimentelle Charakterisierung des Katalysevorganges von ortho/para-Katalysatoren für Wasserstoff und Deuterium

Betreuer: B. Krasch, Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)\*

**Sonja Schneidewind**

Investigation of tritium loading of thin metal layers

Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

**Oliver Süß\*\***

Modellierung der Aktivität und Effizienz von ortho/para-Katalysatoren für Wasserstoff und Deuterium

Betreuer: B. Krasch, Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)\*

**Michael Wolter\*\***

Staatsexamensarbeit: Entwicklung des Experimentieraufbaus „Elektrische Eigenschaften von Supraleitern“ im KIT-Schülerlabor Energie

Betreuer: Frau A. Rimikis, Prof. B. Holzapfel

### Betreute Bachelorarbeiten in 2018 (\* akademischer Betreuer; \*\* abgeschlossen)

**Julian Blaschtschak\*\***

Entwicklung von Methoden zur Beladung von Tritium in Metallische Magentische Kalorimeter für die Suche nach Sterilen Neutrinos

Betreuer: M. Schlösser, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

**Alexander Böhmländer\*\***

Experimental investigation of isotopic effects on the mass-transport of hydrogen through zeolite-ceramic membranes

Betreuer: Dr. L. Frances, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Lucian Fasselt**

H2D2 Kalibrierung des Laser Raman Systems mit Trihydrid

Betreuer: S. Niemes, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

**Leonhard Hasselmann**

Beladungstest von Metalloberflächen mit Tritium

Betreuer: M. Schlösser, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

**Daniel Hauck\*\***

Study of the oxygen diffusion process in REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> and REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>nanocomposite films by in-situ electrical conductivity relaxation

Betreuer: Dr. P. Cayado, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Edward Hermann**

Didaktische Entwicklung der Experimentierstation Kernfusion am KIT-Schülerlabor Energie

Betreuer: A. Rimikis, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Sebastian Hetzler**

Kryogene mechanische Eigenschaften von 316L, hergestellt mittels Selektivem Laserschmelzens

Betreuer: Dr. J. Sas, Prof. M. Heilmaier (IAM)\*\*

**Denis Kobsar\*\***

Induktive Tc-Messung von Fe-basierten Supraleitern

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel \*

**Daniel Kuntz\*\***

Modifizieren des Boilers einer Diffusionsvakuumpumpe für den Betrieb mit Quecksilber und Tritium

Betreuer: Dr. T. Giegerich, Prof. Dr.-Ing. G. Engelken (Hochschule Rhein Main)\*

**Svenja Müller**

Aufbau und Inbetriebnahme eines kombinierten Raman- und IR-Spektroskopie-Aufbaus

Betreuer: B. Krasch, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Kevin Raczka\*\***

Untersuchungen zu Peltier Stromzuführungen für Anwendungen der Supraleitung

Betreuer: E. Shabagin, Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (ITTK)\*

**Johannes Reinking**

Fouriertransformationsspektroskopie mit tritiiertem Wasser

Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. J. Orphal (KIT, IMK-ASF)\*

**Sebastian Sakmann**

TG-DSC Analyse der Pyrolyse beim TFA-MOD Prozess zur Optimierung supraleitender REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> Dünnschichten

Betreuer: W. Freitag, Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer (IKFT)\*

**Schorstädt Sebastian**

In-situ-Ausscheidung von Nanopartikeln in REBCO-Dünnschichten zur Verbesserung der kritischen Stromdichte

Betreuer: W. Freitag, Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer (IKFT)\*

**Sebastian Vetter**

Simulationen bei BIXS

Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)

# Lehre und Bildung

## Fach- und Gastvorträge

- |            |   |            |  |
|------------|---|------------|--|
| 26.01.2018 | Auslegung, Aufbau und Test eines supra-<br>leitenden Strombegrenzers für Power-<br>Hardware-in-the-Loop-Untersuchungen<br>Felix Kaiser<br>Fachvortrag, Masterarbeit, IB SUPRA | 30.10.2018 | Inbetriebnahme der neuen HERMES An-<br>lage und erste Superpermeations-Experi-<br>mente unter Nutzung eines kollisionalen<br>Plasmas<br>Yannick Kathage<br>Fachvortrag (D), Masterarbeit, IB Vakuum-<br>technik                      |
| 17.05.2018 | Thermal-hydraulic analysis of an HTS con-<br>ductor made of HTS Cro-Cos for the Euro-<br>pean Demonstration Reactor<br>Paul Blanchier<br>Fachvortrag, Masterarbeit, IB Fusion | 09.11.2018 | Cryogenic system for SHINE project<br>Prof. Zhengrong Ouyang<br>High Magnetic Field Laboratory, CAS<br>Eingeladen durch Dr. Holger Neumann   |
| 05.06.2018 | Entwicklung des Experimentieraufbaus<br>Elektrische Eigenschaften von Supraleitern<br>Michael Wolter<br>Verwaltung, Schülerlabor  | 15.11.2018 | Introduction to his Hydrogen Isotope Re-<br>search Center and durability of tritium<br>storage materials and tritium analytics by<br>BIXS<br>Prof. Masanori Hara<br>Kooperation mit Uni Toyama,<br>Eingeladen durch Dr. Marco Röllig |
| 24.07.2018 | Hochtemperatur-Supraleiter für künftige<br>Fusionsmagnete und industrielle Hoch-<br>strom-Anwendungen<br>Michael Wolf<br>Fachvortrag, IB Fusionsmagnete (Fietz)               | 30.11.2018 | Materialcharakterisierung und transiente<br>1D-Modellierung eines absorptionsbasier-<br>ten Separationsprozesses<br>Stefanie Blust<br>Fachvortrag, Masterarbeit<br>IB Vakuumtechnik  |
| 26.07.2018 | Study of the Oxygen Diffusion Process in<br>REBCO Films by Electrical Conductivity Re-<br>laxation<br>Daniel Hauck<br>Fachvortrag Bachelorarbeit                              |            |  |

# Zahlen und Daten

## Organigramm

Supraleiter- und Kryo-Materialien (Holzapfel)	Energetische Anwendungen (Noe)*	Supraleitende Magnettechnologie (Fietz)	Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs (Day)	Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen (Bornschein)
Supraleitende Materialien Hänisch	Supraleitende Netzkomponenten Kudymow*	Spulentechnologie Hornung*	Vakuumtechnologie und Prozessintegration Day	Tritiumanlagen und -prozessierung Welte
Kryo-Strukturmaterialien Weiss	Neue Anwendungen der Supraleitung Schlachter*	HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen Fietz	Tritiumextraktion und -rückgewinnung Frances	Tritium- und Wasserstoffanalytik Röllig
Kryogene Stoffeigenschaften Grohmann	Modellierung von Supraleitern und Komponenten Grilli	Rotierende Maschinen Liu*	Strömung verdünnter Gase Varoutis	Physik der Wasserstoffisotopologen Größe
Leitertechnologien Wolf*	Echtzeit Systemintegration Geisbüsch	Industrieanwendungen Kläser	Vakuumhydraulik Giegerich	Suche nach neuer Physik Schlösser

\* Änderung gegenüber 2017

## Personalstand (30.11.2018)

<b>Gesamt</b>	<b>203</b>	<b>zusätzlich, während 2018:</b>	
Akademiker	66	Gäste	18
Ingenieure und Techniker	60		
Sonstige	21	Praktikanten	5
Doktoranden	24	Studentische Hilfskräfte	38
Master/Diplom	17		
DH-Studenten	9	Studien-, Bachelorarbeiten	15
Auszubildende	6		
Trainees	0		

# Zahlen und Daten

## Personalveränderungen

**Ausgeschieden**  
(ohne Praktikanten, Gäste und  
studentische Hilfskräfte)

**Purr Bianca**

**Haag Jennifer**

**Jansen Rica**

**Jüngert Maximilian**

**Kluge Matthias**

**Off Andreas**

**Specht Eugen**

**Wetzel Dietmar**

**Baumgärtner Nico**

**Sun Jiuce**

**Gruber Armin**

**Hellmann Sebastian**

**Westenfelder Sascha**

**Bükki-Deme Andras**

**Hollik Markus**

**Smolinski Arne**

**Bauer Tamara**

**Munoz Ovalle Alejandro**

**Kario Anna**

**Coenen Pascal**

**Wagner-Nagy Paul-Karl**

# Zahlen und Daten

## Studentische Hilfskräfte

Aker Max

Altenbrand Florian

Barthlott Dominic

Bens Evelyn

Bobien Johanna

Böhmländer Alexander

Bühler Carl

Chetan Martin

Diel Felix

Dritschler Lukas

Feifel Tobias

Frank Marius

Groß Michael

Hahl Felix

Holzhäuser Till

Hörmann Florian

Immel Fabian

Kern Johannes

Klenk Rafael

Korrmann Linda

Kraus Alexander

Masuch Paul

Meinzer Martin

Miller Judith

Müller Felicitas

Neu Marc

Pham Quoc

Rau Daniel

Reimer Max

Saad Daniel

Schlenga Alexander

Schulz Pia

Stellnberger Rainer

Stocklöw Maren

Weyrauch Mark

Zeller Genrich

Zhao Xiaodong

Ziegler Nicolas

# Zahlen und Daten

## Gastwissenschaftler

### Dipl.-Ing. U. Naumann

01.08.16–30.06.18 Bergische Universität, Wuppertal, BRD

### Dipl.-Phys.N. Haußmann

01.08.16–30.06.18 Bergische Universität, Wuppertal, BRD

### Prof. Dr. K. Helbing

01.08.16–30.06.18 Bergische Universität, Wuppertal, BRD

### Dr. Phil. S. Virginia Hickford

01.08.16–30.06.18 Bergische Universität, Wuppertal, BRD

### Dipl.-Physiker E. Ellinger

01.08.16–31.08.18 Bergische Universität, Wuppertal, BRD

### Dr. P. Chung-On Ranitzsch

24.10.16–31.12.19 Westfälische Wilhelms Universität, Münster, BRD

### Y. Lin

01.01.17–31.05.18 Thermal Engineering – Tongjo University, Shanghai, China

### E. Berrospe-Juárez

04.09.17–01.09.18 Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico-City

### S. Schubotz

03.07.17–31.08.18 Bergische Universität Wuppertal, BRD

### Dr. P. O'Brien

25.09.17–31.01.18 Queensland University of Technology, Brisbane, Australien

### M. Li

10.10.17–30.09.18 Shanghai University, China

### Dr. J. Ogawa

05.01.18–20.04.18, 28.08.18–03.04.19 Niigata University, Japan

### Dr. F. Trillaud

01.04.18–13.04.18 National Autonomous University of Mexico, Mexico City

### Dr. J. Cho

11.09.18–10.10.18 KERI – Korean Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

### S. Kunze

10.09.18–28.02.19 Universität Bremen, BRD

### Dr. F. Mackel

29.10.18–23.11.18 Max-Planck-Institut für Plasma-physik, Garching, BRD

### A. Vazquez-Cortes

05.11.18–14.12.18 CIEMAT, Madrid, Spanien

# Zahlen und Daten

## Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

### Christian Day

- Mitglied des Vorstandsrates der Dt. Vakuumgesellschaft (DVG).
- Stellv. Vorsitzender des Fachverbandes Vakuumphysik und -technik der Dt. Physikalischen Gesellschaft (DPG)
- Projektleitung des Bereichs Tritium-Materiezufuhr-Vakuum (TFV) im Europäischen Fusionsprogramm EUROFUSION
- Mitglied im Fusion For Energy – Technical Advisory Panel
- Sprecher Topic 'Vakuum und Tritium' der deutschen DEMO-Initiative
- Mitglied im International Advisory Committee der RGD (Rarefied Gas Dynamics Conference)
- Mitglied des Programmkomitees der ISFNT (international Symposium of Fusion Nuclear Technology).
- Chartered Engineer der American Vacuum Society (AVS).

### Walter H. Fietz

- Mitglied des "Eurofusion Scientific Technical Advisory Committee (STAC)"
- Mitglied des "International Organizing Committee of Symposium of Fusion Technology (SOFT) conference"
- Leiter der "Task Force Magnets" im KIT Programm Fusion
- IEEE Senior Member
- Mitglied des "IEEE Council of Superconductivity"
- Mitglied des KIT Senats

### Thomas Giegerich

- Vorsitzender des Fachverbandes Vakuumphysik und -technik der Dt. Physikalischen Gesellschaft (DPG).
- Vizepräsident der Dt. Vakuumgesellschaft (DVG).

### Jens Hänisch

- Mitglied des EMFL User Proposal Selection Committee
- Mitorganisator des Symposiums "Superconducting Materials: From Basic Science to Applications" beim Materials Research Society (MRS) Spring Meeting, Phoenix, USA, 3.-6.4.2018
- Mitorganisator des Symposiums "Functional Materials for Energy Applications" bei der Material Science and Engineering (MSE), Darmstadt, 26.-28.09.2018
- Mitglied des Programmkomitees "Materials" der Applied Superconductivity Conference (ASC), Seattle, USA, 28.10.-2.11.2018

### Reinhard Heller

- Applied Superconductivity Conference (ASC),
- Board member, Member of International Program Committee and Lead Editor
- Computation of Thermo-Hydraulic Transients in Superconductors (CHATS-AS), Board member
- DKE/DIN K 184 – Supraleiter
- International Electrotechnical Commission (IEC TC90) – Superconductivity – Member WG 12 – „Superconducting Power Devices – General Requirements for Characteristic Tests of Current Leads designed for Powering Superconducting Devices“

### Bernhard Holzapfel

- President of the European Society for Applied Superconductivity (ESAS)
- Applied Superconductivity Conference, Board member
- European Conference on Applied Superconductivity, Member of International Program Committee
- International Symposium on Superconductivity (ISS), Member of International Program Committee
- Mitglied im KIT-Lenkungskreis KATRIN

### Mathias Noe

- Kurator des Forschungsnetzwerkes Hochtemperatur-Supraleitung des BMWi
- Internationaler Experte der CIGRE D1 Arbeitsgruppe "Assessing emerging test guidelines for HTS applications in power systems"
- Internationaler Experte der CIGRE Arbeitsgruppe D1.64 "Cryogenic dielectric insulation"
- Mitglied der VDE ETG Task Force „Perspektiven der Übertragungstechnik“
- Sprecher des Helmholtz Programmes Speicher und vernetzte Infrastrukturen
- Mitglied des Managementboards des Forschungsbereiches Energie der Helmholtz Gemeinschaft
- Mitglied des Boards der European Society for Applied Superconductivity (ESAS)
- Koordinator des Joint Programs Energy Storage der European Energy Research Alliance (EERA)
- Deutscher Abgesandter der International Energy Agency, Technology Cooperation Programm Hochtemperatur-Supraleitung
- Mitglied des International Organizing and Scientific Program Committee of the International Conference on Magnet Technology
- Mitglied des Boards der Applied Superconductivity Conference
- Mitglied des International Program Committee der European Conference on Applied Superconductivity
- Programmleiter des Studiengangs Energy Engineering and Management der Hector School
- Mitglied des Interessenverbandes Supraleitung (ivsupra)

### Stylios Varoutis

- Mitglied im wissenschaftlichen Komitee der NEGF (European Conference on Non-equilibrium Gas Flows).
- Mitglied im Auswahlkomitee des EU High Performance Computers MARCONI
- Mitglied der Deutschen Vakuumgesellschaft (DVG)

### Klaus-Peter Weiss

- DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE Referat K 184 „Supraleiter“, Stellvertretender Obmann
- IEC International Electrotechnical Commission/Technical Committee 90 „Superconductivity“, Mitglied WG 2 „Critical current measurement of Nb-Ti composite superconductors“, WG 5 „Tensile test and electromechanical properties of composite superconductors“, WG 7 „Critical current measurement method of Nb<sub>3</sub>Sn composite superconductors“, WG 11 „Critical temperature measurement – Critical temperature of composite superconductors“, WG 13 „General characteristics for practical superconducting wires“
- Sprecher der Arbeitsgruppe „Magnet Design“ innerhalb der deutschen Koordination der Fusionsforschung für DEMO
- Member of the International Technical Program Committee - MEM18 9th Workshop on Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors

# Veröffentlichungen

## Fusion

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

R. Heller; N. Bagrets; W. H. Fietz; F. Gröner; A. Kienzler; C. Lange; M. J. Wolf  
Towards a 20 kA high temperature superconductor current lead module using REBCO tapes, *Supercond. Sci. Technol.* 31 (2018) 015021

R. Heller; W.H. Fietz; M. Heiduk; M. Hollik; A. Kienzler; C. Lange; R. Lietzow; I. Meyer; T. Richter; T. Vogel  
Overview of JT-60SA HTS current lead manufacture and testing, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 28(3) (2018) 4800105

V. Corato; T. Bagni; M.E. Biancolini; R. Bonifetto; P. Bruzzone; N. Bykovsky; D. Ciazynski; M. Coleman; A. della Corte; A. Dembkowska; A. Di Zenobio; M. Eisterer; W.H. Fietz; D. X. Fischer; E. Gaio; L. Giannini; F. Giorgetti; R. Heller; B. Lacroix; M. Lewandowska; A. Maistrello; L. Morici; L. Muzzi; A. Nijhuis; F. Nunio; A. Panin; X. Sarasola; L. Savoldi; K. Sedlak; B. Stepanov; G. Tomassetti; A. Torre; S. Turtù; D. Uglietti; R. Vallcorba; K.-P. Weiss; R. Wesche; M.J. Wolf; K. Yagotintsev; L. Zani; R. Zanino  
Progress in the Design of the Superconducting Magnets for the EU DEMO, *Fus. Eng. Des.* 136 Part B (2018) 1597-1604; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.05.065>

M. Lewandowska; A. Dembkowska; R. Heller; M.J. Wolf  
Thermal-hydraulic analysis of the HTS DEMO TF coil, *Cryogenics* 96 (2018) 125–132

### Buchaufsatz

Day, Christian  
Kenngrößen und Anwendungen von Kryopumpen, *Handbuch Vakuumtechnik*. Ed.: K. Jousten, 978-3-658-13385-6

Day, Christian  
Kryotechnik und Kryopumpen, *Handbuch Vakuumtechnik*. Ed.: K. Jousten, 978-3-658-13385-6

### Zeitschriftenbeiträge

\* Antunes, R.; Böhmländer, A.; Bükki-Deme, A.; Krasch, B.; Cruz, M.M.; Frances, L.  
Experimental investigation of the ideal selectivity of MFI-ZSM-5 zeolite-type membranes for a first evaluation of the separation of hydrogen isotopologues from helium [in press] *Separation and purification technology*, 1383-5866

\* Bagrets, Nadezda; Weiss, Klaus-Peter; Nast, Rainer; Heller, Reinhard  
Correlation Between Resistances of Face-to-Face Soldered Joints and Interface Resistance Between Layers in Superconducting Tapes, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

\* Bruzzone, Pierluigi; Fietz, Walter H.; Minervini, Joseph V.; Novikov, Mikhail; Yanagi, Nagato; Zhai, Yuhu; Zheng, Jinxing  
High temperature superconductors for fusion magnets *Nuclear fusion*, 0029-5515, 1741-4326

\* Federici, G.; Bachmann, C.; Barucca, L.; Biel, W.; Boccaccini, L.; Brown, R.; Bustreo, C.; Ciattaglia, S.; Cismondi, F.; Coleman, M.; Corato, V.; Day, C.; Diegele, E.; Fischer, U.; Franke, T.; Gliss, C.; Ibarra, A.; Kembleton, R.; Loving, A.; Maviglia, F.; Meszaros, B.; Pintsuk, G.; Taylor, N.; Tran, M.Q.; Vorpahl, C.; Wenninger, R.; You, J.H.  
DEMO design activity in Europe: Progress and updates *Fusion engineering and design*; 0920-3796

\* Frattolillo, Antonio; Baylor, Larry R.; Bombarda, Francesca; Combs, Stephen K.; Day, Christian; Lang, Peter T.; Migliori, Silvio; Pegourie, Bernard; Ploeckl, Bernhard  
Core Fueling of DEMO by Direct Line Injection of High-Speed Pellets From the HFS, *IEEE transactions on plasma science*, 0093-3813, 1939-9375

\* Garcinuno, B.; Rapisarda, D.; Antunes, R.; Utili, M.; Fernández-Bercheruelo, I.; Sanz, J.; Ibarra, A.  
The tritium extraction and removal system for the DCLL-DEMO fusion reactor, *Nuclear fusion*, 0029-5515, 1741-4326

\* Hauer, V.; Day, Chr.  
A preliminary assessment of the vacuum performance in the beamline during IFMIF-DONES operation, *Fusion engineering and design*, 0920-3796

\* Heller, R.; Fietz, W. H.; Gröner, F.; Heiduk, M.; Hollik, M.; Lange, C.; Lietzow, R.  
Test results of a 20 kA high temperature superconductor current lead using REBCO tapes, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668

\* Hernandez, Francisco A.; Arbeiter, Frederik; Boccaccini, Lorenzo V.; Bubelis, Evaldas; Chakin, Vladimir P.; Cristescu, Ion; Ghidersa, Bradut E.; Gonzalez, Maria; Hering, Wolfgang; Hernandez, Teresa; Jin, Xue Z.; Kamlah, Marc; Kiss, Bela; Knitter, Regina; Kolb, Matthias. H. H.; Kurinskiy, Petr; Leys, Oliver; Maione, Ivan A.; Moscardini, Marigrizia; Nadasi, Gabor; Neuberger, Heiko; Pireslavtsev, Pavel; Papeschi, Simone; Rolli, Rolf; Ruck, Sebastian; Spagnuolo, Gandolfo A.; Vladimirov, Pavel V. Zeile, Christian; Zhou, Guangming  
Overview of the HCPB research activities in EUROfusion, *IEEE transactions on plasma science*, 0093-3813, 1939-9375

- \* Hörstensmeyer, Yannick Nicolas; Butler, Barry; Day, Christian; Franza, Fabrizio  
Analysis of the EU-DEMO fuel cycle elements: Intrinsic impact of technology choices, Fusion engineering and design, 0920-3796
- \* Igitkhanov, Yuri; Day, Christian; Varoutis, Stylianos  
A New Concept for a Higher Burn-Up Fraction Improvement in DEMO Reactor, IEEE transactions on plasma science, 0093-3813, 1939-9375
- \* Luo, Xueli; Scannapiego, Matthieu; Day, Christian; Sakurai, Shinji  
Assessment of the JT-60SA divertor cryopump performance, Fusion engineering and design, 0920-3796
- \* Peters, B.J.; Hanke, S.; Day, C.  
Metal Foil Pump performance aspects in view of the implementation of Direct Internal Recycling for future fusion fuel cycles, Fusion engineering and design, 0920-3796
- Sas, J.; Weiss, K.P.; Podany, Pavel  
Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 825 alloy at cryogenic temperatures, Transactions of the American Nuclear Society, 0003-018X, 0003-018x
- \* Sentkerestiová, J.; Dragoun, O.; Lebeda, O.; Ryšavý, M.; Sturm, M.; Vénos, D.  
Gaseous Kr-83m generator for KATRIN, Journal of Instrumentation, 1748-0221
- \* Tirunilai, Aditya Srinivasan; Sas, Jan; Weiss, Klaus-Peter; Chen, Hans; Szabó, Dorothee Vinga; Schlabach, Sabine; Haas, Sebastian; Geissler, David; Freudenberger, Jens; Heilmaier, Martin; Kauffmann, Alexander  
Peculiarities of deformation of CoCrFeMnNi at cryogenic temperatures, Journal of materials research, 0884-2914, 2044-5326
- \* Varoutis, Stylianos; Igitkhanov, Yuri; Day, Christian; Strobel, Holger; Wenninger, Ronald  
Effect of neutral leaks on pumping efficiency in 3D DEMO divertor configuration, Fusion engineering and design, 0920-3796
- \* Wolf, Michael J.; Bagrets, Nadezda; Fietz, Walter H.; Lange, Christian; Weiss, Klaus-Peter  
Critical Current Densities of 482 A/mm<sup>2</sup> in HTS CrossConductors at 4.2 K and 12 T, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- \* Zappatore, A.; Heller, Reinhard; Savoldi, L.; Zanino, R.  
Assessment of the performance of a 20 kA REBCO current lead, Cryogenics, 0011-2275
- Day, Christian; Butler, Barry; Federici, G.; Giegerich, Thomas; Ploeckl, Bernhard  
The DEMO fuel cycle – innovative technologies for tritium inventory reduction
- Day, Christian; Butler, Barry; Giegerich, Thomas; Ploeckl, Bernhard  
A smart architecture for the fuel cycle of a fusion power plant
- Fietz, Walter H.  
Superconducting magnets for fusion
- Fietz, Walter H.; Wolf, Michael J.; Preuss, Alan; Heller, Reinhard; Bagrets, Nadezda; Urbach, Elisabeth; Weiss, Klaus-Peter  
High temperature superconductors for future fusion power plants
- Heller, Reinhard; Fietz, Walter H.; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.  
The HTS CrossConductor as a potential candidate for a fusion magnet
- Hohe, Jörg; Fliegner, Sascha; Weiss, Klaus-Peter; Appel, Simon  
Verification of failure criteria for CFRP composites under cryogenic thermo-mechanical loading
- Luo, X.; Day, Christian  
Monte Carlo simulation of a dynamic sieve system
- Maviglia, F.; Federici, G.; Siccinio, M.; Albanese, R.; Ambrosino, R.; Bachmann, C.; Barrett, T.; Mattei, M.; Ricci, D.; Granucci, G.; Day, Christian  
Overview of DEMO technology and scenario design activities in Europe
- Murari, Andrea; Bekris, N.; Figueiredo, J.; Kim, H.T.; Perez vonThun, C.; Balboa, I.; Batistoni, P.; Giegerich, T.; Huddleston, T.; Rubel, M.; Vila, R.; Villari, R.; Widdowson, A.; JET Contributors  
Implementation and exploitation of JET enhancements in preparation for DT operation and next step devices
- Ochoa Guamán, Santiago; Giegerich, Thomas; Dahlke, Christian; Day, Christian  
Performance prediction approaches for liquid vacuum pumps with mercury as working fluid
- Sas, Jan; Weiss, Klaus-Peter; Diego, Manfredi; Calignano, Flaviana; Bidulsky, Robert; Kvackaj, Tibor; Grande, Marco Actis  
Evolution of microstructure and mechanical properties at cryogenic temperatures of 316L processed by powder bed fusion
- Varoutis, S.; Igitkhanov, Y.; Day, Chr.  
Assessment of the 3D geometrical effects on the DEMO divertor pumping efficiency
- Weiss, Klaus-Peter; Bagrets, Nadezda; Fietz, Walter H.; Heller, Reinhard; Sas, Jan; Vogel, Thomas; Wolf, Michael J.  
Mechanical stability of HTS CroCos and structure material boundaries
- Day, Chr.; Federici, G.; Butler, B.; Giegerich, Th.; Hörstensmeyer, Y.; Ploeckl, B.  
The DEMO fuel cycle – novel technologies for tritium inventory reduction

## Vortrag

Aker, Max

Materialstudien zur Unterdrückung des Tritiummemorieeffekts in BIXS Analytiksystemen

Day, Chr.; Federici, G.; Butler, B.; Giegerich, Th.; Hörstensmeyer, Y.; Ploeckl, B.

The DEMO fuel cycle – novel technologies for tritium inventory reduction

Wolf, Michael J.; Fietz, Walter H.; Hänisch, Jens; Jung, Alexandra; Kauffmann-Weiss, Sandra; Lao, Mayraluna; Quoc Hung Pham; Weiss, Klaus-Peter  
Mechanical and Electromechanical Properties of REBCO Tapes of Different Manufacturers for Use in HTS High-Current Conductors

Wolf, M.J.; Bagrets, N.; Fietz, W.H.; Heller, R.; Preuß, A.; Vogel, T.; Weiss, K.P.  
Status of a Conceptual HTS TF-Coil Design and Progress on HTS CrossConductor Fabrication

Wolf, M.J.; Preuss, A.; Heller, R.; Lange, C.; Heiduk, M.; Bagrets, N.; Weiss, K.P.; Fietz, W.H.  
High Temperature Superconductors for Future Fusion Magnets and Industrial High Current Applications

Zappatore, Andrea; Fietz, Walter H.; Heller, Reinhard Savoldi, Laura; Wolf, Michael J.; Zanino, Roberto  
A critical assessment of the issues in the thermal modeling of an HTS CroCo conductor for the EU DEMO TF coils

Zappatore, Andrea; Fietz, Walter H.; Heller, Reinhard; Savoldi, Laura; Wolf, Michael J.; Zanino, Roberto  
A quasi-3D thermal-hydraulic model for an HTS CroCo conductor

## Veröffentlichungen

### Speicher und vernetzte Infrastrukturen (SCI)

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

#### Zeitschriftenbeiträge

\* Liu, Yingzhen; Ou, Jing; Grilli, Francesco; Schreiner, Fabian; Zermeno, Victor Manuel Rodriguez; Zhang, Min; Noe, Mathias, Comparison of 2D simulation models to estimate the critical current of a coated superconducting coil Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

\*Wang, Yawei; Zhang, Min; Grilli, Francesco; Zhu, Zixuan; Yuan, Weijia, Study of the magnetization loss of CORC cables using 3D T-A formulation, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

\* Berrospe-Juarez, Edgar; Zermeño, Víctor M.R.; Trillaud, Frederic; Grilli, Francesco  
Iterative multi-scale method for estimation of hysteresis losses and current density in large-scale HTS systems, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

\* Berrospe-Juarez, E.; Zermeño, V. M. R.; Trillaud, F.; Gavrilin, A. V.; Grilli, F.; Abraimov, D. V.; Hilton, D. K.; Weijers, H. W.  
Estimation of Losses in the (RE)BCO Two-Coil Insert of the NHMFL 32 T All-Superconducting Magnet, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

\* Brambilla, Roberto; Grilli, Francesco; Martini, Luciano; Bocchi, Marco  
Angeli, Giuliano, A Finite-Element Method Framework for Modeling Rotating Machines With Superconducting Windings, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

\* Cayado, Pablo; Erbe, Manuela; Kauffmann-Weiss, Sandra; Jung, Alexandra; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard  
Chemical solution deposition of  $Y_{1-x}Gd_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -BaHfO<sub>3</sub> nanocomposite films: combined influence of nanoparticles and rare-earth mixing on growth conditions and transport properties, RSC Advances, 2046-2069

\* de Sousa, Wesley T. B.; Kottonau, Dustin; Bock, Joachim; Noe, Mathias  
Investigation of a Concentric Three-Phase HTS Cable Connected to an SFCL Device, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

\* Elschner, Steffen; Brand, Joerg; Goldacker, Wilfried; Hollik, Markus; Kudymow, Andrej; Strauss, Severin; Zermeno, Victor M. R.; Hanebeck, Claus; Huwer, Stefan; Reiser, Wolfgang; Noe, Mathias  
3S: Superconducting DC-Busbar for High Current Applications, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

Fink, Stefan

Electrostatic Field Calculations for Liquid Nitrogen Gaps Assuming a Decisive Field Factor, *International Journal of Applied Power Engineering*, 2252-8792

\* Fournier-Lupien, Jean-Hughes; Lacroix, C; Hellmann, Sebastian; Huh, J; Pfeiffer, K

Sirois, F Use of the buffer layers as a current flow diverter in 2G HTS coated conductors, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668

\* Gomse, D.; Kochenburger, T. M.; Grohmann, S. Modeling of Two-Phase Heat Exchangers With Zeotropic Fluid Mixtures, *Journal of heat transfer*, 0022-1481, 1528-8943

\* Grilli, Francesco; Kapolka, M.; Zou, S.; Zermeno, V. M. R.; Morandi, A.; Ribani, P. L.; Pardo, E. Three-Dimensional Modeling of the Magnetization of Superconducting Rectangular-Based Bulks and Tape Stacks, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

\* Grilli, Francesco; Morandi, Antonio; De Silvestri, Federica; Brambilla, Roberto  
Dynamic modeling of levitation of a superconducting bulk by coupled H-magnetic field and arbitrary Lagrangian-Eulerian formulations, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668

\* Gyuráki, Roland; Sirois, Frédéric; Grilli, Francesco  
High-speed fluorescent thermal imaging of quench propagation in high temperature superconductor tapes, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668

\* Hanft, D.; Glosse, P.; Denneler, S.; Berthold, T.; Oomen, M.; Kauffmann-Weiss, S.; Weis, F.; Häbler, W.; Holzappel, B.; Moos, R.  
The Aerosol Deposition Method: A modified aerosol generation unit to improve coating quality, *Materials*, 1996-1944

\* Hänisch, J.; Iida, K.; Ohmura, T.; Matsumoto, T.; Hatanoto, T.; Langer, M.; Kauffmann-Weiss, S.; Ikuta, H.; Holzappel, B.  
Vortex glass-liquid transition and activated flux motion in an epitaxial, superconducting NdFeAs(O,F) thin film [in press], *MRS communications*, 2159-6859, 2159-6867

\* Häbler, W.; Scheiter, J.; Hädrich, P.; Kauffmann-Weiß, S.; Holzappel, B.; Oomen, M.; Nielsch, K.  
Properties of ex-situ MgB<sub>2</sub> bulk samples prepared by uniaxial hot pressing and spark plasma sintering, *Physica / C*, 0921-4534, 1873-2143

\* Iida, K.; Hänisch, J.; Tarantini, C.  
Fe-based superconducting thin films on metallic substrates: Growth, characteristics, and relevant properties, *Applied physics reviews*, 0003-6951, 1931-9401

\* Insinga, Andrea R.; Sundaram, Aarthi; Hazelton, Drew W.; Zermeno, Victor M. Rodriguez; Abrahamsen, Asger Bech; Opata, Yuri Aparecido; Grivel, Jean-Claude; Lundeman, Jesper Holm; Ryming, Alexander Engels; Schweer-Gori, Frederik; Wulff, Anders Christian  
Two Level Undercut-Profile Substrate-Based Filamentary Coated Conductors Produced Using Metal Organic Chemical Vapor Deposition, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

\* Koenen, Timo; Undisz, Andreas; Otten, Simon; Rettenmayer, Markus  
Stainless Steel as Substrate Material for High Temperature Superconducting Tapes Processed via the ISD MgO Route [in press], *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

\* Kunniyoor, Keerthi Raj; Richter, Thomas; Ghosh, Parthasarathi; Lietzow, Ralph; Schlachter, Sonja; Neumann, Holger  
Experimental Study on Superconducting Level Sensors in Liquid Helium, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

\* Liu, Yingzhen; Noe, Mathias; Ou, Jing; Breining, Patrick; Veigel, Marc; Doppelbauer, Martin  
Measurement of Magnetic Materials at Room and Cryogenic Temperature for Their Application to Superconducting Wind Generators, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

\* Liu, Yingzhen; Ou, Jing; Schiefer, Markus; Breining, Patrick; Grilli, Francesco; Doppelbauer, Martin  
Application of an Amorphous Core to an Ultra-High-Speed Sleeve-Free Interior Permanent-Magnet Rotor, *IEEE transactions on industrial electronics*, 0278-0046, 1557-9948

\* Liu, Yingzhen; Ou, Jing; Schreiner, Fabian; Lao, Mayraluna; Noe, Mathias; Doppelbauer, Martin  
Design of a Superconducting DC Demonstrator for Wind Generators, *IEEE transactions on energy conversion*, 0885-8969, 1558-0059

\* Nugteren, J van; Kirby, G; Bajas, H; Bajko, M; Ballarino, A; Bottura, L; Chiuchiolo, A; Contat, P-A; Dhallé, M; Durante, M; Fazilleau, P; Fontalva, A; Gao, P; Goldacker, W; Kate, H ten; Kario, A; Lahtinen, V; Lorin, C; Markelov, A; Mazet, J; Molodyk, A; Murtomäki, J; Long, N; Perez, J; Petrone, C; Pincot, F; Rijk, G de; Rossi, L; Russenschuck, S; Ruuskanen, J; Schmitz, K; Stenvall, A; Usoskin, A; Willemering, G; Yang, Y  
Powering of an HTS dipole insert-magnet operated standalone in helium gas between 5 and 85 K, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668

\* Pahlke, Patrick; Sieger, Max; Ottolinger, Rick; Lao, Mayraluna; Eisterer, Michael; Meledin, Alexander; Van Tendeloo, Gustaaf; Hänisch, Jens; Holzappel, Bernhard; Schultz, Ludwig; Nielsch, Kornelius; Hühne, Ruben  
Influence of artificial pinning centers on structural and superconducting properties of thick YBCO films on ABAD-YSZ templates, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668

- \* Patel, Anup; Baskys, Algirdas; Mitchell-Williams, Tom; McCaul, Aoife; Coniglio, William; Hänisch, Jens; Lao, Mayraluna; Glowacki, Bartek A  
A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668
- \* Preuss, Alan; Fietz, Walter H.; Immel, Fabian; Kauffmann-Weiss, Sandra; Wolf, Michael J.  
Critical Current Degradation of Coated Conductors Under Soldering Conditions, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515
- \* Prikhna, T. A.; Eisterer, M.; Kozyrev, A. V.; Goldacker, W.; Moshchil, V. E.; Karpets, M. V.; Sverdun, V. B.; Shapovalov, A. P.; Romaka, V. V.; Pan, A. V.; Ponomaryov, S. S.; Serbenyuk, T. B.  
Structure and Properties of MgB<sub>2</sub>: Effect of Ti-O and TiC Additions, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515
- \* Quéval, Loïc; Liu, Kun; Yang, Wenjiao; Zermeño, Víctor M R; Ma, Guangtong  
Superconducting magnetic bearings simulation using an H-formulation finite element model, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668
- \* Röntzsch, Volker; Haas, Manuel; Özen, Mürüvvet B.; Rätzsch, Karl-Friedrich; Riazzi, Kamran; Kauffmann-Weiss, Sandra; Palacios, Jordana K.; Müller, Alejandro J.; Vittorias, Iakovos; Gisela Guthausen; Wilhelm, Manfred  
Polymer crystallinity and crystallization kinetics via benchtop 1 H NMR relaxometry: Revisited method, data analysis, and experiments on common polymers, *Polymer*, 0032-3861
- \* Rijckaert, Hannes; Hänisch, Jens; Pollefeyt, Glenn; Bäcker, Michael; Van Driessche, Isabel  
Influence of Ba<sup>2+</sup> Consumption and Intermediate Dwelling during Processing of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> Nanocomposite Films [in press], *Journal of the American Ceramic Society*, 0002-7820
- \* Rizzo, F.; Augieri, A.; Kursumovic, A.; Bianchetti, M.; Opherden, L.; Sieger, M.; Hühne, R.; Hänisch, J.; Meledin, A.; Van Tendeloo, G.; MacManus-Driscoll, J. L.; Celentano, G.  
Pushing the limits of applicability of REBCO coated conductor films through fine chemical tuning and nanoengineering of inclusions, *Nanoscale*, 2040-3364, 2040-3372
- \* Shen, Boyang; Li, Chao; Geng, Jianzhao; Zhang, Xiuchang; Gawith, James; Ma, Jun; Liu, Yingzhen; Grilli, Francesco; Coombs, T A  
Power dissipation in HTS coated conductor coils under the simultaneous action of AC and DC currents and fields, *Superconductor science and technology*, 0953-2048, 1361-6668
- \* Sieger, Max; Pahlke, Patrick; Lao, Mayraluna; Meledin, Alexander; Eisterer, Michael; Tendeloo, Gustaaf van; Schultz, L.; Nielsch, Kornelius; Hühne, Ruben  
Thick Secondary Phase Pinning-Enhanced YBCO Films on Technical Templates, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515
- \* Usoskin, Alexander; Betz, Ulrich; Hofacker, Frank; Rutt, Alexander; Schlenga, Klaus; Prause, Burkhard; Rossi, Lucio; Bottura, Luca; Ballarino, Amalia; Senatore, Carmine; Kario, Anna; Goldacker, Wilfried; Meledin, Alexander; Abraimov, Dmytro; Larbalestier, David  
Double-Disordered HTS-Coated Conductors and Their Assemblies Aimed for Ultra-High Fields: Large Area Tapes, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515
- \* Yang, Yifeng; Pelegrin, Jorge; Young, Edward A.; Nast, Rainer; Kario, Anna; Goldacker, Wilfried  
AC Losses of Roebel Cables with Striated 2G REBCO Strands, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515
- \* Zhang, Qingbo; Yang, Yifeng; Young, Edward; Cavallucci, Lorenzo; Kario, Anna; Goldacker, Wilfried; Usoskin, Alexander  
Bottura, Luca, Performance and Quench Characteristics of a Pancake Coil Wound With the 2G YBCO Roebel Cable, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 1051-8223, 1558-2515

# Veröffentlichungen

## Materie und Universum (MU)

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

### Zeitschriftenbeiträge

\* Arenz, M.; Baek, W.-J.; Bauer, S.; Beck, M.; Beglarian, A.; Behrens, J.; Berendes, R.; Bergmann, T.; Berlev, A.; Besserer, U.; Blaum, K.; Bode, T.; Bornschein, B.; Bornschein, L.; Brunst, T.; Buglak, W.; Buzinsky, N.; Chilingaryan, S.; Choi, W. Q.; Deffert, M.; Doe, P. J.; Dragoun, O.; Drexlin, G.; Dyba, S.; Edzards, F.; Eitel, K.; Ellinger, E.; Engel, R.; Enomoto, S.; Erhard, M.; Eversheim, D.; Fedkevych, M.; Formaggio, J. A.; Fränkle, F. M.; Franklin, G. B.; Friedel, F.; Fulst, A.; Furse, D.; Gil, W.; Glück, F.; Ureña, A. Gonzalez; Grohmann, S.; Grössle, R.; Gumbsheimer, R.; Hackenjos, M.; Hannen, V.; Harms, F.; Haußmann, N.; Heizmann, F.; Helbing, K.; Herz, W.; Hickford, S.; Hilck, D.; Howe, M. A.; Huber, A.; Jansen, A.; Kellerer, J.; Kernert, N.; Kippenbrock, L.; Kleesiek, M.; Klein, M.; Kopmann, A.; Korzeczek, M.; Kovalík, A.; Krasch, B.; Kraus, M.; Kuckert, L.; Lasserre, T.; Lebeda, O.; Letnev, J.; Likhov, A.; Machatschek, M.; Marsteller, A.; Martin, E. L.; Mertens, S.; Mirz, S.; Monreal, B.; Neumann, H.; Niemes, S.; Off, A.; Osipowicz, A.; Otten, E.; Parno, D. S.; Pollithy, A.; Poon, A. W. P.; Priester, F.; Ranitzsch, P. C.-O.; Rest, O.; Robertson, R. G. H.; Roccati, F.; Rodenbeck, C.; Röllig, M.; Röttele, C.; Ryšavý, M.; Sack, R.; Saenz, A.; Schimpf, L.; Schlösser, K.; Schlösser, M.; Schönung, K.; Schrank, M.; Seitz-Moskaliuk, H.; Sentkerestiová, J.; Sibille, V.; Slezák, M.; Steidl, M.; Steinbrink, N.; Sturm, M.; Suchopar, M.; Telle, H. H.; Thorne, L. A.; Thümmeler, T.; Titov, N.; Tkachev, I.; Trost, N.; Valerius, K.; Vénos, D.; Vianden, R.; Hernández, A. P. Vizcaya; Wandkowsky, N.; Weber, M.; Weinheimer, C.; Weiss, C.; Welte, S.; Wendel, J.; Wilkerson, J. F.; Wüstling, S.

Reduction of stored-particle background by a magnetic pulse method at the KATRIN experiment, *The European physical journal / C*, 1434-6044, 1434-6052

\* Arenz, M.; Baek, W.-J.; Beck, M.; Beglarian, A.; Behrens, J.; Bergmann, T.; Berlev, A.; Besserer, U.; Blaum, K.; Bode, T.; Bornschein, B.; Bornschein, L.; Brunst, T.; Buzinsky, N.; Chilingaryan, S.; Choi, W. Q.; Deffert, M.; Doe, P. J.; Dragoun, O.; Drexlin, G.; Dyba, S.; Edzards, F.; Eitel, K.; Ellinger, E.; Engel, R.; Enomoto, S.; Erhard, M.; Eversheim, D.; Fedkevych, M.; Fischer, S.; Formaggio, J. A.; Fränkle, F. M.; Franklin, G. B.; Friedel, F.; Fulst, A.; Gil, W.; Glück, F.; Ureña, A. Gonzalez; Grohmann, S.; Grössle, R.; Gumbsheimer, R.; Hackenjos, M.; Hannen, V.; Harms, F.; Haußmann, N.; Heizmann, F.; Helbing, K.; Herz, W.; Hickford, S.; Hilck, D.; Hillesheimer, D.; Howe, M. A.; Huber, A.; Jansen, A.; Kellerer, J.; Kernert, N.; Kippenbrock, L.; Kleesiek, M.; Klein, M.; Kopmann, A.; Korzeczek, M.; Kovalík, A.; Krasch, B.; Kraus, M.; Kuckert, L.; Lasserre, T.; Lebeda, O.; Letnev, J.; Likhov, A.; Machatschek, M.;

Marsteller, A.; Martin, E. L.; Mertens, S.; Mirz, S.; Monreal, B.; Neumann, H.; Niemes, S.; Off, A.; Osipowicz, A.; Otten, E.; Parno, D. S.; Pollithy, A.; Poon, A. W. P.; Priester, F.; Ranitzsch, P. C.-O.; Rest, O.; Robertson, R. G. H.; Roccati, F.; Rodenbeck, C.; Röllig, M.; Röttele, C.; Ryšavý, M.; Sack, R.; Saenz, A.; Schimpf, L.; Schlösser, K.; Schlösser, M.; Schönung, K.; Schrank, M.; Seitz-Moskaliuk, H.; Sentkerestiová, J.; Sibille, V.; Slezák, M.; Steidl, M.; Steinbrink, N.; Sturm, M.; Suchopar, M.; Suesser, M.; Telle, H. H.; Thorne, L. A.; Thümmeler, T.; Titov, N.; Tkachev, I.; Trost, N.; Valerius, K.; Vénos, D.; Vianden, R.; Hernández, A. P. Vizcaya; Weber, M.; Weinheimer, C.; Weiss, C.; Welte, S.; Wendel, J.; Wilkerson, J. F.; Wolf, J.; Wüstling, S.; Zadoroghny, S.

Calibration of high voltages at the ppm level by the difference of  $^{83m}\text{Kr}$  conversion electron lines at the KATRIN experiment, *The European physical journal / C*, 1434-6044, 1434-6052

\* Arenz, M.; Baek, W.-J.; Beck, M.; Beglarian, A.; Behrens, J.; Bergmann, T.; Berlev, A.; Besserer, U.; Blaum, K.; Bode, T.; Bornschein, B.; Bornschein, L.; Brunst, T.; Buzinsky, N.; Chilingaryan, S.; Choi, W. Q.; Deffert, M.; Doe, P. J.; Dragoun, O.; Drexlin, G.; Dyba, S.; Edzards, F.; Eitel, K.; Ellinger, E.; Engel, R.; Enomoto, S.; Erhard, M.; Eversheim, D.; Fedkevych, M.; Formaggio, J. A.; Fränkle, F. M.; Franklin, G. B.; Friedel, F.; Fulst, A.; Gil, W.; Glück, F.; Ureña, A. G.; Grohmann, S.; Grössle, R.; Gumbsheimer, R.; Hackenjos, M.; Hannen, V.; Harms, F.; Haußmann, N.; Heizmann, F.; Helbing, K.; Herz, W.; Hickford, S.; Hilck, D.; Howe, M. A.; Huber, A.; Jansen, A.; Kellerer, J.; Kernert, N.; Kippenbrock, L.; Kleesiek, M.; Klein, M.; Kopmann, A.; Korzeczek, M.; Kovalík, A.; Krasch, B.; Kraus, M.; Kuckert, L.; Lasserre, T.; Lebeda, O.; Letnev, J.; Likhov, A.; Machatschek, M.; Marsteller, A.; Martin, E. L.; Mertens, S.; Mirz, S.; Monreal, B.; Neumann, H.; Niemes, S.; Off, A.; Osipowicz, A.; Otten, E.; Parno, D. S.; Pollithy, A.; Poon, A. W. P.; Priester, F.; Ranitzsch, P. C.-O.; Rest, O.; Robertson, R. G. H.; Roccati, F.; Rodenbeck, C.; Röllig, M.; Röttele, C.; Ryšavý, M.; Sack, R.; Saenz, A.; Schimpf, L.; Schlösser, K.; Schlösser, M.; Schönung, K.; Schrank, M.; Seitz-Moskaliuk, H.; Sentkerestiová, J.; Sibille, V.; Slezák, M.; Steidl, M.; Steinbrink, N.; Sturm, M.; Suchopar, M.; Telle, H. H.; Thorne, L. A.; Thümmeler, T.; Titov, N.; Tkachev, I.; Trost, N.; Valerius, K.; Vénos, D.; Vianden, R.; Hernández, A. P. V.; Weber, M.; Weinheimer, C.; Weiss, C.; Welte, S.; Wendel, J.; Wilkerson, J. F.; Wolf, J. Wüstling, S.; Zadoroghny, S.

The KATRIN superconducting magnets: Overview and first performance results, *Journal of Instrumentation*, 1748-0221

\* Erhard, M.; Behrens, J.; Bauer, S.; Beglarian, A.; Berendes, R.; Drexlin, G.; Glück, F.; Gumbsheimer, R.; Hergenhan, J.; Leiber, B.; Mertens, S.; Osipowicz, A.; Plischke, P.; Reich, J.; Thümmeler, T.; Wandkowsky, N.; Weinheimer, C.; Wüstling, S.

Technical design and commissioning of the KATRIN large-volume air coil system, Journal of Instrumentation, 1748-0221

\* Trivikram, T. Madhu; Schlösser, M.; Ubachs, W.; Salumbides, E. J.

Relativistic and QED Effects in the Fundamental Vibration of, Physical review letters, 0031-9007, 1079-7114

## Veröffentlichungen

### Wissenschaft und Technologie der Nanosysteme (STN)

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

#### Zeitschriftenbeiträge

\* Gao, Guojun; Busko, Dmitry; Kauffmann-Weiss, Sandra; Turshatov, Andrey; Howard, Ian A.; Richards, Bryce S.

Wide-range non-contact fluorescence intensity ratio thermometer based on Yb<sup>3+</sup>/Nd<sup>3+</sup> co-doped La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microcrystals operating from 290 to 1230 K, Journal of materials chemistry / C, 2050-7526, 2050-7534

# Veröffentlichungen

## Eingeladene Vorträge

### Walter Fietz

- Invited presentation & panel discussion at TOFE 2018 (Technology of Fusion Energy, Nov. 11–15. 2018 Orlando, FL, USA) "High Temperature Superconductors for Future Fusion Power Plants" embedded in the session "Transformative Enabling Capabilities: Can High Temperature Super Conductors Shorten the Path to Fusion Energy?"

### Christian Day

- Chr. Day, The DEMO fuel cycle - innovative technologies for tritium inventory reduction, 23rd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE 2018), Orlando, FL, November 11–15, 2018
- Chr. Day, A smart architecture for the fuel cycle of a fusion power plant, 30th International Symposium on Fusion Technology (SOFT 2018), Giardini-Naxos, Italien, 16.09.2018–21.09.2018

### Bernhard Holzapfel

- 20.03.2018 „Supraleiter-Grundlagen, Effekte, Anwendungen“
- ZIEHL VI workshop, Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Berlin
- 25.03.2018, "Applied Superconductivity Research at the Institute for Technical Physics"
- Seminar talk, AIST, Tsukuba, Japan
- 28.03.2018, "Applied Superconductivity Research at the Institute for Technical Physics"
- Seminar talk, National Institute of Material Science, Tsukuba, Japan
- 04.09.18 "Wires and Tapes (Nb3Sn, MgB2, HTS)"
- ESAS Summer School, Vienna
- 15.11.2018, „Neue supraleitende Anwendungen im urbanen Umfeld“
- OPEX Forum 2018, Schloss Schwetzingen
- 12.12.2018 "Towards Superconducting Hybrid Electric Aircraft: Research Activities within TELOS and ASuMED", International Symposium on Applied Superconductivity, Tsukuba, Japan

### Mathias Noe

- E. Marzahn, M. Noe, "Hochtemperatur-Supraleiter Kabel", 91. Kabelseminar, 20.-21. Februar 2018, Leibniz Universität Hannover
- M. Noe, „Dielectric testing of cryogenic insulation systems“, Joint Workshop on High Temperature Superconducting Power Apparatus and Systems, CIGRE WG D1.64 CIGRE WG D1.69 IEC/TC90, 18. Mai 2018, Shanghai China
- M. Noe, "Technology related Superconducting Power Equipment R&D at KIT", Huazhong University of Science and Technology, 27. Juni 2018, Wuhan, China
- M. Noe, "Technology related Superconducting Power Equipment R&D at KIT" Shanghai University, 28. Juni 2018, Shanghai, China
- M. Noe, „Superconducting Power Equipment“, EASTRAIN Summer School, 3.-7. September 2018, Wien, Österreich
- M. Noe, "Energy Lab2.0 at KIT", Clean Energy Workshop, Bruxelles, 2. Oktober 2018, Brüssel, Belgien
- M. Noe, „Actual HTS R&D for industry and transportation at KIT“, Universität Genf, 8. Oktober 2018, Genf, Schweiz
- M. Noe, „Real-time validation of component characteristics in electric power systems“, Siemens Technisches Kolloquium, 7. November, Ottobrunn

### Michael Wolf

- Plenary Talk at 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT), Sept. 16-21 2018, Giardini Naxos, Italy
- "High Temperature Superconductors for Future Fusion Magnets and Industrial High Current Applications"
- Link: <https://www.soft2018.eu/en/programme>

# Veröffentlichungen

## Schutzrechtsbestände

(\* Neue Schutzrechtsanmeldungen in 2017

\*\* Schutzrechtserteilungen mit Wirkung für Deutschland in 2017

### **Strombegrenzer mit elektrischen Ventilen zum Begrenzen des Kurzschlußstromes in einem elektrischen Leistungstromkreis**

Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory  
DE 1149452  
US 6654222

### **Strombegrenzer zur Strombegrenzung im Fehlerfall**

Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory; Noe, Mathias  
DE 102004058633

### **Kryostat mit einem Magnetspulensystem, das eine LTS- und eine gekapselte HTS-Sektion umfasst**

Kläser, Marion  
DE 102006012508  
US 8255023

### **Kryostat mit einem Magnetspulensystem, das eine unterkühlte LTS- u. eine in einem separaten Heliumtank angeordnete HTS-Sektion umfasst**

Schneider, Theo  
CH 1999764  
DE 102006012511  
FR 1999764  
GB 1999764  
US 8255022

### **Anlage zur supraleitenden magnetischen Energiespeicherung, elektrolytischen Wasserzerlegung und wassersynthetisierenden Strombegrenzer**

Gehring, Rainer; Sander, Michael (verstorben)  
DE 102007042711

### **Verfahren zur Herstellung einer Verbindungsstruktur zwischen zwei Supraleitern und Struktur zur Verbindung zweier Supraleiter**

Drechsler, Antje; Goldacker, Wilfried; Oomen, Marijn; Rabbers, Jakob Johan; Schlachter, Sonja  
DE 102009043580.8-34  
EP 10760332.6

### **Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einer veränderbaren Spulenimpedanz**

Noe, Mathias; Schacherer, Christian  
DE 2532016  
FR 2532016  
GB 2532016  
JB 5907894  
US 9583258

### **Massenstromsensor und Verfahren zur Bestimmung des Massenstroms in einem Rohr**

Neumann, Holger; Ramalingam, Rajini K; Süßer, Manfred  
DE 102010012924

### **Vorrichtung zur Speicherung von Wasserstoff und von magnetischer Energie sowie ein Verfahren zu ihrem Betrieb**

Neumann, Holger; Sander, Michael (verstorben)  
DE 2684198  
FR 2684198  
GB 2684198

### **Isolierter Hochtemperatur-Bandsupraleiter und Verfahren zu seiner Herstellung**

Brand, Jörg; Elschner, Steffen; Fink, Stefan; Goldacker, Wilfried; Kudymow, Andrej  
AT 2729969  
CH 2729969  
DE 2729969  
FR 2729969  
GB 2729969  
IT 2729969  
KR 1020147002881  
US 939840

### **Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung des Massenstroms eines Fluids**

Grohmann, Steffen  
CA PCT/EP2012/005051  
CH 2791629  
DE 2791629  
DE 102011120899  
FR 2791629  
GB 2791629  
IT 2791629  
JP 6042449  
KR 10-2014-7017781  
US 14/364,681  
AU 2016200479

**Supraleitende Magnetanordnung**

Krüger, Philipp

DE 102012106211.0

**Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Wiederaufbereitung von Abgas eines Fusionsreaktors**

Day, Christian; Giegerich, Thomas

CN 201480060651.8

DE 3061098

DE 102013109778.2

FR 3061098

GB 3061098

KR PCT/EP2014/002342

**Design of Superconducting Devices****By Optimization Of The Superconductor's Local Critical Current**

Holzapfel, Bernhard; Rodriguez Zermeno, Victor

EP 14002754.1

US 14/819,850

**Supraleitende Transformatoren für Windenergieeinspeisung**

Hellman, Sebastian; Noe, Mathias

DE 102014016691.0

EP 15793820.0

**Advanced method for the treatment and the tritium recovery from tritiated water**

Cristescu, Ion

EP 15154339.4

**Schienengebundene Magnetschwebbahn**

Holzapfel, Bernhard; Noe, Mathias

CN 201680010135.3

DE 102015001746.2

EP 16705424.6-1754

US 15/549,188

**Transformator, Wickelkörper dafür und Verfahren zur Herstellung eines Wickelkörpers**

Hellmann, Sebastian

DE 102015114208.2

EP 16758091.9-1212

US 15/754,298

**Supraleitfähiger Leiter und Verwendung des supraleitfähigen Leiters**

Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.

DE 102015010636.8

EP 16757151.2

US PCT/EP2016/001368

**Verbinder für supraleitfähige Leiter und Verwendung des Verbinders**

Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.

DE 102015010634.1

EP PCT/EP2016/001370

US PCT/EP2016/001370

**Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines supraleitfähigen Leiters**

Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.

DE 102015010676.7

EP PCT/EP2016/001369

US PCT/EP2016/001369

**Drehmomentabsicherung und Flanschverbindung mit einer solchen**

Popov, Valery; Sturm, Michael

DE 102016114709.5

WO PCT/EP2017/000955 \*

**Design of contacts for superconducting busbars and cables**

Rodriguez Zermeno, Victor

EP 17000099.6 \*

**Heat exchanger element and method for manufacturing same**

Gomse, David; Grohmann, Steffen

EP 17401041.3 \*

WO PCT/EP2018/000057

**STROMBEGRENZUNGSVORRICHTUNG**

Hellmann, Sebastian

DE 102017120002.9 \*\*

**Verfahren und Vorrichtung zur Anreicherung oder Abreicherung mindestens eines Wasserstoffisotops in einem Gasstrom**

Day, Christian; Giegerich, Thomas; Hörstensmeyer, Yanni;

Müller, Ralf; Peters, Benedikt

DE 102017213886.6 \*\*

**Stromschienensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungsstück sowie Stromschiene mit einer Vielzahl von solchen Elementen**

Kudymow, Andrej; Rodriguez Zermeno, Victor; Strauß, Severin

DE 202017102659.0 \*\*

**Stromschienensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungsstück sowie Stromschiene mit einer Vielzahl von solchen Elementen**

Kudymow, Andrej; Rodriguez Zermeno, Victor; Strauß, Severin

LU LU100190 \*

**Verfahren zur Herstellung einer Verbindungsstruktur zwischen zwei Supraleitern und Struktur zur Verbindung zweier Supraleiter**

CA PCT/EP2010/064415

CN PCT/EP2010/064415

EP PCT/EP2010/064415

JP PCT/EP2010/064415

KR PCT/EP2010/064415

US PCT/EP2010/064415

WO PCT/EP2010/064415



# Kontakt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Technische Physik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon: +49 721/608-Durchwahl  
E-Mail: Vorname.Nachname@kit.edu

[www.itep.kit.edu](http://www.itep.kit.edu)

## Leitung

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)  
Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)

## Stellvertretende Leitung

Dr. Walter Fietz (-24197)

## Sekretariat

Dagmar Klimmek (-23501)

## Hochfeldmagnete

Dr. Theo Schneider (-22344)

## Kryotechnik

Dr. Holger Neumann (-22625)

## Supraleitermaterialentwicklung und energietechnische Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)  
Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)

## Abteilung Tritiumlabor Karlsruhe Leitung

Dr. Beate Bornschein (-23239)

## Geschäftsführer

Kai Bauer (-23705)

## Fusionsmagnete

Dr. Walter Fietz (-24197)  
Dr. Klaus-Peter Weiss (-23919)

## Vakuumtechnik

Dr. Christian Day (-22609)

## Koordination KATRIN im ITEP

Dr. Beate Bornschein (-23239)

## **Kontakt**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Campus Nord  
Institut für Technische Physik

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

---

[www.itep.kit.edu](http://www.itep.kit.edu)

## **Herausgeber**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Stand August 2019

---

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)