

ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung
Jahresbericht 2017

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



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001

Texte:

K. Bauer, B. Bornschein, C. Day, M. Erbe, W. Fietz,
L. Frances, T. Giegerich, J. Geisbüsch, W. Goldacker,
F. Grilli, S. Grohmann, R. Gröbke, R. Gyuraki, R. Heller,
B. Holzapfel, A. Kario, M. Kläser, A. Kudymow, I. Meyer,
M. Noe, M. Röllig, S. Schlachter, M. Schlösser,
T. Schneider, K. Vandermeulebroucke, S. Varoutis,
K.-P. Weiss, M. Wolf

Fotos und Grafiken:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Titelbild:

Ankunft der ITEP-Stromzuführungen bei JT-60SA
in Japan

Gestaltung: modus: medien + kommunikation gmbh
www.modus-media.de

Dezember 2018

Inhalt

Vorwort	4
Ergebnisse aus den Forschungsbereichen	7
Supraleiter- und Kryo-Materialien	7
Energietechnische Anwendungen	14
Supraleitende Magnettechnologie	22
Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes	30
Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen	36
40 Jahre ITEP	44
Highlights Dekade 1977–1986	44
Highlights Dekade 1987–1996	46
Highlights Dekade 1997–2006	48
Highlights Dekade 2007–2017	50
Lehre und Bildung	52
Vorlesungen, Seminare, Workshops und Sommerschulen	52
Doktorarbeiten – Master- und Diplomarbeiten – Bachelor-, Studien- und Praxisarbeiten	53
Kolloquien	57
Fach- und Gastvorträge	58
Zahlen und Daten	59
Organigramm	59
Personalstand	59
Personalveränderungen	60
Studentische Hilfskräfte	62
Gastwissenschaftler	63
Veröffentlichungen	64
Veröffentlichungen „Fusion“	64
Veröffentlichungen „Speicher und vernetzte Infrastrukturen“	66
Materie und Universum	71
Materie und Technologie	71
Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen	72
Wissenschaft und Technologie der Nanosysteme	72
Schutzrechtsbestände	73
Kontakt	75

Vorwort

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

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

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 entsprechende technische Infrastrukturen. Dazu gehören beispielsweise:

- Tritiumlabor Karlsruhe (TLK), das weltweit einzige zivil genutzte Labor mit einem geschlossenen Tritiumkreislauf
- Toroidal-Spulen-Testanlage Karlsruhe (TOSKA) zum Test großer Magnete für die Fusion und zur Entwicklung von Komponenten für zukünftige Fusionskraftwerke
- Testanlage für die ITER-Modellpumpe (TIMO) zur Entwicklung von Kryovakuumpumpen
- Hochfeldmagnetlabor zur Entwicklung von supraleitenden Magneten hoher Felder
- Kryogenes Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe
- Kryogene Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei extrem tiefen Temperaturen

Das ITEP erzielte auch im Jahr 2017 wichtige wissenschaftliche Ergebnisse, bearbeitete erfolgreich zahlreiche Entwicklungsprojekte und meisterte einige besondere Herausforderungen. Im Folgenden fassen wir die wichtigsten Ereignisse zusammen.

Im Forschungsfeld Supraleiter- und Kryomaterialien optimierten Wissenschaftler des ITEP Wachstumsparameter der chemischen Beschichtung von Hochtemperatur-Supraleitern, wie Sauerstoffpartialdruck und Kristallisationstemperatur, und erzielten damit Rekordwerte für

die Pinningkraftdichte bei 77 K. Sie intensivierten die Forschung zur additiven Fertigung für kryogene Anwendungen, indem sie zusammen mit Wissenschaftlern der Politecnico Turin und der Technischen Universität Košice verschiedene Materialproben mithilfe des Selective Laser Melting fertigten und für kryogene Anwendungen charakterisierten. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „High Entropy Alloys“ starteten sie ein DFG-Projekt und nahmen grundlegende Untersuchungen der Gefügestruktur nach Verformung bei Raumtemperatur und kryogenen Temperaturen vor. Bei der Entwicklung von Hochstromleitern erreichten sie mit dem CrossConductor Rekordstromdichten von 500 A/mm² bei 4,2 K und 12 T; zudem fertigten sie zwei 24 m lange Roebel-Leiter und stellten sie für Messungen am CERN bereit.

Im Forschungsfeld Energietechnische Anwendungen der Supraleitung entwickelte das ITEP im Rahmen eines BMWi-Verbundprojekts weltweit erstmals eine modulare supraleitende Gleichstromschiene für 20 kA; der Industriepartner installierte sie in einer Industrieanlage zur Chlorelektrolyse. Weiterhin nahm das ITEP grundlegende Entwicklungsarbeiten zu einer supraleitenden Stromschiene für ein elektrisch angetriebenes Flugzeug vor. Für eine neu entwickelte Methode zur hochdynamischen Visualisierung der Quenchausbreitung von Supraleitern erhielt unser Doktorand Roland Gyuráki den Best Presentation Award der EUCAS 2017. Zum Forschungsthema Echtzeitsystemintegration begann das ITEP Modellierungsarbeiten für supraleitend gelagerte Schwungmassenspeicher und führte zusammen mit dem Institut für angewandte Informatik hochfrequente Messungen in verschiedenen Niederspannungsnetzen durch.



Ankunft der letzten Stromzuführungen in Japan bei JT60-SA.

Eine wichtige Aufgabe im Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie ist die Entwicklung supraleitender Hochstromzuführungen für das Fusionsexperiment JT60-SA in Japan. 2017 baute und testete das ITEP die letzten von insgesamt 26 Stromzuführungen. Damit wurde das Projekt im Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen (siehe Abbildung).

Weiterhin entwickelten und testeten Forscher des ITEP weltweit erstmals eine supraleitende 20 kA-Hochstromzuführung mit YBCO-Bandleitern. Das EU-Projekt SUPRAPOWER zur Entwicklung von supraleitenden Windkraftgeneratoren wurde mit der Entwicklung, dem Bau und der Auslieferung von zwei rotierenden, modularen Kryostaten für die supraleitenden Magnete aus Magnesiumdiborid planmäßig abgeschlossen. Weiterhin fertigte das ITEP für das Upgrade der Testanlage HOMER II von 20 T auf 25 T fünf hochtemperatur-supraleitende Einsatzspulen in Lagenwicklung.

Im Forschungsfeld Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs entwickelt das ITEP grundlegend neue Vakuumtechnologien und Verfahren zur Extraktion und Rückgewinnung von Tritium. 2017 führten die Forscher eine erste komplette Vakuummodellierung der geplanten Versuchsanlage IFMIF durch und demonstrierten damit, dass das Design die Anforderungen erfüllt. Für ein neuartiges Verfahren zur Tritiumextraktion, basierend auf dem Vacuum Sieve Tray Prinzip, bauten sie ein Experiment auf und bereiteten erste Messungen für 2018 vor. Ein neuer Pumpstand für den Joint Experimental Torus (JET) wurde weiter aufgebaut und wird Mitte 2018 für Tests in JET bereitstehen. Für das geplante Fusionskraftwerk DEMO wurden die Konzepte des ITEP für Metallfolienpumpen und Diffusionspumpen vorläufig als Referenz in den Pumpkanal integriert; erste Arbeiten zum Austausch und zur Wartung haben begonnen.

Zentrale Themen im Forschungsfeld Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen sind die Prozessierung von Tritium sowie die Analytik von Wasserstoff und Tritium. Dazu betreibt das ITEP das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK), in dem auch 2017 ein durchweg sicherer Betrieb gewährleistet war. Die Forscher entwickelten unter anderem neue tritiumkompatible Pumpen und bauten in Zusammenarbeit mit dem rumänischen Institut ICIT eine Versuchsanlage zur Wasserdetritierung im TLK auf; diese ging erfolgreich in Betrieb. Zur hochgenauen In-situ-Kalibrierung von Wasserstoffisotopolo-

gen wurde ein neuer Teststand aufgebaut. Anhand hochauflösender Infrarot-Absorptionsspektroskopie gelang es, an HTO Molekülen 200 neue Linien nachzuweisen und genau zu vermessen. In Kooperation mit Wissenschaftlern des Laserlabors in Amsterdam vermaßen Forscher des ITEP mit der Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy das Linienspektrum von T₂ mit einer um den Faktor fünf besseren Auflösung.

Für das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN (www.katrin.kit.edu) leistet das ITEP Beiträge zu den Tritiumkreisläufen, der Kryoversorgung und den supraleitenden Magneten. 2017 schlossen die Forscher die mechanische Installation der Tritiumkreisläufe ab und entwickelten Steuerbausteine für Pumpen, Sensoren und Aktoren. Weiterhin nahmen sie Schaltschränke in Betrieb und entwickelten Software zur Steuerung und Regelung der Einheiten. Damit bereiteten sie den Beginn der verfahrenstechnischen Inbetriebnahme der Tritiumkreisläufe und den Start von ersten Testmessungen im Januar 2018 vor. Im Juli 2017 lief die erste Messphase in KATRIN mit Krypton; die dafür benötigte Kryptonquelle wurde in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus Rez und TLK entwickelt.

In der Ausbildung betreuten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ITEP im Jahr 2017 insgesamt 34 Doktoranden sowie 24 Masteranden.

In der Lehre erhielt Professor Dr. Steffen Grohmann für seine hervorragenden Beiträge den Fakultätslehrpreis 2017 der Fakultät Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik des KIT.

Unser ganz besonders herzlicher Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ITEP sowie allen Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie für die ausgesprochen vertrauensvolle, fruchtbare und erfolgreiche Zusammenarbeit im Jahr 2017.

Herzlichst

Ihre Institutsleitung



Mathias Noe

Bernhard Holzapfel

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Supraleiter- und Kryo-Materialien

Koordination: Prof. Dr. Bernhard Holzapfel

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

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

Die Arbeiten im Forschungsfeld schaffen die materialwissenschaftliche Basis für die im ITEP untersuchten energie- und magnetischen Anwendungen der Supraleitung.

Supraleitende Materialien

Im Bereich Supraleitende Materialien befassten sich die Forscher des ITEP auch 2017 mit der Weiterentwicklung von Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)-Bandleitern. Diese sind essenziell für vielfältige Anwendungen in der Energietechnik, wie Strombegrenzer, leistungsstarke und leichte Motoren/Generatoren, verlustarme Kabel und Stromzuführungen sowie Hochfeldmagnete, aber auch in der Mobilität, wie elektrische Aviation. Zu den Arbeitsgebieten gehören grundlegende materialwissenschaftliche Fragen, wie die Verbesserung der elektrischen Transporteigenschaften etablierter Supraleitermaterialien, anwendungsorientierte Untersuchungen an vielversprechenden neuen Supraleitern sowie die industriennahe technologische Weiterentwicklung der HTS-Bandleiter-Herstellung.

Technologieentwicklung

Herstellung von HTS-Bandleitern

In einem 18-Zonen-Klapprohfen wurden über einen kontinuierlichen lösungsbasierten Prozess (Chemische Lösungsabscheidung, CSD) erste $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Bandleiter bis 1,5 m Länge hergestellt, die bereits kritische Temperaturen bis 93 K mit ausgesprochen scharfen Übergängen (< 1 K) zeigten. Im Rahmen eines industriellen Projekts in Kooperation mit der Deutschen Nanoschicht GmbH startete im September 2017 eine Doktorarbeit, die auf die Weiterentwicklung dieses kontinuierlichen chemischen Herstellungsprozesses zielt, um die Eigenschaften der REBCO-Bandleiter (RE – Rare Earth/Seltene Erden) weiter zu verbessern und zugleich den Herstellungsprozess so einfach und ökonomisch wie möglich zu gestalten.

Charakterisierung

Für die Bestimmung der I_c -Anisotropie an unstrukturierter Bandleitern im gesamten Temperatur- und Winkelbereich wurde ein 6 T-Split-Coil-System (Oxford Instruments) für Transportströme bis zu 1000 A installiert und in Betrieb genommen (Abbildung 1). Erste Proben wurden erfolgreich gemessen; die Daten wurden an die Projektpartner übermittelt. Um die kritische Tempera-

tur von Hochtemperatur-Supraleiterschichten schnell und global zu bestimmen, wurde ein induktiver Messstand in Betrieb genommen.

Materialforschung

Hochtemperatur-Supraleiter

Mit der Entwicklung der CSD-Bandleiter-Herstellung war eine weitere Optimierung der Lösungen im Kleinprobenmaßstab einhergegangen. Dies hatte zu Weltrekordwerten für kritische Stromdichten in chemisch abgeschiedenen $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Schichten mit BaHfO_3 -Pinningzentren geführt. Nun wurden die Eigenschaften dieser Schichten eingehend untersucht, um die Zusammenhänge zwischen Mikrostruktur und Stromtragfähigkeit besser zu verstehen (siehe Highlight 1). Zudem wurden die Lösungen in verschiedene Richtungen weiterentwickelt, um deutlich kürzere Prozesszeiten zu ermöglichen, durch einen geringeren Fluorgehalt die Umweltverträglichkeit zu erhöhen sowie die Sensitivität gegenüber wechselnden Umwelteinflüssen zu senken. Dazu untersuchte eine erfolgreich abgeschlossene Masterarbeit den Einfluss eines Lösungsadditivs. Mit diesem ließen sich die Schichthomogenität und zugleich die Reproduzierbarkeit der Schichteigenschaften deutlich erhöhen, was außerdem die Stromtragfähigkeiten gegenüber unbehandelten Lösungen noch einmal signifikant verbesserte.



Abb. 1: 6 T-Split-Coil-System zur Bestimmung der I_c -Anisotropie von Bandleitern bis 1000 A. Links Kryostat und Probenstab, rechts Probenhalter mit installiertem Bandleiter.

Ähnliche Untersuchungen zum Pinningverhalten unterschiedlicher Mikrostrukturen liefern an $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Schichten (RE = Y, Gd), hergestellt mit gepulverte Laserdeposition (PLD). Dazu wurden Nanokomposite hergestellt, beispielsweise aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - und BaHfO_3 -Nano-

partikeln. Die Abscheidetemperatur beeinflusst Größe, Form und Anzahldichte der Nanopartikel und somit die Anisotropie der kritischen Stromdichte.

Im Rahmen zweier Horizon 2020-Projekte bestimmten Forscher des ITEP strukturelle und elektrische Eigenschaften von Bandleitern der Projektpartner: Für das Projekt ASuMED, das auf die Entwicklung eines supraleitenden Motors für die Luftfahrt zielt, wurde die Anisotropie des kritischen Stroms I_c von SuperOx-Bändern bei den späteren Betriebstemperaturen zwischen 20 und 40 K und in Magnetfeldern bis 2 T bestimmt. Diese Daten gehen in Simulationen zur Motorgeometrie ein (siehe Energietechnische Anwendungen der Supraleitung: Modellierung von Supraleitern und Komponenten). Für das Projekt FastGrid, das Oberflächenmodifikationen an Bandleitern für die speziellen Anforderungen in Fehlerstrombegrenzern erforscht, wurden verschiedene Defektstrukturen an THEVA-Bandleitern anhand von Röntgenbeugung und Rasterelektronenmikroskopie untersucht sowie Biege- und Quenchversuche durchgeführt.

Fe-basierte Supraleiter

Das Wachstum von epitaktischen Fe-basierten Supraleiterschichten mit gepulster Laserdeposition (PLD) wurde am System BaFe_2As_2 mit drei unterschiedlichen Dotierungen (Ni, Co und P) untersucht und hinsichtlich Phasereinheit und kritischer Temperatur optimiert. Die Mikrostruktur dieser Schichten wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Gent anhand von hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie untersucht. Eisenpartikelanteil, Grenzflächenschichten und Grad der Epitaxie hängen stark von der Abscheidetemperatur und der Targetzusammensetzung ab. Für weitergehende Untersuchungen zum Einbau pinningaktiver Nanopartikel wurden die Abscheidekammern für die schnelle Multilagen-deposition ertüchtigt; erste Multilagen wurden hergestellt. Um schichtdickenabhängige Effekte in dünnen Fe-basierten Supraleitern zu untersuchen, auch mit Blick auf mögliche Detektoranwendungen, wurden in einer Zusammenarbeit mit der Universität Nagoya mit PLD BaFe_2As_2 -Schichten sowie mit Molekularstrahlepitaxie (MBE) $\text{NdFeAs}(\text{O},\text{F})$ -Schichten von unterschiedlicher Dicke hergestellt. Mikrostruktur und elektrische Eigenschaften dieser Proben werden derzeit untersucht.

Magnesiumborid

Im Rahmen des im August 2017 erfolgreich abgeschlossenen Projekts DIAMANT wurden erstmals mit dem neuen Verfahren der Aerosolabscheidung supraleitende MgB_2 -Schichten auf biegbaren Stahlsubstraten gefertigt. Dies lieferte neue Erkenntnisse zur Abhängigkeit der Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen aerosolabgeschiedener supraleitender Schichten von Pulveraufbereitung und Prozessparametern.

Kontakt: Jens.Haenisch@kit.edu

Kryo- und Strukturmaterialien

Hochfeste Materialien, auch Funktionsmaterialien genannt, liefern die Grundlage für neue Anwendungen im kryogenen Bereich. Dabei erlauben neue Herstellungsmethoden, mechanische sowie elektrische Eigenschaften verschiedenster Konstruktionsmaterialien gezielt einzustellen.

Zum einen treiben hochfeste Strukturmaterialien die Entwicklung neuer supraleitender Magnete wesentlich voran. Zum anderen gewinnen vor allem kalte Umformtechniken weltweit an Relevanz, speziell das sogenannte Kryo-Walzen/Kryo-Drahtziehen zur gezielten Beeinflussung des Gefüges. Darüber hinaus ermöglicht die Additive-Fertigung neue Wege in der Komponentenfertigung ohne weitere Nachbearbeitung. Forscher des ITEP arbeiten aktuell erfolgreich an Projekten auf allen genannten Gebieten.



Abb. 2: Partner des H2020-Projekts Future Superconducting Magnet Technology.

Ausgezeichnete kryogene Messmöglichkeiten, kombiniert mit fundierter Struktur- und Gefügeanalyse, bilden ein Alleinstellungsmerkmal des ITEP. Dieses hat namhafte Partner gefunden, mit denen die gezielte Herstellung von Materialien möglich wird, beispielsweise COMTES in Tschechien für experimentelle Stahlschmelzen, das Politecnico di Torino in Italien für die Additive-Fertigung und das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg für faserverstärkte Kunststoffe.

Die gebündelte Expertise trägt nun dazu bei, in einem europäischen H2020 Future and Emerging Technologies Projekt mit dem Titel Future Superconducting Magnet Technology (FuSuMaTech) zukünftige Magnetentwicklungen vorzubereiten. Das ITEP ist am Arbeitspaket Material-Database und besonders als Task-Leader an den Arbeitspaketen High-Strength-Materials beteiligt. Ziel ist, in 18 Monaten den Stand der Technik zu erarbeiten und den zukünftigen Bedarf an hochfesten Strukturmaterialien für den kryogenen Temperaturbereich festzustellen. Auf dieser Basis soll ein Folgeprojekt initiiert werden, um die definierten Forschungsaufgaben zu behandeln.



Abb. 3: Experimentelle Legierungen (jeweils ca. 50 kg) nach dem Schmieden (Alloy 825, XM-19, Alloy 282).

Bei der Untersuchung neuer Legierungen für kryogene Anwendungen stellte COMTES ausgewählte Schmelzen (Cr, Ni, Mo Stähle) im Labormaßstab (ca. 50 kg pro Barren) her. Diese austenitischen Stähle zeichnen sich durch hohe Festigkeitswerte bei hoher Verformbarkeit auch bei tiefen Temperaturen aus. Proben wurden bereits hergestellt; erste Messungen haben begonnen, um die Materialeigenschaften bei kryogenen Temperaturen (beispielsweise 77 K und 4,2 K) zu bestimmen.

Im Rahmen eines DFG-Projekts im Schwerpunktprogramm High Entropy Alloys (SPP 2006) wird der Verformungsmechanismus eines austenitischen Stahls bei tiefen Temperaturen systematisch untersucht. Als Referenzmaterial dient die sogenannte Cantor-Legierung FeNiCoCrMn, die alle Legierungselemente zu gleichen Teilen beinhaltet. Zusammen mit dem Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde (IAM-WK) des KIT, das die Materialherstellung verantwortet, führt das ITEP kryogene Zug- und Kompressionsversuche durch. Die Kombination mit der Gefügeanalyse soll die spezifischen Unterschiede der Verformung bei kryogener Temperatur und bei Raumtemperatur zeigen.

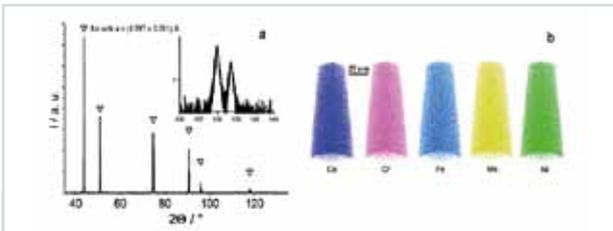


Abb. 4: Das Röntgenspektrum der HEA-Legierung FeNiCoCrMn zeigt eine fcc (fcc) Struktur (links). Die Verteilung aller Legierungselemente ist homogen in der gesamten Probe (rechts – Atomsonden-Tomographie der Karlsruhe Nano Micro Facility).

Spezifische Herstellungsverfahren zur Verbesserung der Materialeigenschaften, beispielsweise durch Kornfeinung, sind auch für die Herstellung von kryogenen Komponenten interessant. So ist die Kaltumformung von Materialien für Hochtemperaturanwendungen durchaus etabliert, für den Tieftemperatureinsatz allerdings noch kaum untersucht.

Bei Strukturmaterialien, besonders bei austenitischen Stählen, lässt sich speziell mit dem Kryo-Walzen bei einer Temperatur von 77 K eine Kornfeinung erreichen. Dieses Verfahren wurde bei 316 L angewandt; erste Voruntersuchungen wurden durchgeführt. Dabei zeigte sich ein enormes Potenzial, die Materialeigenschaften gezielt zu beeinflussen. Im Rahmen eines EUROfusion Enabling Research Antrags soll dieses Thema 2018 weiter untersucht werden.

Ökonomische Herstellungsverfahren sparen Material ein oder verringern die Zahl der erforderlichen Fertigungsschritte. Das Additive-Fertigungsverfahren erlaubt darüber hinaus, Geometrien oder Materialeigenschaften spezifisch zu optimieren. Beim selektiven Laserschmelz-Verfahren wird ein metallisches Pulvermaterial kurzzeitig durch einen Laser aufgeschmolzen. Die gewählten Parameter wie Weg, Dauer und Leistung des Lasers beeinflussen die Eigenschaften des erstarrten Materials. Das Politecnico di Torino verfügt auf diesem Gebiet über fundierte Erfahrung und besitzt eine herausragende techni-

sche Ausstattung. Aus 316 L Pulvermaterial, vom ITEP bereitgestellt, fertigte es Proben zur mechanischen Charakterisierung bei kryogenen Temperaturen und für Strukturanalysen. Der Einfluss der Herstellungsparameter und der anschließenden unterschiedlichen Glühbedingungen wird 2018 systematisch untersucht.



Abb. 5: Beteiligte Partner (Politecnico di Torino, TUKE, KIT) mit Additivem Drucker EOSINT M270 (links). Gefertigte 316 L Zylinder (50 mm hoch) zur Probenherstellung für kryogene Tests (rechts).

Das ITEP ist außerdem an der laufenden Qualifizierung und Qualitätssicherung von industriell gefertigten kryogenen Komponenten für das Fusionsprojekt ITER beteiligt. Zusätzlich nutzt es seine Expertise bei der Entwicklung einer toroidalen Feldspule mit Hochtemperatur-Supraleitern für den zukünftigen DEMO Fusionsreaktor im Rahmen von EUROfusion. Diese Themen werden hauptsächlich im Bereich HTS-Fusionsmagnete bearbeitet.

Kontakt: Klaus-Peter.Weiss@kit.edu

Kryogene Stoffeigenschaften

Im Rahmen der Technologieentwicklung zur effizienten und ökonomischen Kühlung von HTS-Anwendungen arbeitete das ITEP gemeinsam mit dem Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) des KIT grundlegend an der Entwicklung kryogener Gemischkältekreisläufe (Cryogenic Mixed Refrigerant Cycles – CMRC). Die Forscher untersuchten besonders die thermodynamischen Eigenschaften nicht brennbarer Kältemittelgemische für HTS-Anwendungen mit Kältemitteln der 4. Generation bei Temperaturen oberhalb von 100 K und veröffentlichten die Ergebnisse

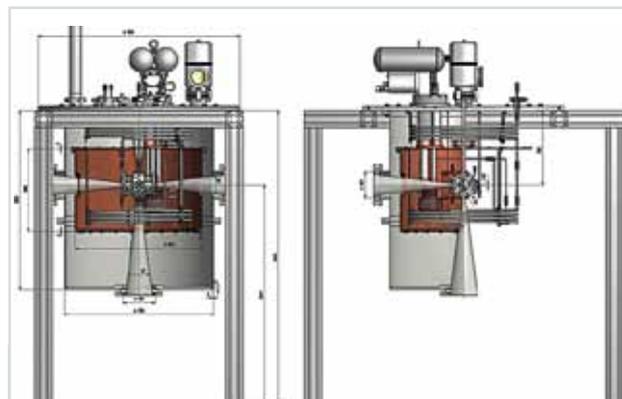


Abb. 6: Konstruktion der kryogenen Phasengleichgewichtsanlage CryoPHAEQTS.

Zur Untersuchung kryogener Stoffgemische unterhalb von 100 K wurde die neue Versuchsanlage CryoPHAEQTS (Cryogenic Phase Equilibria Test Stand) ausgelegt

und konstruiert (6). Die Anlage ist für Temperaturen von 15 bis 300 K sowie Drücke bis 15 MPa konzipiert und nach ATEX für die Verwendung brennbarer und oxidierender Fluide geeignet. Ferner verfügt CryoPHAEQTS über optische Zugänge zur Bestimmung von Zustands- und Transportgrößen mit optischen Messmethoden.

Kontakt: Steffen.Grohmann@kit.edu

Leitertechnologien

CroCo-Kabel

Im Jahr 2017 schloss das ITEP die Berechnungen für ein 35 kA-Demonstratorkabel aus HTS CroCos ab und legte die finale Geometrie für den Test fest (Abbildung 7). Die Technologie zur Fertigung der benötigten HTS CroCo-Strands wurde weiterentwickelt. So wurde die maximale Fertigungslänge verdoppelt. Die Fertigung der für den Kabeltest benötigten zwölf HTS CroCos startete. Parallel dazu nahmen die Forscher elektromechanische und thermische Untersuchungen an den im Kabel verwendeten REBCO-Bändern vor, um ein umfassendes Verständnis der HTS CroCo-Fertigung und der Leiter Eigenschaften zu gewinnen.



Abb. 7: CAD-Modell des SupraDCKabels.

Roebel-Kabel

Die avisierte Anwendung größerer Kabellängen (> 100 m) erforderte 2017 verschiedene Maßnahmen und Untersuchungen, um eine optimierte Performance der Kabel zu gewährleisten. Dazu gehörten eine Erhöhung der Präzision des Stanzverfahrens, die Realisierung einer effektiven Verseiltechnik für Längen im Bereich von 100 m und die Anwendung des fortgeschrittenen Punch-and-Coat-Verfahrens für die Strandherstellung. Um zu einem besseren Verständnis der Kabeleigenschaften zu gelangen, wurden eine Apparatur zur

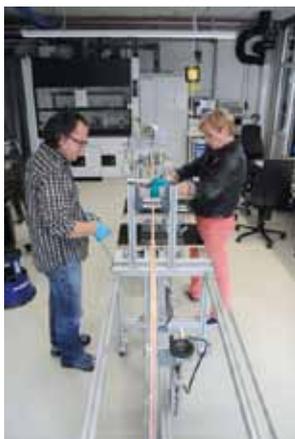


Abb. 8: Kabelmaschine zur Herstellung von Roebel-Kabeln im Betrieb.

Messung des Inter-Strand-Widerstands sowie eine Apparatur zur kontinuierlichen Transportstrommessung der Roebel-Kabel im LN₂-Bad aufgebaut. Zwei Roebel-Kabel à 24 m Länge wurden für Wicklungen an CERN geliefert (siehe Highlight 2).

Laserstrukturierung/AC-verlustarme Leiter

Seit einigen Jahren wird zur Mikrostrukturierung von Bandleitern bis 60 cm Länge ein Piko-Sekunden-YAG-Laser eingesetzt. 2017 erweiterte das ITEP die Laser-Maschine erfolgreich um eine Reel-to-Reel-Einheit zum Strukturieren und Schneiden langer Leiterlängen (Abbildung 9). Nun lassen sich Bänder bis 100 m Länge mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ strukturieren. Dies geschieht über einen Step-and-repeat-Prozess, bei dem der Bandvorschub über einen Lineartisch gesteuert und mithilfe einer CCD-Kamera überwacht und geregelt wird. In einem 5 m langen und 12 mm breiten SuperPower-Band wurden zehn Filamente hergestellt. Zur Herstellung einer kontrollierten elektrischen Kopplung der Filamente experimentierten die Forscher mit resistiven Barrierschichten.

Für Satellitenanwendungen wurden erste Versuche durchgeführt, bei denen mithilfe des Lasers Leiterbahnen mit Breiten von 200 bis 400 μm und Längen von ca. 30 cm sowie 1 mm breiten Stromkontakten aus kommerziellen REBCO-Stromzuführungsleitern herausgeschnitten wurden. Erste Messungen der Stromtragfähigkeit bei 77 K ergaben vielversprechende Werte für die Anwendung als Stromzuführungen für ADR-Magnete auf Satelliten der NASA.



Abb. 9: Laseranlage mit Lineartisch und Reel-to-Reel-Einheit.

MgB₂-Leiter

Das europäische Projekt Best Paths zielt auf ein Höchstspannungs-DC-Kabel aus Magnesiumdiborid-Drähten, gekühlt mit Flüssigwasserstoff. In Kooperation mit der TU Dresden lagerte das ITEP Drähte von Columbus bis zu drei Wochen in Wasserstoff aus. Diese Behandlung beeinflusste die Stromtragfähigkeit der Drähte nicht. Damit sind die Drähte für die Kühlmethode im Kabel qualifiziert.

Zum Thema „AC-verlustarme MgB₂-Kabel mit dünnen Filamenten für die Anwendung im Stator von Generatoren“ warb das ITEP einen Industrieauftrag ein. Anhand von ersten Messungen der Stromtragfähigkeit dünner MgB₂-Kompositdrähte bei $T = 20 \text{ K}$ und $B = 1 \text{ T}$ schlugen die Forscher verschiedene Kabeldesigns vor und erstellten eine Machbarkeitsstudie für ein Prototypkabel.

Kontakt: Sonja.Schlachter@kit.edu

Highlight 1

Rekordwerte der Pinningkraftdichten in CSD-gewachsenen $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}\text{-BaHfO}_3$ -Nanokompositschichten

Die Herstellung von Bandleitern der 2. Generation, sogenannter Coated Conductors, war in den vergangenen Jahren eines der meisterforschten Gebiete im Bereich der Angewandten Supraleitung. Das Funktionsmaterial dieser Bandleiter ist eine nur wenige Mikrometer dicke Schicht eines Hochtemperatur-Supraleiters, speziell RE-Ba $2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (REBCO). Um diese Bandleiter weitreichend zu nutzen, muss ihre zuverlässige, kostengünstige, qualitativ und quantitativ hochwertige Herstellung sichergestellt werden. Eine kostengünstige Herstellungsmethode ist die am ITEP untersuchte und weiterentwickelte Chemische Lösungsabscheidung (CSD).

Verschiedene Anwendungen bringen unterschiedlich starke Magnetfelder und Betriebstemperaturen mit sich. Dafür muss die Stromtragfähigkeit der Supraleiterschichten optimiert bzw. in der Regel maximiert werden, und ihre Anisotropie muss maßgeschneidert werden. Das geschieht durch den gezielten Einbau von nanometergroßen nichtsupraleitenden Teilchen. Gleichzeitig sollte die kritische Temperatur der supraleitenden Matrix möglichst hoch sein und durch die Nanoteilchen nicht gestört werden.

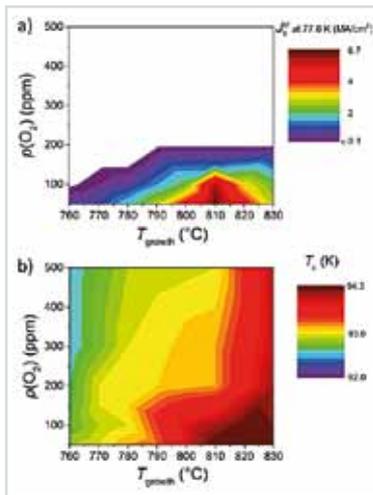


Abb. 10: Untersucher Parameterraum Sauerstoffpartialdruck $p\text{O}_2$ vs. Kristallisationstemperatur T_{growth} und gemeinsamer Einfluss auf J_c (oben) und T_c (unten).

In dieser Studie wurden 220 nm dicke Nanokompositschichten aus $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ und 12mol% BaHfO_3 (BHO)-Nanopartikeln über CSD auf SrTiO_3 -Einkristallsubstraten hergestellt. Dabei wurden die Depositionsparameter, wie Sauerstoffpartialdruck und Kristallisationstemperatur, detailliert und weitreichend optimiert (Abbildung 10). Die Schichten, die bei optimalen Parametern (50-100 ppm O_2 , $T_{\text{dep}} = 810^\circ\text{C}$) deponiert wurden, zeigten herausragende supraleitende Eigenschaften. Die kritischen Temperaturen T_c erreichten Werte um 94 K, die kritischen Stromdichten im Eigenfeld J_c Werte von 7,3 MA/cm 2 bei 77 K, 14,5 MA/cm 2 bei 65 K und 36,8 MA/cm 2 bei 30 K (Abbildung 11a). Die maximalen Pinningkraftdichten F_{pmax} wurden mit 16,0 GN/m 3 bei 77 K und 56,5 GN/m 3 bei 65 K bestimmt (Abbildung 11b). Diese Rekordwerte erklären sich durch eine extrem scharfe biaxiale Textur der supraleitenden Matrix, eine hohe Dichte der Schichten – diese weisen keine stromblockierenden großen Poren auf – sowie eine homogene Raum- und Größenverteilung der Nanopartikel (Abbildung 12), die das hohe T_c der $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Schichten nicht absenken.

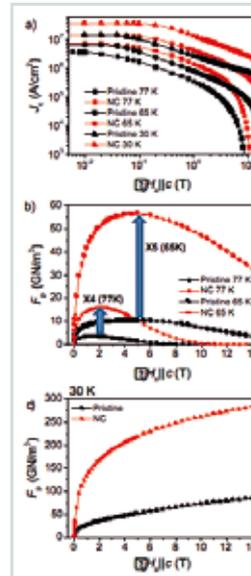


Abb. 11: Vergleich der elektrischen Transporteigenschaften einer $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}\text{-BaHfO}_3$ -Nanokompositschicht (NC, rot) mit einer undotierten $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Schicht (schwarz). a) Magnetfeldabhängigkeit der kritischen Stromdichte J_c bei 77 K (■), 65 K (●) und 30 K (▲) sowie b) und c) der zugehörigen Pinningkraftdichten F_p .

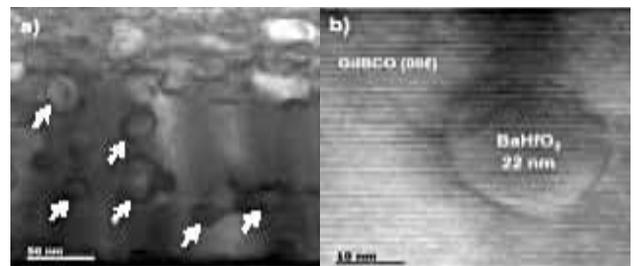


Abb. 12: Mikrostruktur einer $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}\text{-BaHfO}_3$ -Nanokompositschicht in einer transmissionselektronenmikroskopischen Aufnahme, welche die a) Verteilung und b) Größe der BaHfO_3 -Teilchen (Pfeile) illustriert.

Kontakt: Manuela.Erbe@kit.edu

Highlight 2

Fortgeschrittene HTS Roebel-Kabel

Roebel-Kabel aus Hochtemperatur-Supraleitern (REBCO-Bändern), eine Entwicklung des ITEP, haben sich in ersten Wicklungen für Einsatzzspulen in Dipolmagneten zukünftiger Teilchenbeschleuniger (HiLumi Vorhaben des CERN) bereits bewährt und erlauben dabei konkurrenzlos hohe Stromdichten. Für zukünftige größere Demo- und Prototypmagnete bedarf es jedoch einiger wesentlicher Fortschritte in der Kabelperformance. Dazu sind unterschiedliche Maßnahmen bei der Herstellung und erweiterte Untersuchungen des Materials erforderlich.

Stanzpräzision großer Strandlängen

Zur Verseilung großer Strandlängen > 100 m muss die gestanzte Mäanderstruktur der Strands ganz exakt sein, damit die Strands über die Gesamtlänge zusammenpassen. Dies gilt besonders für die Transpositions-länge. Um die Genauigkeit des Stanzprozesses im kon-

tinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, wurde eine optische Kontrolle der gestanzten Mäandergeometrie in die Stanzanlage integriert. Über eine Rückkopplung zum Bandvorschub erlaubt sie eine exakte Justage des Supraleiterbands für den Folgeschritt. So werden Geometriefehler auf geringste Schwankungen um den Sollwert reduziert. Eine einzigartige Performance des Stanzprozesses ist damit garantiert.

Halbautomatische Verseilverfahren

Derzeit sind halbautomatische Verseilverfahren mit händischer Unterstützung die einzige Methode, eng verseilte Roebel-Kabel herzustellen, wie sie für den Magneteinsatz erforderlich sind. Die Großlängentauglichkeit des Verfahrens wurde mit der Herstellung eines 100 m langen Dummykabels aus Stahlband demonstriert. Die Umsetzung in einen vollautomatischen Prozess ist prinzipiell möglich; der Realisierung stehen vorerst nur die extrem hohen Kosten für einen speziell designten Roboter entgegen.

Charakterisierung der Stromtragfähigkeit großer Leiter- und Kabellängen und ihrer Homogenität

Dies hat sich als die wichtigste Charakterisierungsaufgabe erwiesen, da industrielle Leiter häufig Defekte und Strominhomogenitäten aufweisen, die sich in Kabelstrukturen verstärkt bemerkbar machen. Forscher des ITEP entwickelten und bauten dazu eine kontinuierliche Anlage zur Strommessung, die sowohl Einzelbänder als auch Roebel-Kabel im Durchlauf automatisiert vermessen kann (Abbildung 13). Die Ortsauflösung der Strommessung von ca. 1 m wird durch eine lokale bewegliche Magnetfelddiskriminierung auf < 1 cm verbessert. Damit sind Aussagen über die Leiter- und Kabelhomogenität in einer praxisrelevanten Auflösung verfügbar.

Kontrollierte Strandskopplung

Die kontrollierte Strandskopplung im Kabel bildet eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Stabilität des Kabels, die Reduktion der Verluste und die verschiedenen Anwendungsfälle. Dazu sind grundlegende Untersuchungen des Interstrand-Widerstands gefragt, die den Parameterraum gezielter Maßnahmen erschließen. Die Kontaktierung der Strands als Funktion transversaler Kräfte, wie sie durch Lorentzkräfte in Magneten verursacht werden, wurde experimentell untersucht (Abbildung 14). Die individuelle Kabelperformance der unterschiedlichen Hersteller hat dabei großen Einfluss. Auf den Ergebnissen aufbauend, erarbeitet das ITEP nun Maßnahmen und Methoden für eine kontrollierte Strandskopplung.

Nachfolgeaktivität zum Projekt EuCARD² (EU, CERN)

Dazu wurden als Erstes längere Roebel-Kabel von 2 x 24 m Länge mit jeweils 13 Strands, 300 mm Transpositionslänge und 5.85 mm Breite für Dipolwicklungen am CERN geliefert. Sie wurden in Kooperation mit Bruker bereits mithilfe der Punch-and-Coat-Technologie hergestellt. Diese gewährleistet eine vollständige Versiegelung der Strands durch elektroplattiertes Kupfer und damit die Stabilität gegenüber Kühlzyklen und Delaminationseffekten (Abbildung 15). Die Applikation in Wicklungen und die Testergebnisse definieren künftige Aktionen.

Kontakt: Anna.Kario@kit.edu

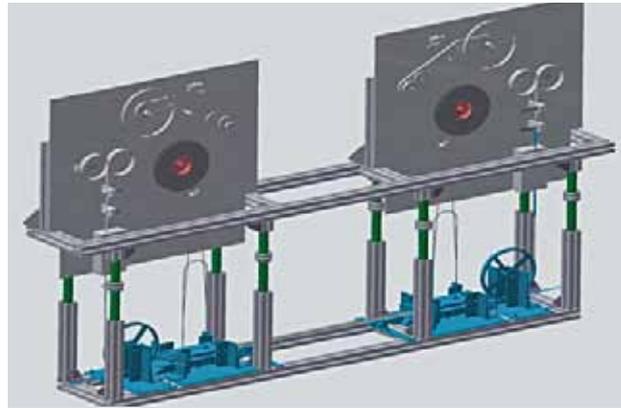


Abb. 13: Apparatur zur kontinuierlichen Strommessung.

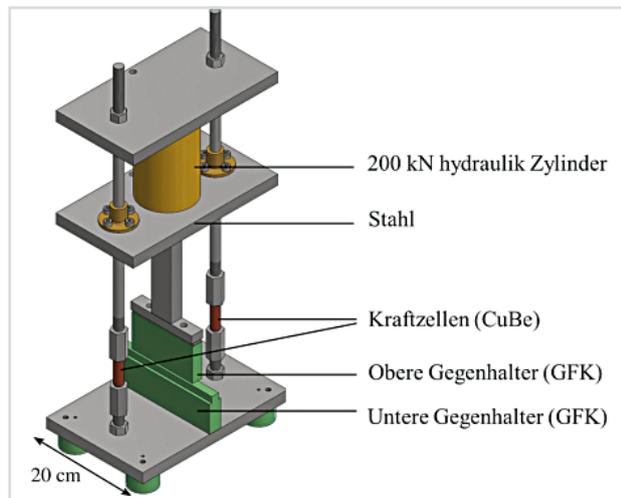


Abb. 14: Messapparatur für transversale Druckanwendung bei Roebel-Kabeln.

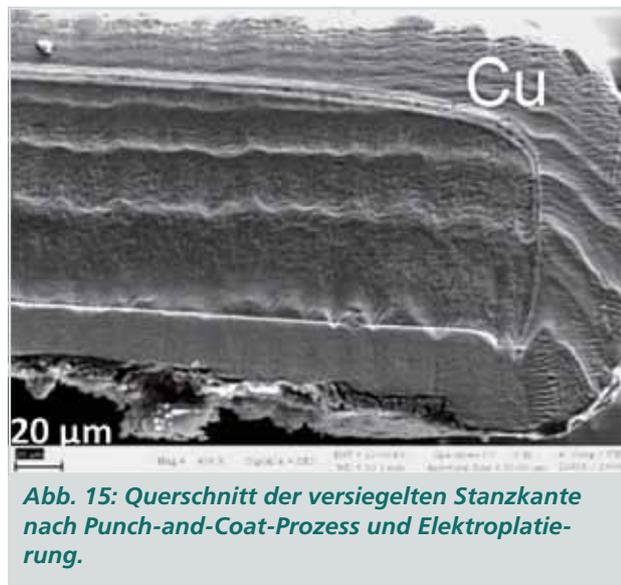


Abb. 15: Querschnitt der versiegelten Stanzkante nach Punch-and-Coat-Prozess und Elektroplattierung.



Experiment zum Transportstromtest an einer kontaktierten supraleitenden 3S-Subscale-Stromschiene (welliges Objekt zwischen den Stromzuführungskabeln).

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Energietechnische Anwendungen

Koordination: Dr. Wilfried Goldacker

Im Forschungsfeld Energietechnische Anwendungen der Supraleitung bearbeiten Wissenschaftler des ITEP die folgenden Bereiche:

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

Supraleitende Netzkomponenten

Supraleitender SB-Transformator

2017 testete das ITEP erfolgreich einen aus Hochtemperatur-Supraleitern (REBCO-Bandleitern) entwickelten 600 kW-Transformator für den 20 kV-Mittelspannungsbereich mit Begrenzungsfunktion für Kurzschlussströme. Die Begrenzung sollte im Last-Strand des Trafos wirken und eine vollständige Erholung unter Last erlauben. Der Transformator besteht aus einem konventionellen Transformator mit Eisenjoch und normalleitender Primärseite sowie einer mit flüssigem N₂ gekühlten Sekundärseite in einem Glasfaserkunststoff-Kryostaten (Abbildung 1). Besonders achteten die Forscher auf den mechanischen Schutz des Supraleiterbands durch eine spezielle Gestaltung des Wickelkörpers (Abbildung 2). Die neuartige wellige Struktur des Wickelkörpers gestattet eine Kompensation sowohl der thermisch bedingten Längenänderung als auch der Belastung durch die Lorentzkräfte bei fließendem Strom. Eine ausführlichere Beschreibung des Transformators ist publiziert; zusätzliche Informationen finden sich im Jahresbericht 2016 des ITEP.

Die Tests dienten dazu, das Verhalten bei einem Strombegrenzungsvorfall – Kurzschluss – zu untersuchen. Das Trafodesign sollte bei einem Sekundärstrom von 577 A für einen 60 ms anstehenden Fehlerstrom in der ersten Halbwelle auf einen Überstrom bei 15 kA begrenzen. Die erfolgreichen Abschlussmessungen umfassten die Bestimmung des statischen Parameters für die Nominallast, kalorimetrische Messungen der Verluste im Kryostaten und Messungen der gesamten elektrischen Verluste,



Abb. 1: Die wesentlichen Einzelteile des Transformators vor dem Zusammenbau.

Messungen bei verschiedenen Lastzuständen und schließlich das Strombegrenzungsverhalten.

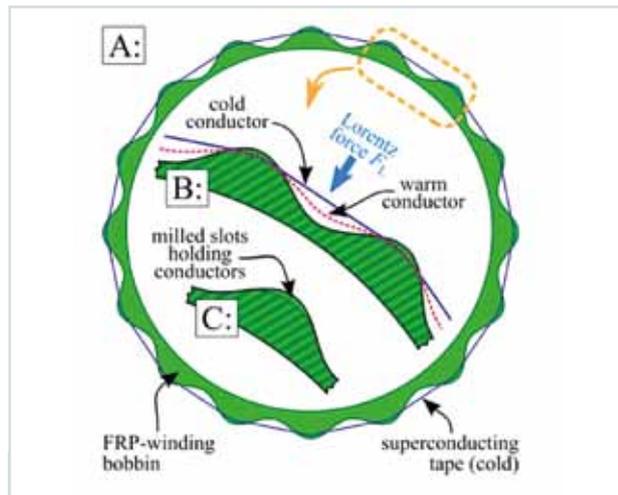


Abb. 2: Illustration des Wickelverfahrens der supraleitenden Sekundärwicklung unter verschiedenen Randbedingungen: warm, abgekühlt und mit Lorentzkraft.

Projekt SmartCoil

Im Projekt SmartCoil entwickelt das ITEP in Kooperation mit der Siemens AG eine supraleitende einphasige Reaktorspule mit variabler Impedanz (10 kV/600 A) zur Strombegrenzung im Netz. Das Projekt wird vom BMWi gefördert (FKZ: 03ET7525A). In Abbildung 3 ist das Funktionsprinzip des Reaktors dargestellt. Innerhalb einer primären Kupferwicklung befindet sich ein Glasfaserkunststoff-Kryostat mit einem Stapel von 40 supraleitenden Komponenten. Die Komponenten sind mit geschlossenen Abschirmringen aus Hochtemperatur-Supraleitern (REBCO-Bändern) bestückt – Enden per Kontakt verbunden –, die im normalen Betriebsmodus die Impedanz des Reaktors reduzieren. Im Strombegrenzungsfall (Überstrom innerhalb <100 ms) mit den Nominalwerten für Betriebsstrom ändert sich die Impedanz um einen Faktor vier und bewirkt damit eine Strombegrenzung.

Eine konstruktive Herausforderung des Projekts bestand darin, den Spalt zwischen der primären und der sekundären Wicklung zu minimieren, soweit es die konstruktiven Randbedingungen des Kryostaten zuließen, um die Streuimpedanzen möglichst zu reduzieren. Der Innenteil der Anordnung, der sämtliche Module trägt, wird von einem Verdrängungskörper gefüllt, um die Kühlmittelmenge und damit auch das Gewicht zu reduzieren. Die Auslegung des Kryostaten muss der Druckbehälterverordnung genügen.

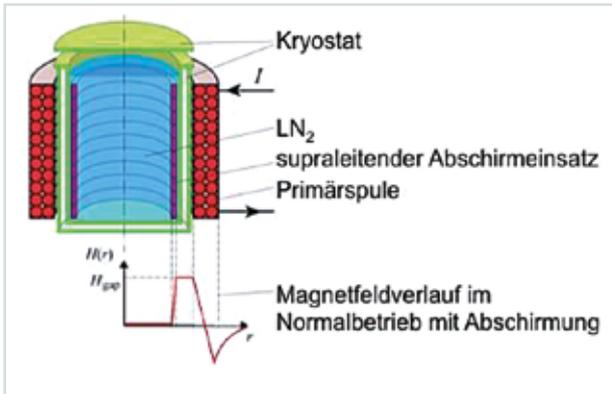


Abb. 3: Funktionsprinzip des SmartCoil-Reaktors.

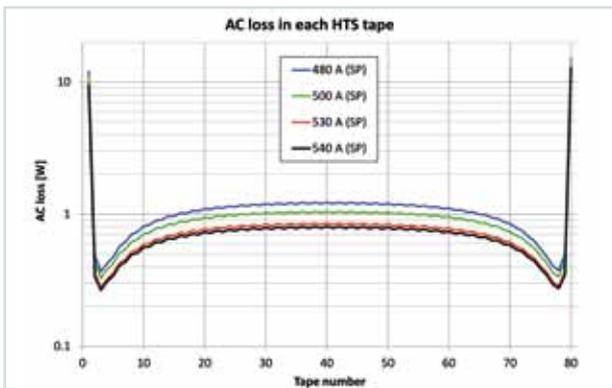


Abb. 4: Simulation der Wechselstromverluste im Stapel der Einzelkomponenten mit starkem Anstieg in den Endkomponenten (Verluste über Stapelachse).

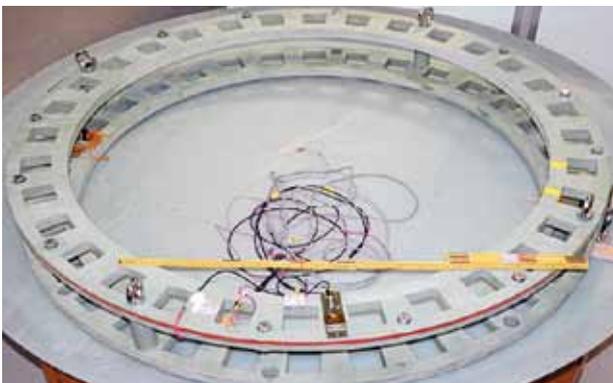


Abb. 5: Gesamtansicht einer Komponente aus GFK-Träger und zwei Bandleiterringen (Durchmesser ca. 1 m).

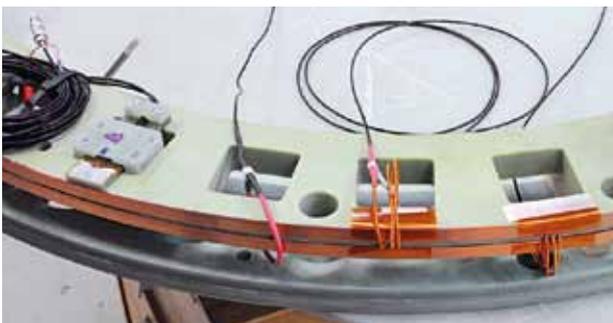


Abb. 6: Detailansicht der Komponente mit Bestückung der Sensorik Hallprobe (Magnetfelddetektion) und Rogowski-Spulen zur induktiven Strommessung.

Eine Simulation der Wechselstromverluste im Stapel der Komponenten ergab die Notwendigkeit, die Wechselstromverluste in den Endkomponenten zu reduzieren, weil sie in diesen drastisch ansteigen. Abbildung 4 zeigt die Modellierungsergebnisse. Erreichen lässt sich eine Reduzierung durch eine Doppelbestückung mit Bändern oder eine Selektion von Bändern mit der höchsten Stromtragfähigkeit für die Endkomponenten. Abbildung 5 zeigt die Gesamtansicht einer Komponente, Abbildung 6 die Teilansicht mit der bestückten Sensorik Hallprobe und Rogowski-Spule.

Die Tests der Komponenten umfassten sowohl einen DC-Test als auch einen AC-Test an den Einzelkomponenten. Das transiente Verhalten des Supraleiterrings während des Quenches im Begrenzungsfall wurde eingehend analysiert; das Resultat fiel positiv aus. Damit wurden die Auslegung und die Herstellung für die Serie qualifiziert. Die Serienfertigung und die entsprechenden Tests sowie der Zusammenbau der Anlage erfolgten beim Partner Siemens. Anfang 2018 soll der gesamte Reaktor beim Industriepartner getestet werden.

Supraleitende Stromschienen

Unter den Anwendungen der Supraleitung rücken supraleitende Stromschienen für extrem hohe Ströme in Industrie- und Forschungsanlagen zunehmend in den Fokus: Sie verringern den Platzbedarf deutlich, da sich mit ihnen extrem hohe Stromdichten erzielen lassen. Das KIT war am BMWi-geförderten Forschungsprojekt 3S beteiligt, das die Machbarkeit modular einsetzbarer Stromschienen für Industrieanwendungen demonstrierte (siehe Highlight 2).

VATESTA

Die variable Testanlage VATESTA besteht aus einem supraleitenden Solenoid mit einer Raumtemperaturbohrung von 0,8 m. Verfügbar sind ein Zentralfeld bis 5 T und ein Einsatzkryostat, der variable Temperaturen von ca. 10 K und höher gestattet, bei einem nutzbaren Durchmesser von ca 0,65 m und Stromzuführungen für 5 kA (Abbildung 7). Geplant ist, an VATESTA supraleitende Hochstromkabel, Kabelwicklungen und Subscale-Komponenten supraleitender Anwendungen zu testen. Die vom BMWi geförderte Anlage (FKZ: 03ET1058A) ist weltweit einzigartig.

Kontakt: Wilfried.Goldacker@kit.edu



Abb. 7: Die Anlage VATESTA mit dem Einsatzkryostaten.

Neue Anwendungen der Supraleitung

Im Bereich neuer Anwendungen der Supraleitung entwickeln Wissenschaftler des ITEP derzeit Anwendungen zum elektrischen Fliegen und zum supraleitenden Schweben.

Für das BMBF-Verbundprojekt Thermisch-elektrisch optimierte Luftfahrtantriebssysteme (TELOS), an dem das KIT, Airbus, Siemens, die TU München und Neue Materialien Bayreuth als Partner beteiligt sind, entwickelt das ITEP ein kompaktes und leichtes supraleitendes Gleichstromkabel für eine Leistung von 10 MW bei einer Spannung von 1,5 kV. Die Forscher des ITEP charakterisierten 2017 die Hochtemperatur-Supraleiter verschiedener Hersteller auf ihre Stromtragfähigkeit im vorgesehenen Temperaturbereich zwischen 68 und 77 K (Abbildung 8) und stellten niederohmige Kontakte zwischen den Supraleitern und zu Kupfer her. Weiterhin optimierten sie die Stromzuführung wegen der stark unterschiedlichen Belastungen in den verschiedenen Flugphasen für eine mittlere Last von 50 %. Der bisherige Verlauf des Projekts zeigte, dass die Anwendung der Supraleitung bei größeren Flugzeugen mit einer Leistung von bis zu 40 MW noch attraktiver ist; daher wurden die Projektziele entsprechend angepasst.

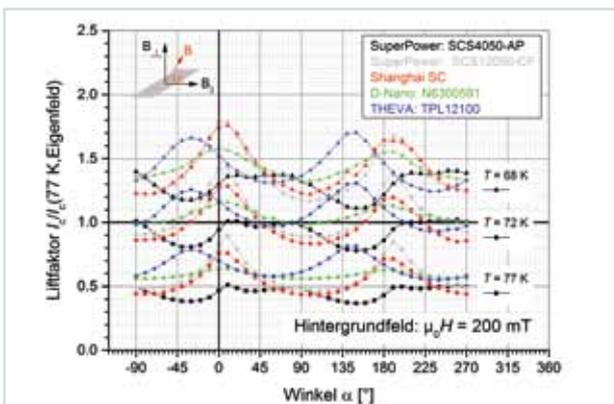


Abb. 8: Stromtragfähigkeit der Hochtemperatur-Supraleiter verschiedener Hersteller abhängig von Temperatur und Magnetfeldwinkel.

In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner begann die Betreuung von zwei neuen Doktorarbeiten. Diese zielen darauf, Simulationsmodelle und erste Demonstratoren zu supraleitenden Generatoren für elektrisch betriebene Flugzeuge zu entwickeln.

Die ursprünglich am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) in Dresden entwickelte und aufgebaute Demonstrationsanlage SupraTrans zum supraleitenden magnetischen Schweben wurde 2017 in Dresden abgebaut und am KIT wieder aufgebaut. Das ITEP betreibt sie nun in Freiluftumgebung weiter. Damit soll die Tauglichkeit des Konzepts für verschiedene Umgebungsbedingungen detailliert demonstriert werden. SupraTrans verwendet das bekannte Prinzip mit Permanentmagneten als Führungsschiene und Hochtempera-



Abb. 9: Das SupraTrans Transportsystem, basierend auf supraleitenden Magnetlagern.

tur-Supraleitern im Fahrzeug. Das auf supraleitenden Magnetlagern basierende Transportsystem zeichnet sich durch reibungsloses und eigenstabiles Schweben aus (Abbildung 9).

Ein vom ITEP zum Patent angemeldetes neues Verfahren zum vollständig supraleitenden Schweben verwendet stromleitende Supraleiter in der Führungsschiene und kann damit Energie und Güter gleichzeitig transportieren. Abbildung 10 zeigt die grundlegende Anordnung zum vollständig supraleitenden Schweben. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es effizienten Stromtransport und Gütertransport in der Führungsschiene kombiniert. 2017 wies eine studentische Arbeit das Funktionsprinzip experimentell nach; erste Berechnungen zur Magnetfeld- und Kraftverteilung wurden durchgeführt. Dabei bestand die Führungsschiene aus zwei CrossConductor Hochtemperatur-Supraleitern mit einer Stromtragfähigkeit von bis zu 3 kA bei 77 K. Nach dem erfolgreichen Funktionsnachweis erwägt das ITEP, eine erste Demonstrationsanlage zu entwickeln.

Kontakt: Mathias.Noel@kit.edu

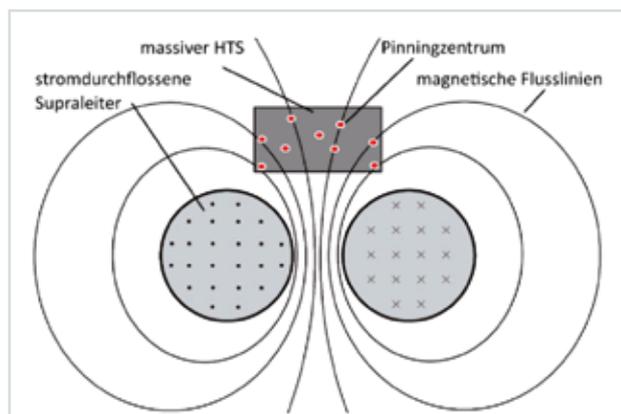


Abb. 10: Grundlegende Anordnung zum vollständig supraleitenden Schweben.

Modellierung von Supraleitern und Komponenten

Für Quenchuntersuchungen an Hochtemperatur-Supraleitern erstellte das ITEP einen neuen experimentellen Aufbau (siehe Highlight 1).

Im Rahmen des EU-geförderten Projekts ASuMED (Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator) erarbeitete das ITEP ein Modell zur Berechnung der AC-Verluste in Statorwicklungen von Motoren. Mit diesem Modell lässt sich die komplette Motorgeometrie simulieren. Die Simulation eines zeitabhängigen Prozesses würde die Simulation von mehreren AC-Zyklen erfordern, um transiente Effekte zu vermeiden. Dadurch würde die Simulation extrem umfangreich und wenig praktikabel werden. Als Alternative führten die Forscher eine Parameterstudie von statischen Simulationen durch, wobei sie die zeitliche Entwicklung des Stroms im Stator und die Rotation des Rotors berücksichtigten. Die magnetische Feldverteilung an den Positionen der Statorspulen, simuliert als Kupferwicklungen, wurde extrahiert (Abbildung 11) und als Randbedingung für entsprechende Berechnungen der AC-Verluste in supraleitenden Spulen benutzt.

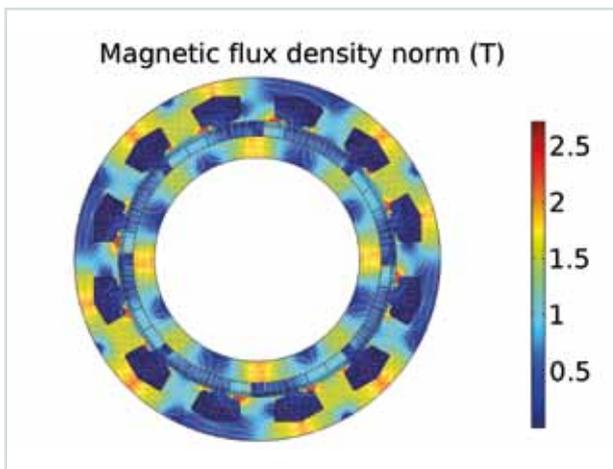


Abb. 11: Magnetische Feldverteilung in einem Motor.

Zur Berechnung der AC-Verluste in Hochfeldmagneten entwickelten die Forscher des ITEP numerische Modelle. Solche Magnete werden mit einer äußerst hohen Zahl von Leiterwindungen - typischerweise mehrere Tausend - gebaut. Die Simulation aller Windungen mit herkömmlichen Verfahren ist daher enorm aufwendig. Deshalb erarbeiteten die Wissenschaftler ein fortschrittliches Multi-Skalen-Modell. Mit einer uniformen Stromdichteverteilung in jedem Leiter beginnend, iteriert das Verfahren zu einer realistischeren Stromverteilung, bis ein Konvergenzkriterium erfüllt ist. Die Stromverteilung in den verbleibenden, nicht vollständig simulierten Leitern wird mit einer inversen kumulativen Dichte-Interpolationstechnik angenähert. Daraus ergibt sich eine realistischere Stromdichteverteilung, die eine bessere Bestimmung des Hintergrundfelds und daraus abgeleitet eine bessere Abschätzung der Hystereseverluste erlaubt. Die neue Methode ist flexibel genug, um verschiedene Bereiche des Systems

mit angemessenen Details zu simulieren, wobei sie eine höhere Rechengeschwindigkeit als andere Modelle bietet.

Im Rahmen des Stromschienenprojekts 3S setzten Forscher des ITEP ein numerisches Modell zur Abschätzung des kritischen Stroms einer supraleitenden DC-Stromschiene ein, die für eine Elektrolyseanlage vorgesehen war. Verschiedene Konfigurationen der Schiene wurden getestet und verglichen, um die Zahl der benötigten supraleitenden Bänder für den angestrebten kritischen Strom von 20 kA zu minimieren. Sowohl zur Optimierung der Kontakte der Stromspeisung als auch zur Berechnung der Energieverluste durch die überlagerten Anteile der verbliebenen AC Ripple auf dem DC-Strom setzten die Forscher numerische Modelle ein.

Numerische Modelle dienen auch dazu, die Unsymmetrie der Winkelabhängigkeit $I_c(B, \theta)$ der HTS Coated Conductors auszunutzen, um die Stromtragfähigkeit in daraus gefertigten Kabeln zu verbessern. Besonders die Simulationen für ein Kabel aus zwei Leiterstapeln mit je 20 Bändern zeigten, dass sich mit einer Orientierung der Einzelbänder in die günstigste Ausrichtung zum Magnetfeld (geringste Feldabhängigkeit) eine Stromerhöhung des Kabels um insgesamt 12 % erzielen lässt.

Stapel supraleitender Bänder können die Funktion von Bulkproben in der Anwendung als Permanentmagnet übernehmen und gestatten darüber hinaus eine viel größere Flexibilität der gewünschten Geometrie und Feldverteilung. Für diese Anwendung von Stapeln supraleitender Bänder entwickelten und nutzten Forscher des ITEP ein elektromagnetisches 3D-Modell, um die Performance von konventionellen flachen und innovativen gebogenen Stapeln zu simulieren. Die gebogenen Stapel sind aufgrund ihrer geometrisch anpassbaren Form besonders interessant für die Anwendung in Rotoren rotierender Maschinen. Die erzielten Ergebnisse zum eingefangenen magnetischen Fluss wurden mit experimentellen Messungen verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung (Abbildung 12). Kontakt: Francesco.Grilli@kit.edu

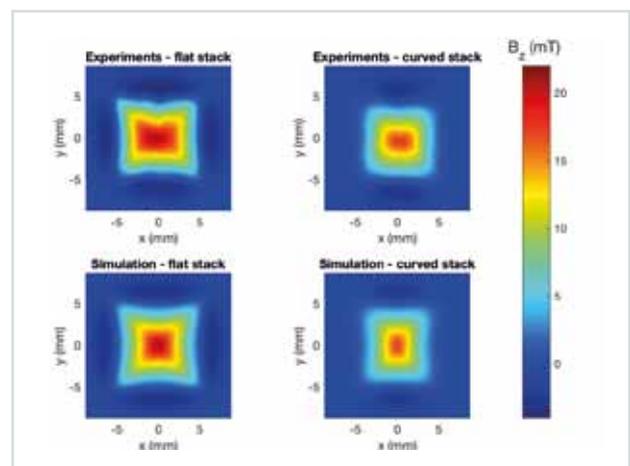


Abb. 12: Simulationen der Feldverteilung in flachen (links) und gekrümmten (rechts) Bandleiterstapeln.

Echtzeit-Systemintegration

Im Bereich Echtzeit-Simulation und Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) ergaben sich 2017 weitreichende Entwicklungen in den Bereichen Systemaufbau, Echtzeit-Modellierung und Datenakquise.

Für den Aufbau der 1 MVA-PHIL-Laborumgebung des Energy Lab 2.0 wurde der Bau eines Vier-Quadranten-Verstärkersystems beauftragt. Zudem wurde die Anschaffung des Echtzeit-Simulationssystems abgeschlossen. Die Beschaffung der Hauptkomponenten bildet einen wichtigen Meilenstein des Projekts. Nach der Fertigstellung der Laborhalle, die für September 2018 vorgesehen ist, wird die Hardware neben weiteren Komponenten darin aufgebaut. Der Aufbau der Komponenten der 1 MVA-Anlage und der Infrastruktur soll möglichst zeitlich abgestimmt erfolgen.

Nachdem die komplette 30 kVA-Trainingsstation 2016 fertiggestellt und abgenommen worden war, erzielte das ITEP 2017 große Fortschritte bei der Implementierung erster detaillierter Echtzeit-Simulationsmodelle von auf neuen Technologien basierenden Betriebsmitteln. Die Forscher erstellten und validierten beispielsweise Umsetzungen parametrisierbarer Echtzeit-Modelle resistiver und induktiver supraleitender Kurzschluss-Strombegrenzer, basierend auf der Finiten Differenzen Methode, die erstmals Rückkühlungseffekte berücksichtigen. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse einer Echtzeit-Simulation eines Schwungmassen-Energiespeichersystems. Einige dieser Simulationen wurden auch schon in geschlossenem Kreis im Teststand mit realer Hardware betrieben. Weitere Fortschritte erzielten die Wissenschaftler bei der Implementierung von Schnittstellen-Algorithmen, die einen sicheren Betrieb auch bei variabler Impedanz des Betriebsmittels erlauben.

Das ITEP erstellte mehrere Beispielanwendungen von Niederspannungsnetzen, die in eine Echtzeit-Simulation und -Regelung der Netzumgebung reale erneuerbare Energien – besonders Solarenergie –, Lasten sowie Ener-

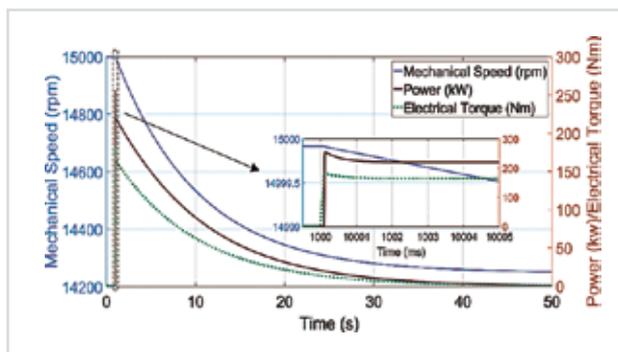


Abb. 13: Echtzeit-Simulation eines Schwungmassen-Energiespeichersystems. Der Schwungmassenspeicher läuft mit der Nenndrehzahl von 15 000 U/min. Bei $t = 1$ s wird ein Befehl zum Reduzieren der Geschwindigkeit um 5 % an die Steuerung gesendet. Das System erreicht bei $t = 50$ s die neue Drehzahl von 14 250 U/min und erzeugt eine Leistung von bis zu 250 kW. So könnte beispielsweise ein plötzlicher Stromausfall im Netz kompensiert werden.

giespeichereinheiten einbinden. Eine solche Anwendung wurde interessierten Besuchern am Tag der offenen Tür am KIT Campus Nord vorgeführt.

In der Forschungspartnerschaft Energie nahm das ITEP zusammen mit dem Institut für Angewandte Informatik sowie dem Netzservice der Stadtwerke Karlsruhe Datenmessungen im Stadtnetz auf der 400 V-Niederspannungsseite von Ortsnetztransformatoren vor. Anhand solcher Messungen und deren Vergleich mit Simulationen lassen sich prinzipiell Probleme im Netz erkennen. Mithilfe von Echtzeit-Simulationen und PHIL-Tests lassen sich Maßnahmen zum Netzausbau ergreifen, wie der Einbau geeigneter Energiespeicher, die solchen Problemen entgegenwirken bzw. sie beheben. Abbildung 14 stellt exemplarisch einen Ausschnitt einer solchen Messung dar.

Das ITEP baute überdies analoge Messsysteme für die Laborumgebungen auf und unternahm erste Schritte zur Erstellung einer digitalen Messeinheit mit Abstraten im MHz-Bereich und der Möglichkeit der Datenverarbeitungsvorbereitung.

Im Jahr 2017 hieß die Gruppe mehrere internationale Besucher willkommen. Während eines Aufenthalts von Professor Kosonen von der Laapeenranta University of Technology liefen Arbeiten zur Nachbildung eines Alkali-Elektrolyseurs, um mögliche Tests eines Gleichrichterkonzepts, bei dem eine hochfrequente AC-Komponente die DC-Komponente überlagert, in der Anlage vorzubereiten. Peter O'Brien (Queensland University of Technology) arbeitete während seines Aufenthalts am ITEP an der Echtzeit-Simulation supraleitender elektrischer Maschinen.

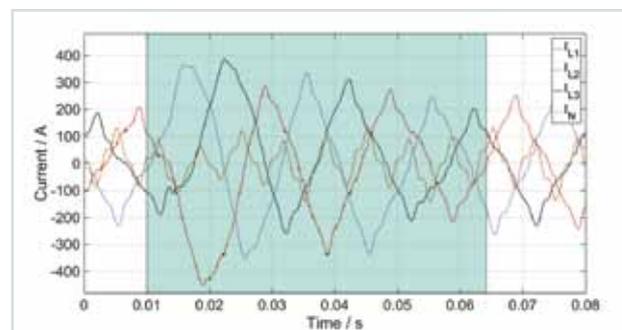


Abb. 14: Zeitlich hochaufgelöste Messung der Stromstärke im Niederspannungsnetz der Stadt Karlsruhe (Abtastrate $f_s = 25$ kHz, drei Phasen und Neutralleiter). Die kurzzeitig signifikante Lastschwankung (hellgrün unterlegt) mit einer Amplitudenänderung um etwa 200 A auf allen drei Phasen wurde mithilfe eines automatisierten Algorithmus in der mehrwöchigen Messkampagne detektiert.

Kontakt: Joern.Geisbusch@kit.edu

Highlights

Quenchdetektion mit Fluoreszenzverfahren

Hochtemperatur-Supraleiter, wie dünne REBCO-Bänder, besitzen hervorragende mechanische Eigenschaften und können hohe Ströme auch in hohen Magnetfeldern transportieren. Allerdings muss besonders das Quenchverhalten solcher Bandleiter noch genauer untersucht werden. Um supraleitende Kabel und Geräte vor irreparablen Schäden durch Joulesche Erwärmung während eines Quenchs zu schützen, sind sowohl Temperaturmessungen als auch Schutzmaßnahmen notwendig.

Zur Visualisierung und Messung von Temperaturen während eines Quenchs entwickelten Forscher des ITEP eine neue Methode, die Temperaturen über eine 2D-Oberfläche berechnet. Als Basis dient das in den 80er-Jahren entwickelte Fluorescent Microthermographic Imaging (Fluoreszente Wärmebildtechnik), das ursprünglich dazu bestimmt war, Temperaturen in integrierten Schaltkreisen genauer zu messen, als es mit traditioneller Infrarot-Wärmebildtechnik möglich ist.

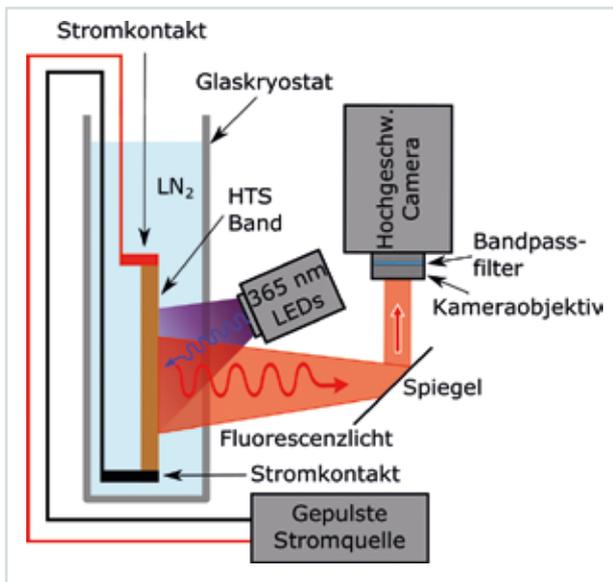


Abb. 15: Der Messaufbau zeigt ein HTS-Band in einer senkrechten Anordnung.

Die Methode basiert auf der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz in einer Europium-Beschichtung: Bei niedrigeren Temperaturen wird mehr, bei höheren Temperaturen wird weniger Licht emittiert. Durch die Aufnahme von Schwankungen des emittierten Lichts einer beschichteten Oberfläche mit einer Kamera lässt sich die Oberflächentemperatur visualisieren. Um die genaue Temperatur zu berechnen, ist eine Referenzmessung erforderlich. Dabei wird die Temperaturabhängigkeit der Intensität der Fluoreszenz in kleinen Schritten gemessen, woraus sich eine charakteristische Referenz für die Temperaturmessung ergibt. Anhand dieser Kalibrationsmessung lassen sich dann die Temperaturen für alle Punkte in einem Fluoreszenzstrahlungsbild berechnen.

Forscher des KIT entwickelten die Methode weiter: Statt mit einem Mikroskop werden die Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera in einem Flüssig-Stickstoff-Bad gemacht (15). Dies ermöglicht, die Erwärmung supraleitender Bänder während eines innerhalb weniger Millisekunden ablaufenden Quenchs zu messen. So las-

sen sich 2D-Temperaturverteilungen im Bereich von 77 bis 260 K bei Aufnahmegeschwindigkeiten von 2500 Aufnahmen pro Sekunde visualisieren. Abbildung 16 zeigt die Erwärmung eines nicht stabilisierten HTS-Bands 10 ms nach einem Strompuls. Die Messung zeigt, wie während eines Quenchs ein immer größer werdender Teil des Bands in den normalleitenden Zustand übergeht und sich von 77 K auf über 260 K erwärmt.

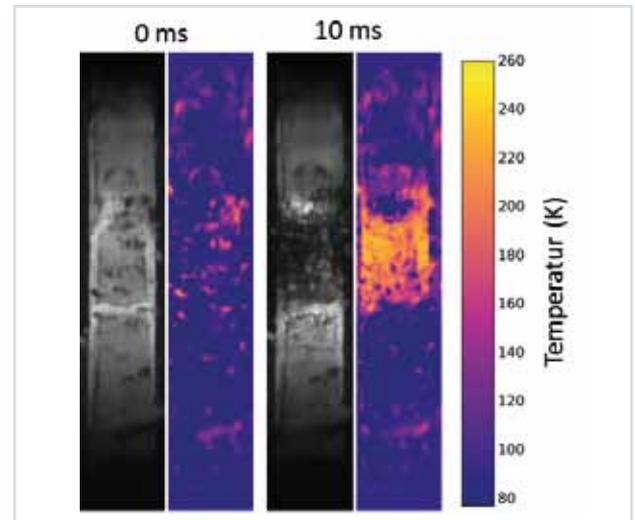


Abb. 16: Erwärmung eines nicht stabilisierten supraleitenden Bands während eines Quenchs im flüssigen Stickstoffbad. Der Quench wurde durch einen Magneten und einen hohen Strompuls erzeugt. Zu sehen sind jeweils ein Bild der Kamera und ein thermisches Bild.

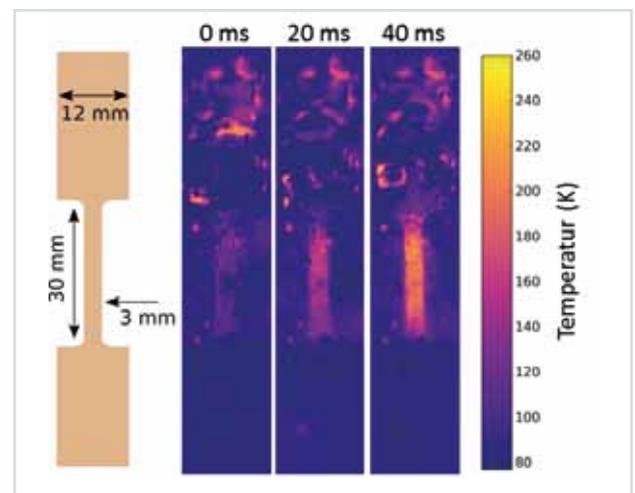


Abb. 17: Erwärmung eines 20 µm kupferstabilisierten supraleitenden Bands während eines Quenchs im flüssigen Stickstoffbad. Der Quench wurde durch die Struktur des Bandleiters (links) ausgelöst.

Abbildung 17 zeigt das Quenchverhalten eines strukturierten, 20 µm kupferstabilisierten HTS-Bands. Dank der Kupferdeckschicht erwärmt sich der schwächere Teil des Bands einheitlich bis zur oberen Messgrenze von 260 K und höchstwahrscheinlich darüber hinaus. Die neue Methode bietet einen direkten Einblick in das Temperaturprofil eines Quenchs und einen Zugang zu Ausbreitungsgeschwindigkeiten der normalleitenden Zone.

Kontakt: Roland.Gyuraki@kit.edu

Highlight 2 Projekt 3S – Supraleitende Stromschiene

Supraleitende Hochstromtrassen bieten sich als energieeffiziente Lösungen für vielfältige industrielle Anwendungen an, wie Elektrolyseanlagen in der chemischen Industrie (20 bis 80 kA), Aluminiumwerke (bis 500 kA) oder die Stromversorgung von Datenzentren (15 bis 40 kA). Der entscheidende Vorteil besteht in einer Reduktion des Strom tragenden Querschnitts der Trasse um ca. einen Faktor zehn, verbunden mit einer entsprechenden Gewichtsreduktion. Ziel des BMWi-geförderten Projekts (FKZ: 03ET1294B) 3S war die Entwicklung des Subscale-Moduls einer supraleitenden modularen Gleichstromtrasse für die erste Pilotanwendung in einer Elektrolyseanlage der BASF. Die größten Herausforderungen der Entwicklung stellten das Kabeldesign, die möglichst verlustarmen und kompakten Stromzuführungen zum Supraleiter sowie eine niederohmige Kontaktierungsmethode der Trassensegmente dar.

In einer Kooperation mit Vision Electric Super Conductors (VESC) und dem ILK Dresden entwickelte das ITEP ein Konzept für eine Stromtrasse auf der Basis von getesteten und qualifizierten industriellen REBCO-Supraleitern einschließlich einer innovativen Kontaktierungsmethode (Patent eingereicht) zur Verbindung der Trassenmodule. Wichtige Voruntersuchungen umfassten die Messung der Anisotropie der supraleitenden Ströme der infrage kommenden Bandleiter in moderatem Hintergrundfeld, die Modellierung der Eigenfelder im Kabel und die eingehende Untersuchung des Einflusses der AC-Anteile (AC Ripple) des DC-Stroms, wie sie im realen Anwendungsfall einer Elektrolyseanlage vorliegen. Zur Verifikation der Entwicklungen fertigten die Forscher ein Subscale-Kabel, beaufschlagten es in einem speziell konfigurierten Messstand des KIT mit dem Zielstrom von 20 kA und vermaßen das Kurzschlussverhalten.

Für das einpolige Kabel waren die folgenden Eckdaten gefordert: Prüfspannung 5 kV, Auslegung auf nominal 20 kA DC-Strom, zulässiger AC Ripple: ± 0.5 kA, Überlastsicherheit für Kurzschlussströme bis 33 kA über 100 ms. Simulationen am KIT für ein optimiertes verlustarmes Design ergaben als günstigste Lösung einen Aufbau aus zwei Bandstapeln. Diese wurden in einen Stützkäfig aus Stahlblech eingebaut. Der Käfig dient zur Ableitung von Lorentzkräften aus den Eigenfeldern der fließenden Ströme und erzwingt durch die spezielle Profilierung eine wellenförmige flexible Formgebung des Bandstapels zur Kompensation thermischer Ausdehnungen und mechanischer Belastungen (Abbildung 18). Die Verbindung der Bandstapel wurde realisiert durch innovative kammartig strukturierte Kupferblöcke mit einem äußerst niedrigen Kontaktwiderstand in der Größenordnung von 1 nOhm, entsprechend einer Verlustleistung von 0,4 W pro Verbindung. Das Kontaktierungsverfahren wurde gezielt für den Feldeinsatz am Einsatzort entwickelt und ausgelegt und stellt einen entscheidenden Aspekt des modularen Stromschiene-Konzepts dar.

Spezifikationen und Eckdaten zum Subsize-Kabel und zum Testablauf im GFK-Kryostat (Abbildung 19):

- Kabelquerschnitt in Originalskalierung
- zwei Strands (Bandstapel) = 2 x 23 Supraleiterbänder
- drei Elemente in der Reihe mit je 70 cm Länge
- zwei Verbindungskontakte und zwei Endkontakte implementiert

- Betrieb im offenen Flüssig-Stickstoff-Bad ($T = 77$ K)
- Messung 1: Strands separat $I = 0$ bis 10 kA
- Messung 2: Strands in Serie geschaltet
- Testströme bis $I = 0$ bis 10 kA DC (Einzelstrand)
- Kurzschlussstest bis 20 kA für 100 ms
- DC 10 kA (Einzelstrand) – zur Verifizierung nach Kurzschlussstest

Der Kurzschlussstrom von 20 kA pro Strand (= 40 kA für das Kabel) wurde über die geforderte Dauer von 100 ms ohne Degradation beaufschlagt. Das Kabel überstand alle Messungen ohne Probleme. Somit stellt es das erste modulare DC-Industriekabel aus Hochtemperatur-Supraleitern der Stromklasse 20 kA dar. Das Kabel befindet sich an der Schwelle zum Produkt. VESC montierte ein Pilotkabel von 25 m Länge in einer Elektrolyseanlage der BASF. Testphase und Bewährungsbetrieb sind für 2018 geplant.

Kontakt: Andrej.Kudymow@kit.edu



Abb. 18: Subsize-Stromschiene aus drei Segmenten mit zwei Verbindungskontakten und zwei Strom-einkopplungen.

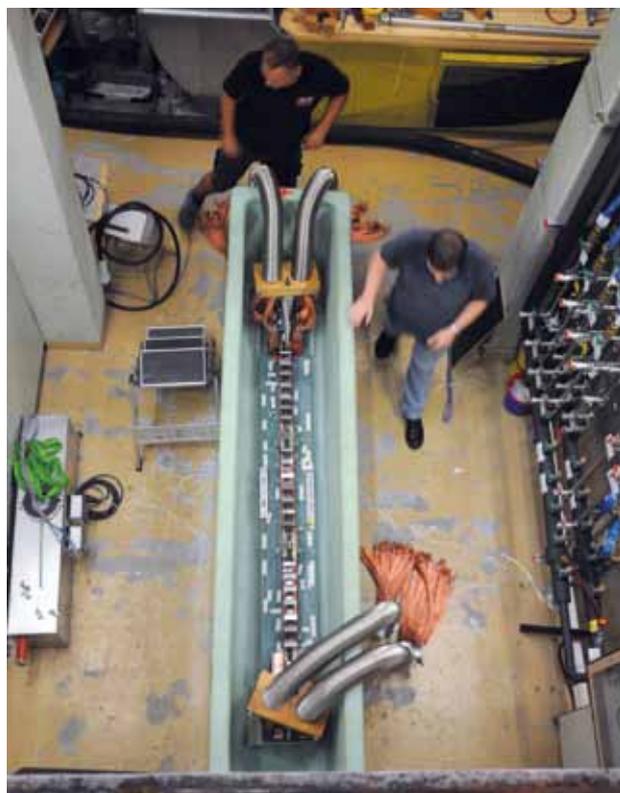


Abb. 19: Transportstrommessung – Subsize-Stromschiene in GFK-Kryostatwanne eingebaut und mit 20 kA-Stromkabeln kontaktiert.



Übergabe der letzten zehn am KIT gebauten JT60-SA Stromzuführungen in Naka (Japan).



Die Personen, die Konstruktion, Bau und Test der JT60-SA Stromzuführungen am KIT ermöglicht haben.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Supraleitende Magnettechnologie

Koordination: Dr. Walter Fietz

Das Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie am ITEP baut auf einer langjährigen Expertise auf, gewonnen in zahlreichen Großexperimenten, wie dem Bau und Test der LCT-Spule oder der ITER-Modellspule TFMC. Gegenwärtig nutzt das ITEP das verfügbare Wissen über Auslegung, Bau und Test von Magneten und Magnetkomponenten in den folgenden Bereichen:

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

Der Bereich **Spulentechnologie** zielt auf höchste Magnetfelder, die sich mit rein supraleitenden Leitern erreichen lassen. Seit Langem ist er eng verknüpft mit der Weiterentwicklung der NMR-Technik hin zu höchsten Feldern. Aktuell steht der Einsatz von Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)-Materialien im Fokus, um in der Hochfeldexperimentieranlage HOMER II ein Magnetfeld von 25 T zu erreichen.

Die Arbeiten im Bereich **HTS-Fusionsmagnete und -Stromzuführungen** waren lange auf Entwicklung, Bau und Test von HTS-Stromzuführungen (SZF) fokussiert. 2017 stellte das ITEP die letzten Stromzuführungen für den japanischen Tokamak JT60-SA fertig (siehe Highlight 1). Erstmals wurde auch eine 20 kA-SZF mit dem HTS-Material REBCO entwickelt und erfolgreich getestet (siehe Highlight 2). REBCO steht auch im Fokus der Entwicklung des Leiters HTS CroCo und der konzeptionellen Auslegung eines TF-Fusionsmagneten mit solchen Leitern. Neben diesen Arbeiten unterstützt das ITEP die im Bau befindlichen Tokamaks ITER und JT60-SA durch zahlreiche kryogene Materialuntersuchungen sowie die Optimierung von Strukturmaterialien.

Im Bereich **Rotierende Maschinen** laufen hauptsächlich Forschungsarbeiten zu supraleitenden Generatoren, beispielsweise supraleitenden DC-Generatoren für Windkraftanlagen.

Um die industrielle Umsetzung der Erkenntnisse aus dem Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie voranzutreiben, befasst sich das ITEP im Bereich **Industrieanwendungen** mit der Entwicklung von Induktionsheizern und der Weiterentwicklung der NMR-Technik.

Kontakt: Walter.Fietz@kit.edu

Spulentechnologie

Supraleitende Hochfeldmagnete

HOMER II Upgrade

Die seit 2006 betriebene Hochfeldexperimentieranlage HOMER II stellt in der derzeitigen Ausbaustufe eine ma-

ximale Feldstärke von 20 T in einer großen Bohrung von 185 mm Durchmesser bereit. Ziel ist nun, HOMER II auf 25 T auszubauen. Dazu wird eine zusätzliche Einsatzspule hinzugefügt, die aufgrund der hohen Feldstärke aus HTS bestehen muss. Das ITEP hat in den vergangenen beiden Jahren die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen, um dieses Upgrade von HOMER II nun anzugehen:

- Fast alle kommerziell verfügbaren REBCO-HTS-Typen wurden mit Blick auf die geplante Anwendung hinsichtlich Stromtragfähigkeit im Magnetfeld, Anisotropieverhalten, Lorentzkraft-Belastbarkeit sowie Verträglichkeit mit superfluidem Helium charakterisiert.
- Obwohl HTS-Großlängen auf dem Markt nur begrenzt verfügbar sind, gelang es dem ITEP, vom aussichtsreichsten Leitertyp, FYSC-SC05 des Herstellers Fujikura, insgesamt 2380 m in neun Teillängen bis 460 m zu beziehen.
- Über eine Optimierung der Parameter Feldhomogenität, verfügbare Leiterstücklängen und I_c -Auslastung erstellten die Forscher ein Magnetdesign für die 5 T-Einsatzspule. Das Design sieht fünf ineinandergeschachtelte, seriell betriebene und in Lage gewickelte Einzelsektionen aus insgesamt 1670 m HTS mit einer freien Bohrung von 68 mm Durchmesser vor.
- Zur Validierung des Wickelkonzepts und der Spulenkonstruktion fertigten die Wissenschaftler eine 18-lagige Prototyp-Spule aus einer der bezogenen Teillängen des Fujikura-HTS und testeten sie erfolgreich in HOMER I in Hintergrundfeldern bis 14 T und unter maximalen Lorentzkraft-Belastungen von 476 MPa.

Anfang 2017 war die Konstruktion der fünf Einzelsektionen der 5 T-Einsatzspule mit über 150 Teilzeichnungen



Abb. 1: Fertiggestellte Einzelsektionen der 5 T-REBCO-HTS-Einsatzspule für HOMER II.

abgeschlossen. Die Verbundwerkstatt des Instituts fertigte daraufhin die Einzelteile. Anschließend wurden in der wieder in Betrieb genommenen Wickelhalle die Sektionen gewickelt und an einer neu aufgebauten Apparatur mit Wachs imprägniert. Eine jeweils auf der äußeren Wickelage aufgebrachte und zur Elimination von induktiven Spannungsanteilen gegensätzlich gepolte Kompensationswicklung aus Kupferlackdraht dient über eine abgleichbare Brückenschaltung der Quenchedetektion. Abschließend wurden die Sektionen mit Glasseidenband bandagiert; die Oberfläche wurde mit Epoxidharz gegen äußere Einflüsse versiegelt. Abbildung 1 zeigt die fünf fertiggestellten Einzelsektionen der 5 T-Einsatzspule für HOMER II. Zusammenbau und Test sind für 2018 geplant.

Infrastruktur und Technik des Hochfeldlabors

Um weiterhin einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten sowie die Voraussetzungen für zukünftige Aufgaben zu schaffen, nahm das ITEP 2017 zahlreiche Instandhaltungsmaßnahmen und Upgrades der Infrastruktur und Technik des Hochfeldlabors mit seinen supraleitenden Hochfeldmagnetsystemen und dem dazugehörigen Technikum vor. Nachdem der erste Bauabschnitt der energetischen Sanierung der Wickelhalle Ende 2016 abgeschlossen worden war, wurde das umfangreiche Equipment nach einer Generalüberholung wieder aufgebaut und in Betrieb genommen. Für die Arbeiten 2017 wurde darüber hinaus eine Apparatur zur Vakuumimprägnierung von Spulen mit Wachs im Technikum aufgebaut: Ein geeigneter Vakuumbehälter wurde installiert und mit Pumpen, Heizung, Sensorik und Messwerterfassung versehen. Durch den Verguss eines Wickelpaketes werden dessen einzelne Windungen mechanisch fixiert, was wegen der einwirkenden magnetischen Lorentzkräfte für einen störungsfreien Betrieb einer supraleitenden Spule enorm wichtig ist. Bei den aktuell verfügbaren HTS auf REBCO-Basis hat sich Wachs als ideales Vergussmaterial erwiesen – der Einsatz der dazu üblicherweise verwendeten Kunstharze birgt durch eine zu starke Verklebung die große Gefahr einer Delamination des Supraleiters und damit einer Zerstörung der Spule beim späteren Betrieb.

Weiterhin unterzog das ITEP im Hochfeldlabor sämtliche Netzgeräte mit Stromstärken bis zu 3000 A, die zur Bestromung von Hochfeldmagneten und Testobjekten eingesetzt werden, einer umfangreichen Revision. Vor allem stellte es die Ansteuerung der Geräte von analog auf digital um. Die Geräte lassen sich so über den PC bedienen, und die einzustellenden Ströme lassen sich künftig direkt aus einer Mess-Software anfahren. Zugleich wurde die Messung der Ströme selbst umgestellt: von der Shunt-Methode auf das wesentlich genauere DCCT (Direct Current-Current Transformer) -Verfahren.

Die Messmöglichkeiten der Apparatur JUMBO, mit der Magnetfelder bis 15 T in einer Bohrung von 44 mm zugänglich sind, wurden 2017 ebenfalls deutlich erweitert. Neben dem kritischen Strom I_c und dessen Magnetfeld- und Winkelabhängigkeit bei 4,2 K sowie 77 K lassen sich nun auch die kritische Temperatur, die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands und das Restwiderstandsverhältnis bestimmen. Die Kenntnis all dieser Materialgrößen ist essenziell für die Anwendung von Supraleitern im Spulenbau.

Kontakt: Frank.Hornung@kit.edu

HTS-Fusionsmagnete und -Stromzuführungen

Designkonzept einer TF-Spule für DEMO

2017 arbeitete das ITEP weiter am Konzept einer TF-Spule mit REBCO-Bandleitern für den Fusionsreaktor DEMO. Die Ergebnisse der 2016 vorgenommenen strukturellen Analyse bewogen die Forscher dazu, das Leiterkonzept zu ändern – weg vom flachen Rutherkabel, hin zu einem runden Aufbau mit sechs CroCos um eine zentrale Kupferseele (Abbildung 2). Der gezeigte Leiter ist für einen Betriebsstrom von 50 kA bei 4,5 K und 12 T ausgelegt ($I_c = 72,8$ kA).

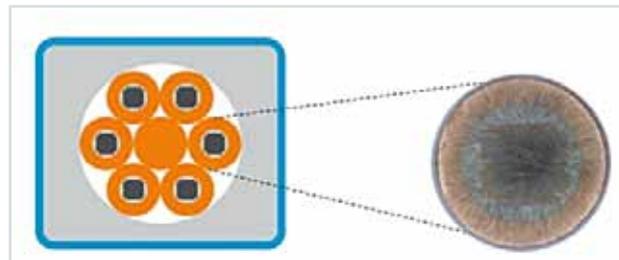


Abb. 2: HTS CroCo (links) und 50 kA-Fusionsleiter mit sechs HTS CroCos um einen zentralen Cu-Kern in einer Stahlhülle (schematische Darstellung, rechts).

Mit diesem Leiter soll das Wicklungspaket in zwölf Lagen bei 24 Windungen pro Lage erstellt werden. Die Lagenwicklung ermöglicht, die Stahlhülle an die auftretenden Magnetkräfte anzupassen (Abbildung 3).

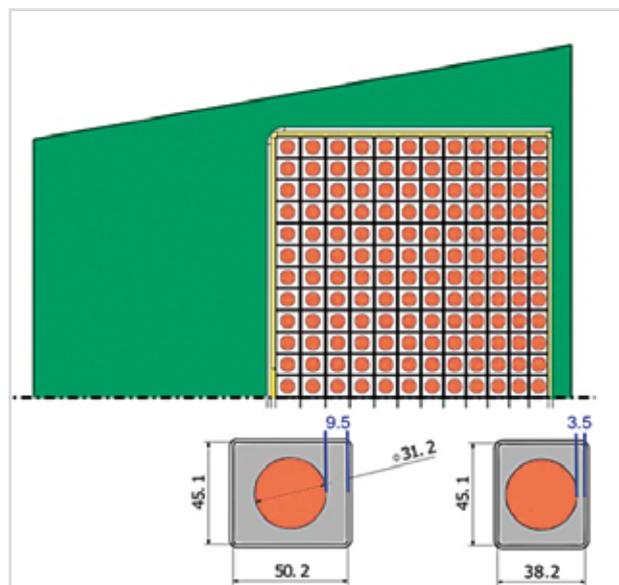


Abb. 3: Spulenquerschnitt der TF-Spule für den Fusionsreaktor DEMO sowie Leiterquerschnitt mit einer an die wachsenden Kräfte angepassten Stahlhülle.

Forscher des ITEP zeigten, dass ein TF-System mit dem vorgeschlagenen Wicklungspaket das geforderte Torusfeld von 5,66 T bei einem Betriebsstrom von 50 kA erzeugen kann und dabei eine Temperaturmarge von > 9 K aufweist.

Zur Analyse des Wicklungspaketes nahmen die Wissenschaftler elektromagnetische, thermohydraulische und mechanische Untersuchungen vor. Eine eindimensionale

Quenchanalyse des HTS-Leiters ergab Maximaltemperaturen von 226 K im HTS-Kabel sowie von 172 K in der Leiterhülle. Die strukturmechanischen Untersuchungen zeigten sowohl für die Leiterhülle als auch für die Leiterisolation Werte unterhalb der Auslegungsgrenzen.

Kontakt: Reinhard.Heller@kit.edu

HTS CrossConductor

2017 baute das ITEP die Fertigung und Charakterisierung von HTS CrossConductor (HTS CroCo)-Proben aus und erzielte weitere wichtige Ergebnisse. So fertigten die Wissenschaftler tordierte HTS CroCo-Leiter mit den kleinstmöglichen kommerziell erhältlichen REBCO-Supraleitern. Mit diesen nur 2 und 3 mm breiten Bändern wurde ein vollständig mit REBCO-Supraleitern bestückter HTS CroCo mit einem Durchmesser von nur 3,6 mm realisiert und auf seine Stromtragfähigkeit untersucht. Abbildung 4 zeigt ein Foto sowie den Querschnitt des Leiters.

Die Forscher nahmen Messungen des kritischen Stroms in flüssigem Stickstoff bei 77 K sowie bei tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern vor. Im LN₂-Bad wurde ein kritischer Strom von 1460 A erreicht, bei $T = 4.2$ K und $B = 12$ T ein kritischer Strom von 4,9 kA. Die Feldabhängigkeit des kritischen Stroms entspricht den Erwartungen von skalierten Einzelbanddaten (Abbildung 5). Der letztere Wert entspricht einer Stromdichte von 482 A/mm², bezogen auf die Projektionsfläche entlang des Leiters. Dieser Wert liegt deutlich über den experimentell nachgewiesenen Werten anderer runder Leiterkonzepte.

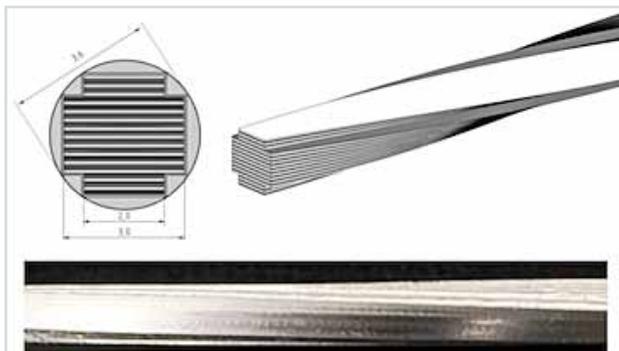


Abb. 4: Foto und schematischer Querschnitt des tordierten HTS CroCos aus 2 und 3 mm breiten Bändern.

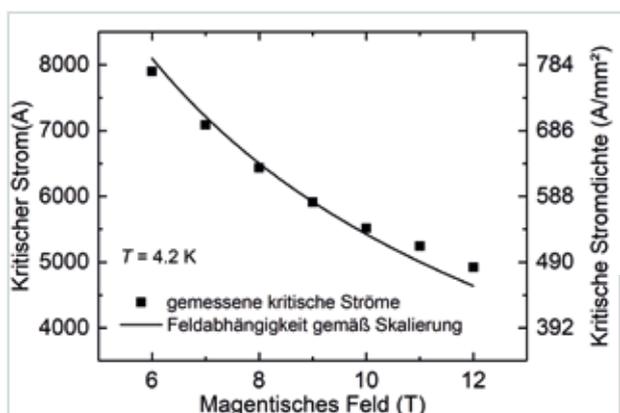


Abb. 5: Feldabhängigkeit des kritischen Stroms bei 4,2 K.

Beim Einsatz in Fusionsmagneten treten durch die hohen Ströme und Magnetfelder große elektromechanische Kräfte auf. Deshalb wurden HTS CroCo-Proben aus 4 und 3 mm breiten Supraleiterbändern verschiedener Hersteller gefertigt und axialen und transversalen Kräften ausgesetzt. Dazu wurden die im CryoMaK vorhandenen mechanischen Prüfeinrichtungen erweitert, um direkt unter Last die kritischen Ströme ermitteln zu können. Abbildung 6 zeigt den Aufbau zur Transversaldruckmessung an HTS CroCos.

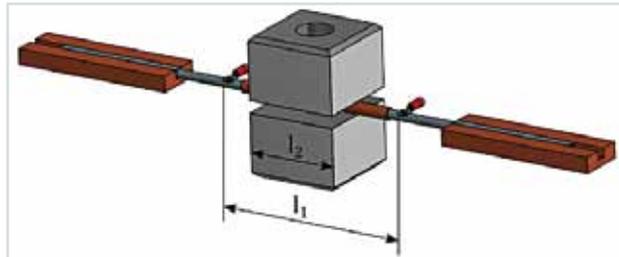


Abb. 6: Schema des Messaufbaus zur Bestimmung der Transversaldruckabhängigkeit von HTS CroCos.

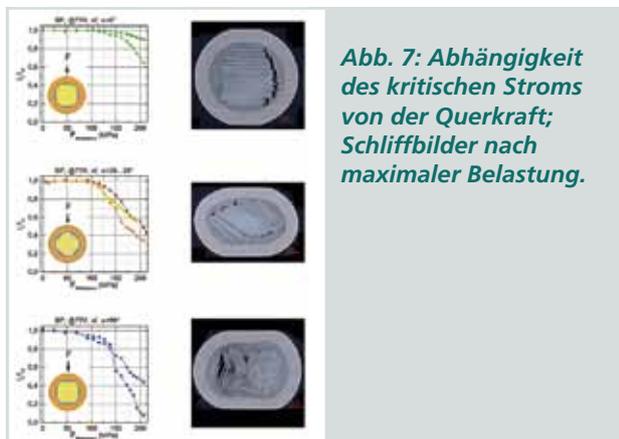


Abb. 7: Abhängigkeit des kritischen Stroms von der Querkraft; Schliffbilder nach maximaler Belastung.

Aufgrund des Stapelaufbaus des HTS CroCos sind die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig. Deshalb geschah die Bestimmung des kritischen Stroms unter transversalem Druck bei unterschiedlichen Belastungsrichtungen. Abbildung 7 zeigt links den kritischen Strom als Funktion der Kraft für Belastungen unter Winkeln von 0°, 37° und 90°.

Querschliffe nach erfolgter Maximalbelastung von ca. 90 kN (7 rechts) liefern wichtige Hinweise auf die Degradationsmechanismen. So ist beispielsweise bei einer Belastung schräg zu den Bändern ein Abgleiten der Bänder zu sehen; bei einer Belastung senkrecht zu den Bändern sind ein Abknicken und eine Delamination einzelner Bänder zu beobachten. Allerdings ist anzumerken, dass nach diesen Ergebnissen die bei einem Fusionskabel zu erwartenden Lorentzkäfte von ca. 10 kN bei allen Belastungsrichtungen keine Degradation der CroCos erwarten lassen.

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu

Kryogener Komponententest für Fusionsmagnete

Mit dem fortschreitenden Aufbau des ITER-Fusionsexperiments sind zahlreiche Komponenten für den Einsatz bei kryogenen Temperaturen zu prüfen. Das ITEP führte erfolgreich diverse Qualifizierungs- und Qualitätssicherungstests industriell gefertigter kryogener Magnetkomponenten durch. Die Arbeiten erfolgten hauptsächlich gemäß einem Rahmenvertrag mit F4E und ITER, der insgesamt bis 2019 läuft.

Besonders für die beginnende Fertigung der Poloidal-Feld (PF) -Spulen stellt die Kombination der erforderlichen Charakterisierungsmethoden eine Herausforderung dar. So wurden speziell für diese Tests hergestellte PF-Spulen-Sektionen mit thermischen Zyklen (von Raumtemperatur bis 77 K) und mechanischen Zyklen (bis 20 MPa Belastung) beaufschlagt und anschließend in Hochspannungstests (bis 30 kV) charakterisiert.

Als zeitlich kritische Komponente gilt der Pre-Compression-Ring, der die 18 Toroidal-Feld (TF)-Spulen am oberen und unteren Ende zentral zusammenpresst. Er muss noch vor dem Einbau der Spulen und der übrigen Komponenten in den Vakuumbehälter eingebracht werden. Zurzeit existieren zwei Fertigungsvarianten. Diese wurden 2017 intensiv auf ihre strukturelle Integrität bei kryogenen Temperaturen untersucht. Die Messungen liefen bis Frühjahr 2018.

Zusätzlich zu den genannten Tests zur Fertigung von Spulenkomponenten für die Fusionstechnologie starten 2018 grundlegende Untersuchungen zur Optimierung von Strukturmaterialien für den kryogenen Einsatz. Ziel ist, durch gezieltes Beeinflussen des Gefüges austenitischer Stähle (beispielsweise Kornfeinung durch Kryo-Walzen) die Festigkeit zu verbessern (siehe Supraleiter- und Kryomaterialien: Kryo- und Strukturmaterialien).

Kontakt: Klaus-Peter.Weiss@kit.edu

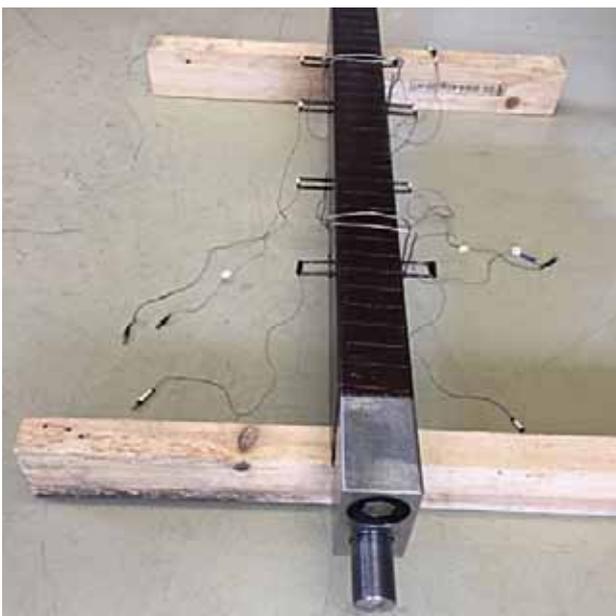


Abb. 8: PF-Spulenende, vorbereitet für den Ermüdungstest, ausgestattet mit Extensometer-Sensoren zur Messung der thermischen Kontraktion beim Abkühlen und der Verformung unter anschließender mechanischer Belastung.

Rotierende Maschinen

Im Bereich Rotierende Maschinen laufen am ITEP vor allem Forschungsarbeiten zu supraleitenden Generatoren.

2017 wurde das EU-geförderte Projekt SUPRAPOWER (SUPERconducting, Reliable, lightweight, And more POWERful offshore wind turbine) unter kryotechnischen Aspekten erfolgreich abgeschlossen. Das ITEP stellte für dieses Projekt die Kryostatsysteme und die Rotationsdurchführung bereit; die Komponenten wurden bei der projektleitenden Firma TECNALIA in Spanien montiert (Abbildung 9).

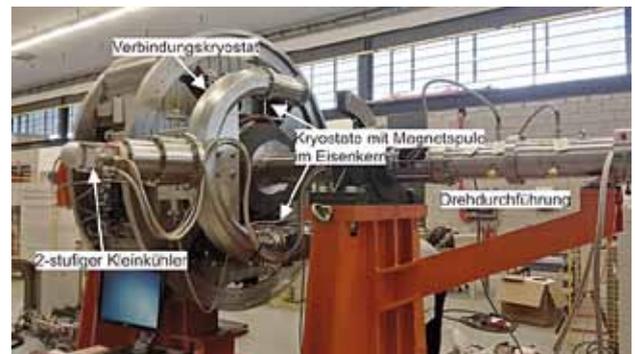


Abb. 9: Teststand für rotierende Maschinen mit zwei supraleitenden Race-Track-Spulen im umgebenden Eisenjoch.

Ein weiteres Projekt zielt auf die Entwicklung eines supraleitenden DC-Generators für Windkraftanlagen: SUPRA verfolgt angesichts der zunehmenden Bedeutung der Gleichstromtechnik bei der Energieübertragung, besonders für weit entfernte Offshore-Windparks, das Konzept eines supraleitenden Gleichstromgenerators, basierend auf HTS-Technologie. Ein solches Generatordesign ermöglicht nicht nur eine Steigerung der Leistungsdichte, sondern erlaubt auch ein einfaches kryogenes System im nicht rotierenden Stator der Maschine. Die supraleitenden Statorspulen sind als sogenannte Double-Pancake-Wicklungen (Abbildung 10) ausgeführt.

Die an der Ober- und Unterseite angebrachten Kupferbleche sollen die Spule auf eine Betriebstemperatur von 30 K kühlen. Erste Messungen an einer Testspule mit 122 Windungen pro Pancake, gewickelt mit 4 mm-YBCO-Bändern, wurden bereits durchgeführt.

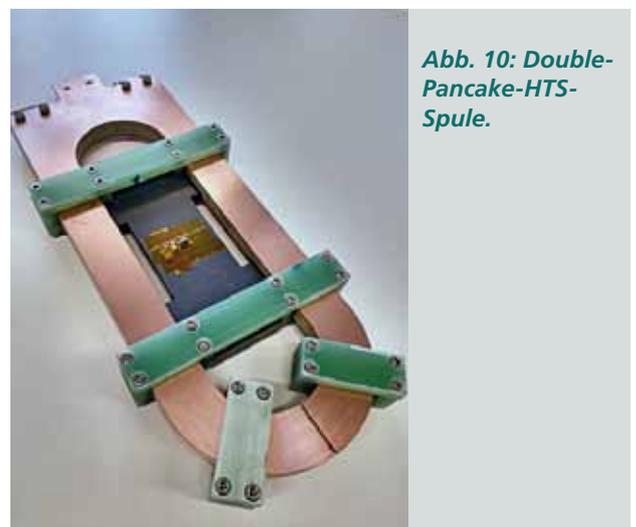


Abb. 10: Double-Pancake-HTS-Spule.

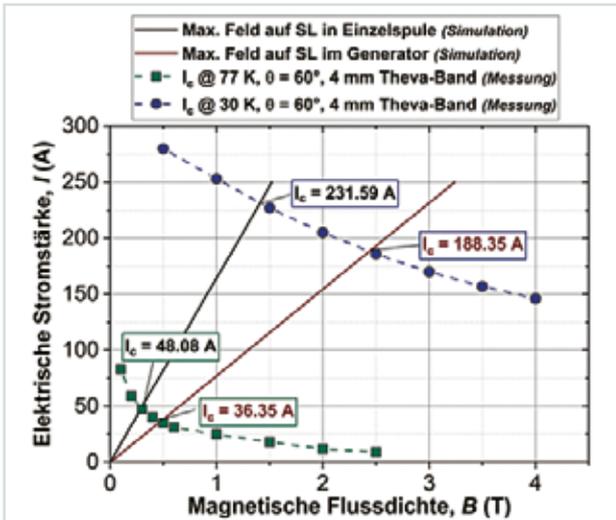


Abb. 11: Kritische Stromstärke der HTS-Spule bei 77 K und 30 K.

Die erwartete und die gemessene maximale Stromstärke der Spule, 48 A bei 77 K, zeigen eine gute Übereinstimmung. Zur Abschätzung der Stromtragfähigkeit wurde das I_c -Verhalten des eingesetzten Supraleiterbands abhängig von der Temperatur sowie dem magnetischen Feld und dessen Ausrichtung gemessen und mit den in der Spule simulierten magnetischen Feldern verglichen (Abbildung 11).

Kontakt: Holger.Neumann@kit.edu

Industrieanwendungen

Das ITEP arbeitet bei der Entwicklung von hochauflösenden Hochfeld-NMR-Spektrometern seit 1985 höchst erfolgreich mit der Bruker BioSpin GmbH zusammen. Innerhalb dieser Kooperation wurden NMR-Spektrometer mit Protonenresonanzfrequenzen von 750 bis

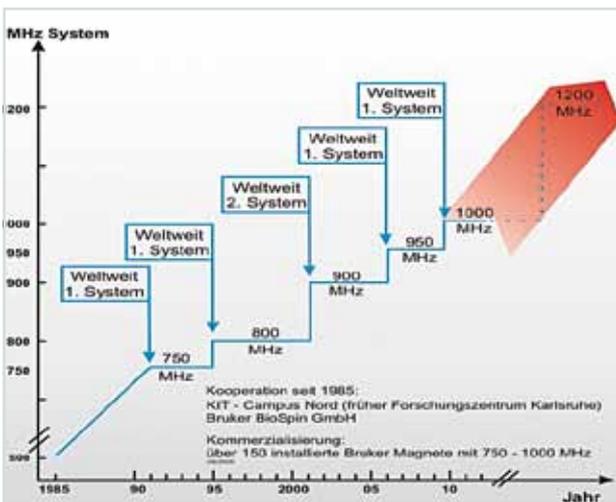


Abb. 12: Chronologie der Entwicklung hochauflösender Hochfeld-NMR-Spektrometer.

1000 MHz kommerzialisiert (Abbildung 12). Diese Zusammenarbeit läuft ab 2018 mit einem neuen Rahmenvertrag weiter.

Das HFM-Team des ITEP unterstützt den Kooperationspartner seit mehr als 25 Jahren in ergänzenden Projekten zur NMR-Magnetentechnologie durch flankierende Maßnahmen bei der Qualitätssicherung und der weltweiten Markteinführung der NMR-Spektrometer. Im Zentrum stehen Charakterisierung und Qualifizierung kommerzieller technischer Tieftemperatur-Supraleiter durch hochauflösende E(I)-Messungen in den Experimentieranlagen JUMBO und HOMER I bei Magnetfeldstärken bis 20 T und Temperaturen von 4,2 K, 2,2 K und 1,8 K sowie winkelabhängige Untersuchungen von Hochtemperatur-Supraleitern. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf Untersuchungen der supraleitenden Eigenschaften der aus den Leitern hergestellten supraleitenden Verbindungen und der Optimierung ihrer Restresistivität im pΩ-Bereich, abhängig vom externen Magnetfeld und vom Transportstrom.

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

Außerdem bereitet das ITEP derzeit ein BMWi-Projekt zur Entwicklung eines HTS-basierten Induktionsofens für Warmumformprozesse in industrietauglicher Ausführung vor. Ziel ist, in Zusammenarbeit mit dem HTS-Bandleiterhersteller THEVA und dem Familienunternehmen Bültmann GmbH die Voraussetzungen für eine erfolgreiche breite Markteinführung dieser Technologie zu schaffen oder aber die fehlende Eignung dieses Ansatzes eindeutig nachzuweisen. Dazu muss eine robuste Lösung für das Kryostatsystem und die supraleitenden Spulen erarbeitet werden (Abbildung 13).

Kontakt: Marion.Klaeser@kit.edu

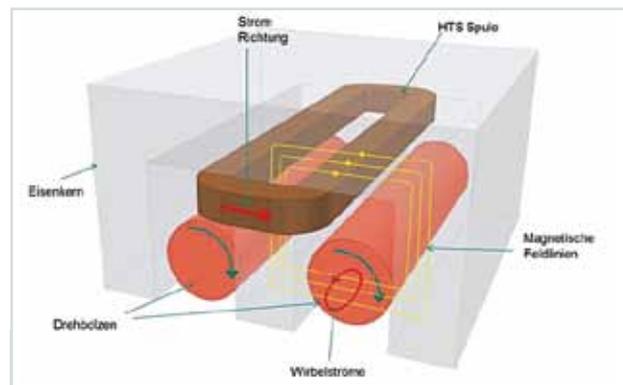


Abb. 13: Prinzip eines HTS-basierten Induktionsofens für Warmumformprozesse.

Highlight 1

Erfolgreicher Abschluss des Projekts HTS-Stromzuführungen für JT60-SA



Abb. 14: Eine der 20 kA-HTS-Stromzuführungen für JT60-SA.

Das ITEP hatte die Aufgabe übernommen, die Stromzuführungen für den Satelliten-Tokamak JT60-SA zu liefern. Insgesamt wurden sechs Stromzuführungen mit einem Betriebsstrom von 26 kA für die TF-Spulen und 20 kA Stromzuführungen mit einem Maximalstrom von 20 kA für die CS- und PF-Spulen des JT60-SA benötigt. Als Supraleitermaterial dient der Hochtemperatur-Supraleiter BiSCCO, wodurch im Vergleich zu konventionellen Stromzuführungen eine weitaus geringere Kälteleistung erforderlich ist. Abbildung 14 zeigt eine 20 kA-SZF für JT60-SA.

Die Fertigung der Halbzeuge erfolgte im Technikhaus des KIT sowie in der Verbundwerkstatt des ITEP/IK, der Zusammenbau im ITEP. Der Abnahmetest aller Stromzuführungen lief in der Testanlage CuLTKa des ITEP.

15 zeigt die Teilnehmer des 27. JT60-SA Technical Coordination Meetings (TCM) im Februar 2017 am KIT vor der SZF-Testanlage CuLTKa.

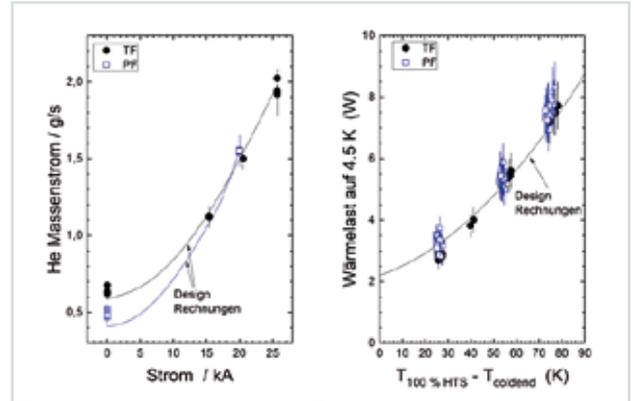


Abb. 16: 50 K-Heliummassenstrom (links) und Wärmelast auf dem 4,5 K-Niveau (rechts) für alle TF- und CS/PF-Stromzuführungen.

Die wichtigsten Betriebsparameter der Stromzuführungen sind der 50 K-Heliummassenstrom für den Wärmetauscher, die stationäre Wärmelast auf dem 4,5 K-Niveau sowie die Notlaufeigenschaften im Fall eines Kühlmittelstromverlusts (LOFA). Abbildung 16 zeigt den 50 K-Heliummassenstrom (links) und die Wärmelast auf dem 4,5 K-Niveau (rechts) für alle TF- und CS/PF-Stromzuführungen.

Anfang November 2017 erfolgte der Transport der letzten JT60-SA SZF nach Japan. Das gesamte Projekt wurde vom BMBF finanziert und im Zeit- und Kostenrahmen abgeschlossen.

Kontakt: Reinhard.Heller@kit.edu



Abb. 15: Teilnehmer des 27. TCM im Februar 2017 am KIT vor der SZF-Testanlage CuLTKa.

Highlight 2 Entwicklung einer 20 kA-REBCO-Stromzuführung

HTS-Hochstromzuführungen wurden bisher alle mit dem Supraleiter BiSCCO gebaut. Inzwischen stellt die Industrie jedoch fast ausschließlich den Supraleiter REBCO her. Dieser hat eine bessere Stromtragfähigkeit im Magnetfeld, aber eine niedrigere kritische Temperatur. Zudem wird er nur in Bandleiterform gefertigt. Der Bandaufbau erlaubt lediglich eine Stromeinkopplung von einer Seite.

Daher entwickelte das ITEP nun eine 20 kA-HTS-Stromzuführung, die REBCO als HTS-Material verwendet. Nachdem die Wissenschaftler 2016 alle Stromzuführungskomponenten bis auf das HTS-Modul fertiggestellt sowie Probestücke mit verschiedenen REBCO-Leitern untersucht hatten, stellten sie 2017 das HTS-Modul her (Abbildung 17) und bauten die Stromzuführung



Abb. 17: REBCO-Modul für die 20 kA-Stromzuführung.

zusammen. Anschließend testeten sie die neu entwickelte Stromzuführung zusammen mit einer bereits getesteten Stromzuführung für JT60-SA ausführlich in CuLTKa. Für den Test wurde das HTS-Modul mit zusätzlichen Temperatursensoren und Spannungsabgriffen versehen.

Der Test umfasste stationäre Messungen bis 20 kA zur Bestimmung des Heliummassenstroms für den Wärmetauscher sowie der Verluste auf dem 4,5 K-Niveau. Zu-

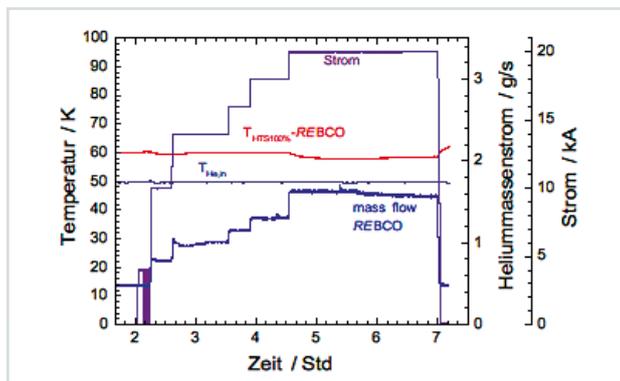


Abb. 18: Temperatur am oberen Ende des HTS-Moduls sowie Heliummassenstrom durch den Wärmetauscher und Strom für den Strombetrieb bis 20 kA.

sätzlich wurden trapezförmige Strompulse mit unterschiedlicher Stromrampe gefahren. Überdies wurden die Notlaufeigenschaften der Stromzuführung nach Verlust des Kühlmittelstroms im Wärmetauscher sowie das Quenchverhalten des HTS-Moduls untersucht. 18 zeigt die Temperatur am oberen Ende des HTS-Moduls sowie den Heliummassenstrom durch den Wärmetauscher und den Strom für den Strombetrieb bis 20 kA.

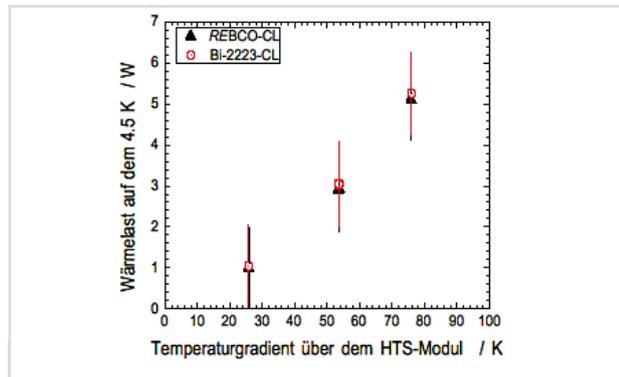


Abb. 19: Verlustleistung am 4,5 K-Ende der Stromzuführung als Funktion des Temperaturgradienten über dem HTS-Modul ohne Strom für die REBCO-Stromzuführung sowie zum Vergleich für die BiSCCO-Stromzuführung.

In Abbildung 19 ist die Verlustleistung am 4,5 K-Ende der Stromzuführung als Funktion des Temperaturgradienten über dem HTS-Modul ohne Strom für die REBCO-Stromzuführung sowie zum Vergleich für die BiSCCO-Stromzuführung dargestellt. Wie sich zeigte, verhält sich die REBCO-Stromzuführung grundsätzlich ebenso wie eine BiSCCO-Stromzuführung. Allerdings ist das Quenchverhalten unterschiedlich (Abbildung 20). Zudem hat die REBCO-Stromzuführung infolge der niedrigeren kritischen Temperatur im Fall eines Kühlmittelverlustes eine kürzere, aber immer noch ausreichende Notlaufzeit.

Kontakt: Reinhard.Heller@kit.edu

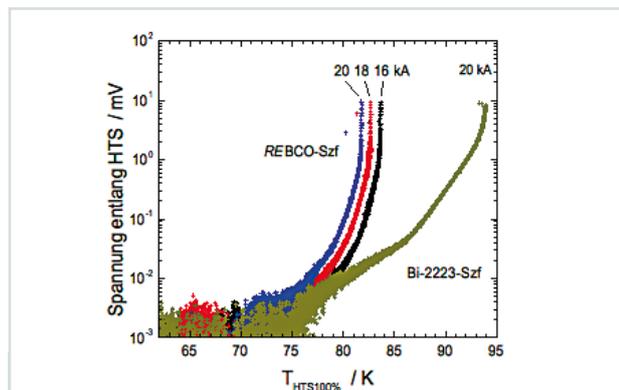


Abb. 20: Quenchverhalten der REBCO-Stromzuführung im Vergleich zur BiSCCO-Stromzuführung.



5 Tonnen Vakuum! Der quecksilberbasierte Vakuumpumpstand für die JET-Tritium-Kampagne wurde komplett montiert und zum Testplatz transportiert.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes

Koordination: Dr. Christian Day

Im Forschungsfeld 'Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes' werden neuartige Technologien entwickelt, um den Brennstoffkreislauf und die damit in Verbindung stehenden Nachbarsysteme eines zukünftigen Fusionskraftwerks (DEMO) effizienter zu machen und damit sicherzustellen, dass der in-situ erzeugte Brennstoff Tritium optimal ausgenutzt wird. Nur dann gelingt die Selbstversorgung des Kraftwerks ohne externe Anlieferung von Brennstoff, was einen zentralen Vorteil von Fusionskraftwerken darstellt.

Das Forschungsfeld deckt alle drei Schlüsseltechnologien des Brennstoffkreislaufs ab, nämlich die Materiejektion, die Vakuumtechnik und die Tritiumtechnologie. Im Jahr 2017 wurde die Architektur des gesamten Brennstoffkreislaufs für DEMO weiter konsolidiert. Das neue Konzept sieht drei Teilkreisläufe vor: Der erste führt direkt aus den Vakuumpumpen unverbrannten Brennstoff an die Pelletinjektoren zurück, der zweite ist ein kontinuierlich betriebener Bypass des Restgases mit Isotopenseparation innerhalb der Tritiumanlage, und der dritte ist schließlich der mit Kryodestillation und Wasserdetriitierung ausgerüstete Umlauf, der die verbleibenden Wasserstoffisotope in die reinen Wasserstoffisotope überführt. Diese Arbeiten sind fest im Europäischen Fusionsprogramm EUROfusion verankert, in dem zum ersten Mal der gesamte Brennstoffkreislauf mit all seinen Untersystemen als Einheit bearbeitet wird, um entsprechende Optimierungspotentiale zu realisieren. Das Management des Arbeitspaketes TFV (Tritium-Materiezufuhr-Vakuum) hat sich etabliert, siehe Abbildung 1. Nahziel ist die Entwicklung eines in sich konsistenten konzeptionellen Designs, in 2018 wird dazu ein erster quantitativer Betriebspunkt des gesamten Kreislaufs entwickelt.

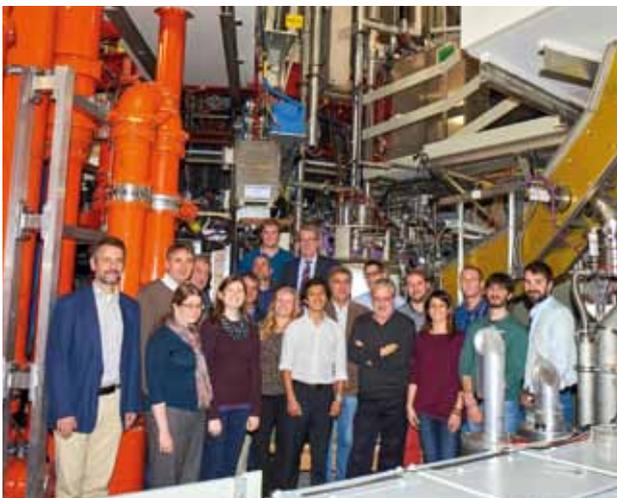


Abb. 1: Jahresabschlussstreffen des TFV-Teams beim Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching.

Vakuumtechnologie und Prozessintegration

Dieses Forschungsthema adressiert alle vakuumtechnischen Fragestellungen einer Fusionsanlage. Die Aktivität umfasst nicht nur die relevante Technologieentwicklung der entsprechenden Teilsysteme des Brennstoffkreislaufs, sondern auch die Vakuumsysteme außerhalb des klassischen Brennstoffkreislaufs, z.B. die Plasmakammer mit den Themen Ausgasung und Gasspeicherung sowie die Vakuumsysteme der Neutralteilcheninjektoren (Heizsysteme des Plasmas). Auch Vakuumtechnologien anderer Großanlagen in der Fusion, wie z.B. für die Europäische Neutronenquelle IFMIF-DONES oder für die sich derzeit im Bau befindliche Maschine JT-60SA in Japan, werden abgedeckt.

Das für DEMO in den letzten Jahren entwickelte neue Vakuumkonzept des Brennstoffkreislaufs arbeitet im Gegensatz zu den Kryo-Vakuumpumpen an ITER kontinuierlich und ohne Kryogen. Durch eine fest eingebaute Separation des Divertorabgases kann zudem ein Großteil des unverbrannten Brennstoffs direkt rezykliert werden, wodurch sich die aufgebauten Tritiuminventare und Prozesszeiten deutlich verringern lassen. Dieses sogenannte DIR-Konzept (Direkte Interne Rezyklierung) besteht aus drei Pumpstufen. Zur Separation sollen dabei in einer ersten Stufe superpermeable Metallfolien verwendet werden. Das Hauptziel des Entwicklungsprogramms in den letzten Jahren war es, die Teilchen-Wechselwirkung mit der Metallfolienoberfläche besser zu verstehen. Hier wurden in der Versuchsanlage HERMES inzwischen eine Vielzahl von Tests an verschiedenen Oberflächen durchgeführt. Darauf aufbauend wurde eine einheitliche Theorie entwickelt, die die zwei bisher isoliert bestehenden Denkschulen in diesem Bereich vereint.

Abb. 2 zeigt ein typisches experimentelles Ergebnis. Untersucht wurde eine runde Folie ($\varnothing = 70$ mm), das Wasserstoffgas wurde mit einem ECR Plasma atomisiert und in der Plasmakammer wurde ein Druck von ~ 0.6 Pa gehalten. Die Kammer hinter der Folie war zunächst evakuiert. Im Verlauf des Experiments wurde ein deutlicher Druckanstieg gemessen. Schon nach 30 Sekunden überschritt der Druck hinter der Folie den Druck vor der Folie, und stieg im weiteren Versuchsverlauf immer mehr an. Dies ist ein klares Erkennungszeichen von Superpermeabilität, im Gegensatz zur klassischen (druckgetriebenen) Permeation, die bereits bei Druckgleichheit zum Erliegen kommen würde.

Für die Materialtestanlage IFMIF-DONES, die ab 2020 gebaut werden soll, wurden umfangreiche Vakuummodellierungen durchgeführt. DONES ist ein Beschleuniger, der an einem Flüssiglithium-Target ein fusionstypisches Neutronenspektrum erzeugt, mit dem Materialien

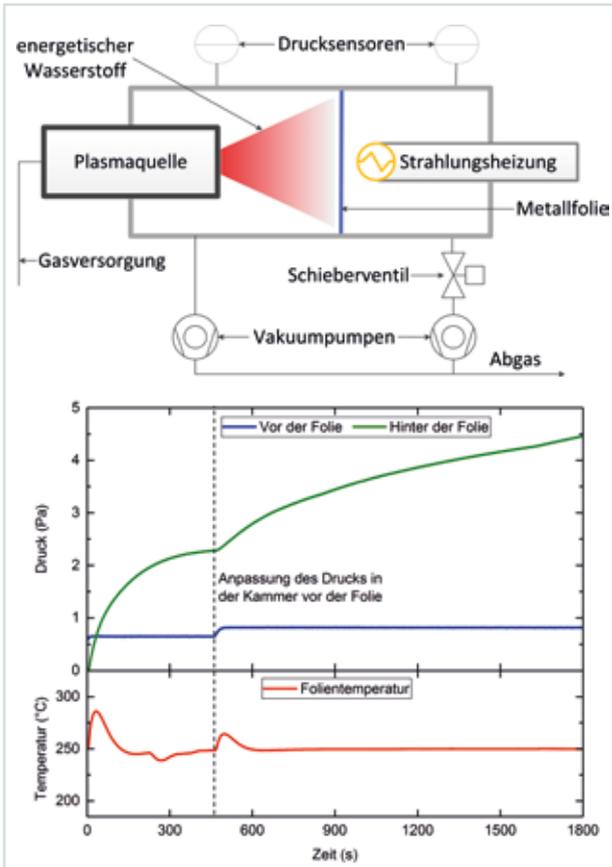


Abb. 2: Schematisches Versuchsprinzip (oben). Demonstration der Superpermeation (H_2 an Fe) (unten).

für die Anwendungen in der Fusion geprüft werden können. In verschiedenen Bereichen des Beschleunigers dürfen verschiedene Maximaldrücke nicht überschritten werden, um die Strahlverluste insgesamt akzeptabel klein zu halten. Abb. 3 zeigt die berechneten Druckprofile über die Länge der kompletten Anlage. Es wurde gefunden, dass mit den gewählten Vakuumpumpen alle Anforderungen erfüllt werden können.

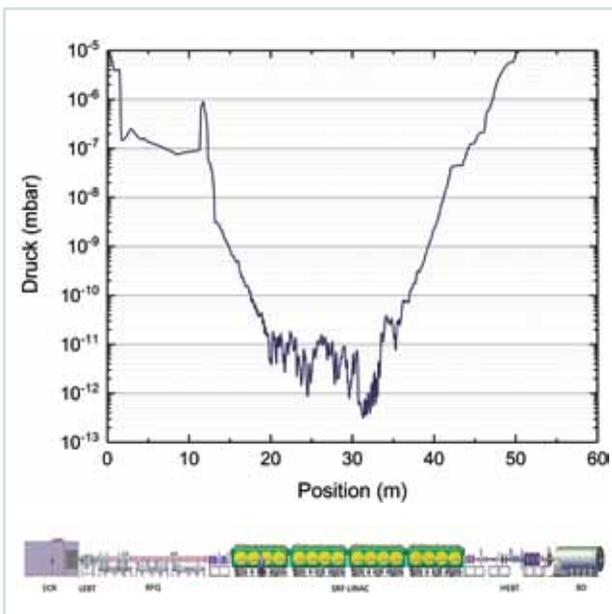


Abb. 3: Berechnetes Druckprofil längs der Versuchsanlage IFMIF-DONES.

Ein wichtiges Thema für die Integration eines Vakuumprozesses ist eine zuverlässige Vorhersage der Gasabgabe von Materialien im Vakuum. Bereits seit vielen Jahren finden hierzu systematische Messungen in der Versuchsanlage OMA statt. In 2017 wurden verschiedene, häufig in Vakuumkammern verwendete Keramiken (Al-, Mg-, Si-Oxide) bei verschiedenen Temperaturen untersucht.

Abb. 4 zeigt ein typisches Ergebnis. Hier wurde zum Beispiel deutlich, dass der Einfluss des Temperaturprogramms (Ausheizen) bei Siliziumoxid deutlich weniger stark ist als bei Al- und Mg-oxidischen Keramiken.

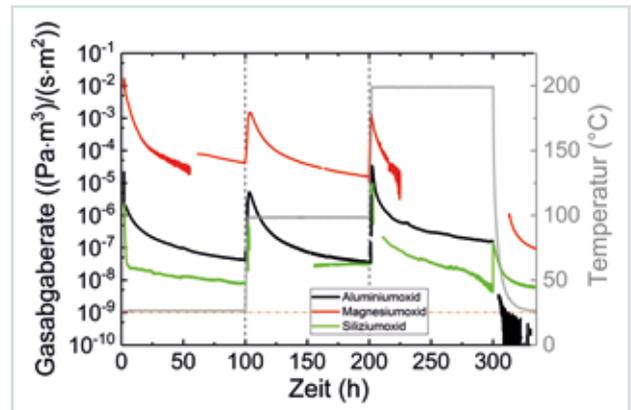


Abb. 4: Gasabgaberraten für verschiedene Keramiken.

Ebenfalls in diesem Berichtszeitraum wurden zwei neue Anlagen zur Untersuchung der Gasabgabe von Materialien im Vakuum aufgebaut. Eine Anlage ist speziell für den Bereich hoher Gasabgaberraten ausgelegt, und ergänzt die mit der Anlage OMA erhaltenen Möglichkeiten. Die zweite Anlage verwendet ein anderes Verfahren zur Bestimmung von Gasabgaberraten und dient somit auch zur Validierung. Beide Anlagen befinden sich in einer Testphase und sollen nächstes Jahr in den Messbetrieb gehen. Zur genauen Messung von Gasabgaberraten werden Druckmessensoren benötigt, die regelmäßig geprüft werden müssen. Eine Anlage zur Überprüfung und Kalibrierung von Vakuummessensoren wurde nach Umbaumaßnahmen ebenfalls wieder in Betrieb genommen. All diese Anlagen stehen in den neuen Vakuumlabors im Keller des Institutsneubaus B416.

Kontakt: Christian.Day@kit.edu

Tritiumextraktion und -rückgewinnung

Ein Fusionskraftwerk hat den besonderen Vorteil, dass der Brennstoff Tritium in-situ im Reaktor selbst erzeugt wird, und zwar durch die Wechselwirkung der Neutronen aus der D-T-Fusionsreaktion mit Lithium, das sich in den sogenannten Brutblankets befindet, mit denen die innere Wand der Plasmakammer komplett ausgekleidet ist. Dieses Forschungsthema untersucht Technologien zur Extraktion des erbrüteten Tritiums aus den Blankets in DEMO. Während es eines der Ziele von ITER, dem sich derzeit im Aufbau befindlichen Experiment in Frankreich, ist, die reine Machbarkeit des Erbrütens von Tritium anhand verschiedener Blanketkonzepte zu zeigen, wird erst in DEMO die Tritium-Selbstversorgung von

Fusionsreaktoren demonstriert werden können. Der Durchsatz an erbrütetem Tritium an DEMO wird daher auch um mehrere Größenordnungen größer sein als in ITER. Dies erfordert neuartige Technologien mit ausreichend hoher Extraktionseffizienz, die bei uns entwickelt werden.

Die Konzepte für die Brutblankets unterscheidet man nach festen und flüssigen Konzepten. Bei den festen Konzepten wird Lithium in Keramikugeln eingearbeitet, während sich das Lithium bei den flüssigen Konzepten in einer flüssigen Legierung aus Blei und Lithium (PbLi) befindet. Entsprechend werden derzeit am TLK zwei Verfahren für die entsprechenden Anforderungen der Tritium-Extraktion bei DEMO entwickelt.

Zur Aufnahme des in den Keramikugeln gebildeten Tritiums werden die Blankets mit einem Gasstrom gespült (überwiegend Helium), aus dem dann in einem nachfolgenden Schritt das Tritium extrahiert werden muss. HT und HTO können mittels Permeation durch Zeolithmembranen aus dem Helium extrahiert werden. Zeolithmembranen eignen sich wegen ihrer chemischen und radiologischen Stabilität sowie ihres modifizierbaren Einsatzes. Für diese Anwendung sollen die Zeolithe NaA und MFI verwendet werden, für die bei binären (tritiumfreien) Mischungen (He/H₂ und He/H₂O) bereits vielversprechende Separierungseigenschaften gemessen wurden. Dies soll nun auch für tritiumhaltige Systeme nachgewiesen werden. Dafür wurde 2017 die Anlage ZEMTEX aufgebaut und in Betrieb genommen. Erste Messungen mit Mischungen wurden bereits durchgeführt.

Zur Extraktion des Tritiums aus flüssigem Lithiumblei wird die sogenannte Vakuumsiebbo-den-Technologie (Vacuum Sieve Tray, VST) entwickelt. Hier strömt die flüssige Legierung durch eine Anordnung von submillimetergroßen Düsen und bildet dabei oszillierende Tropfen. Die Oszillationen erhöhen den Stofftransport des gelösten atomaren Tritiums an die Tropfenoberfläche wo es rekombiniert und als Gas freigesetzt wird, das schließlich unter Vakuum abgezogen wird. Ein vorläufiges VST-Experiment für Untersuchungen mit Deuterium wurde konzipiert und in diesem Jahr aufgebaut. Es befindet sich jetzt in der finalen Inbetriebnahme, siehe Abb. 5.



Abb.5:
VST-Teststand zur Untersuchung der Wasserstoffextraktion aus Lithiumblei.

Das konkrete Ziel dieser Experimentieranlage, die als Vorlage einer zweiten, dann tritiumtauglichen Anlage dienen wird, ist die erstmalige Untersuchung einer möglichen Wiederabsorption des freigesetzten Deuteriums durch die benachbarten Tropfen in Abhängigkeit der Düsenanordnung. Acht verschiedene Mehrfach-Düsen-Geometrien werden getestet.

Eine weitere essentielle Technologie in der Tritiumanlage des Brennstoffkreislaufs ist die Tritiumextraktion und -rückgewinnung aus tritiiertem Wasser. Für diese Funktion wird am TLK ein Schlüsselprozess entwickelt, nämlich die Kombination der Wasserdetriitierung mit der kryogenen Destillation zur Isotopenseparation. Hier wurde im Berichtszeitraum eine neue Testkolonne aufgebaut und in Betrieb genommen, um bisher nicht bekannte Stoffdaten für die Modellierung zu gewinnen. Der Prozess wird dann auch bei ITER verwendet werden.

Kontakt: Laetitia.Frances@kit.edu

Strömung verdünnter Gase

Zur Auslegung von komplexen Vakuumsystemen wie im Fusionsbrennstoffkreislauf ist es unerlässlich, verdünnte Gasströmungen quantitativ berechnen zu können. Dies geschieht zum Beispiel durch Lösen der Boltzmann-Gleichung. Zu diesem Zweck wurde über viele Jahre im Institutsbereich Vakuumtechnik der DSMC-Algorithmus weiterentwickelt, der ein statistisches Verfahren ist, und gegenüber deterministischen Methoden den Vorteil hat, auch komplexe Geometrien vernünftig beschreiben zu können.

Dieses Forschungsthema konzentriert sich im wesentlichen auf die Physik des Teilchenabtransports im Divertor eines Tokamaks, und hier insbesondere auf den Bereich unterhalb der Divertorkassetten: Dort ist das Plasma wieder in Neutralgas umgewandelt, und dies ist der Bereich, wo die Pumpsysteme ankoppeln. Das Plasmaszenario für DEMO wird sich wesentlich von dem von ITER unterscheiden. So ist es nötig, ein Diver-torplasma im sogenannten 'detachment Modus' aufrecht zu halten, nur dann können die resultierenden Wärmelasten von den Divertormaterialien bei gleichzeitiger Neutronenstrahlung beherrscht werden. Dieser Plasmazustand ist noch nicht völlig verstanden, man möchte daher in das Design der Maschine möglichst viele Kontrollmöglichkeiten einbauen. Auch hier kommen wieder die Pumpsysteme ins Spiel. Sie müssen das bei der Fusionsreaktion gebildete Helium abziehen (zusammen mit dem unverbrannten Brenngas und anderen benötigten Hilfgasen, die dem Plasma zugefügt werden, um die Stabilität zu erhöhen). Die Divertorstrecke muss daher nach oben offen sein, um die Teilchen aufnehmen und abführen zu können, andererseits wäre eine Verdichtung hilfreich, um im gleichen Volumen eine höhere Teilchenzahl ausschleusen zu können. In bisherigen Fusionsanlagen hat man daher den Divertor mit einem sogenannten Dom versehen.

Der DEMO-Divertor wird in einem interdisziplinären Ansatz von Materialwissenschaften, Vakuumtechnologie und Plasmaphysik gemeinsam entwickelt. Zur Modellierung der relevanten gasdynamischen Prozesse im Divertor wurde von uns das DIVGAS-Paket etabliert, das inzwischen zum Referenzcode für die Beschreibung der

Teilchenströmung in der Nähe und unterhalb des Divertors in einer Fusionsanlage avanciert ist. Bild 6 zeigt den Blick auf drei benachbarte Divertorkassetten (ohne Dom), die üblicherweise für die Simulationen verwendete Domäne.

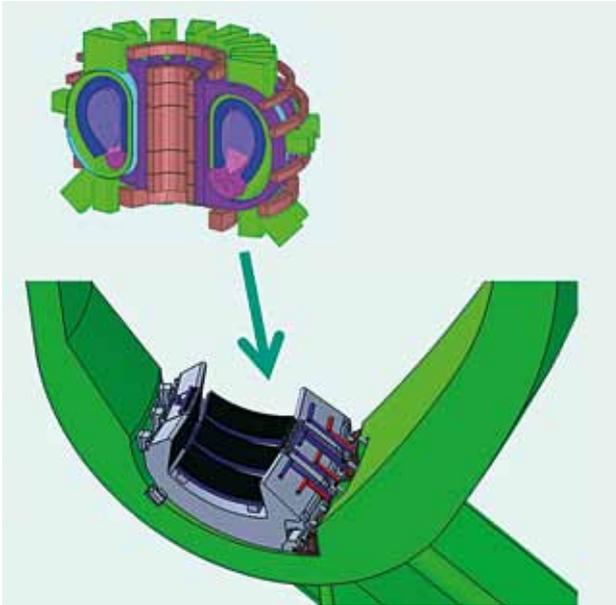


Abb. 6: Blick auf den Divertorbereich von DEMO.

Im Berichtszeitraum wurde der Parameterraum für wesentliche Elemente eines Divertors abgescannt, um ein Gefühl zu entwickeln, in welche Richtung man weiterarbeiten muss. Wesentliche Ergebnisse waren z.B. die Bestimmung der optimalen Position zum Anschluss der Vakuumpumpensysteme des Torus, oder der Beitrag des Domes in verschiedenen Designvarianten zur unterstützenden Kompression des Gases. Erstmals wurde auch das gesamte DIVGAS-Paket in 3D angewendet. Damit konnte der Einfluss der Rückströmung zwischen den Kassetten als Funktion des Spaltes zwischen den Kassetten und für verschiedene Einfangwahrscheinlichkeiten der Pumpen validiert werden, siehe Abb. 7. Für die derzeit erreichbare Einfangwahrscheinlichkeit von 0.3 ergibt sich damit eine maximal zugelassene Spaltweite von 20 mm, um die Verluste kleiner als 5% zu halten.

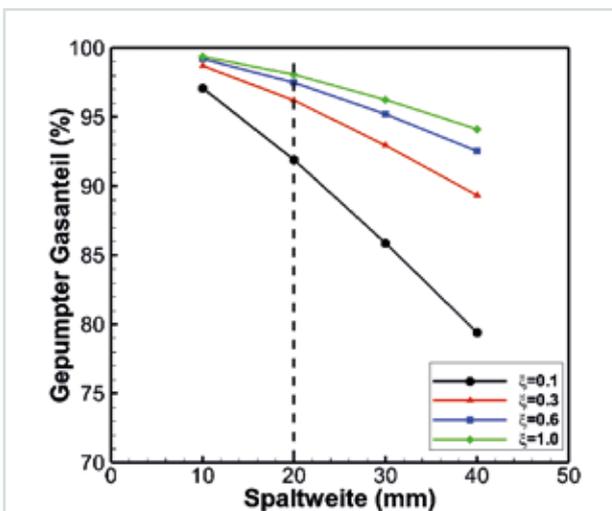


Abb. 7: Gepumpter Gasanteil für verschiedene Spaltweiten zwischen den Divertorkassetten.

Die Thematik der Divertorentwicklung wird in den nächsten Jahren noch intensiviert. Neben dem klassischen DEMO-Divertor, wie oben beschrieben, werden zukünftig auch alternative Konfigurationen betrachtet. Hier handelt es sich insbesondere um Divertoren mit Flüssigmetallen und um komplett andere magnetische Konfigurationen, wie z. B. der Snowflake oder Super-X Divertor.

Kontakt: Stylianos.Varoutis@kit.edu

Vakuumhydraulik

Ziel des neuen Forschungsthemas Vakuumhydraulik ist es, alle Aktivitäten die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten (v.a. Flüssigmetallen) in Maschinen und Prozessen unter Vakuum beschäftigen zusammen zu fassen, weiter zu stärken und so für die Fusion wichtige Komponenten (z. B. Vakuumpumpen, Divertoren) und Prozesse (z. B. Lithiumisotopentrennung für die Brutblankets) effektiv zu entwickeln. Dazu passend entwickeln wir im Institutsbereich Vakuumtechnik auch Prozesse für den Umgang mit diesen Arbeitsmitteln (z. B. Aufreinigung und Prozessierung von Quecksilber, Entwicklung zugehöriger analytischer Verfahren).

Dieses Forschungsthema gibt es so nur am KIT. Dies zeigte sich z.B. auch darin, dass mit diesem Thema erfolgreich ein RISC-Forschungsvorhaben des Landes Baden-Württemberg zur Förderung neuer Forschungs-ideen mit starkem Risiko-Charakter eingeworben werden konnte.

Alle Experimente zu diesem Forschungsthema sind in einer gemeinsamen Halle gebündelt (Bau 602). Als wesentliches Infrastrukturelement wurde in diesem Jahr begonnen, dort in einem großen Container ein Quecksilberlabor mit der nötigen Infrastruktur aufzubauen (Kühlwasser, Gasversorgung, Quecksilberlager), siehe Abb. 8. Für hochgenaue Flüssigmetallanalytik ist ein ICP-MS vorgesehen. Mit Hilfe dieser hochspeziellen Analysemethoden können z. B. verschiedene Valenzzustände Quecksilber in Form anorganischer und organischer Spezies in einem einzigen Durchgang sensitiv und schnell bestimmt werden. Das Labor wird als Umgebung für sicheres Handling von Quecksilber für alle Arbeiten im Forschungsthema Vakuumhydraulik eine zentrale Rolle spielen.

Im Jahr 2017 wurden im Institutsbereich Vakuumtechnik nicht nur die Metallfolientechnologie sondern auch die beiden anderen neuen Vakuumpumpentechnologien für das Fusionskraftwerk DEMO wesentlich weiterentwickelt. Stromabwärts der Metallfolienpumpe werden als Hochvakuumpumpe Diffusionspumpen eingesetzt, die, um tritiumverträglich zu sein, mit dem Flüssigmetall Quecksilber betrieben werden. Als mechanische Pumpe zur Kompression bis Umgebungsdruck werden schließlich Flüssigkeitsringpumpen verwendet, die ebenfalls mit Quecksilber als Arbeitsmittel betrieben werden. Das auf diesen drei Pumpentypen beruhende Konzept zur Umsetzung des DIR wurde inzwischen als KALPUREX-Prozess (Karlsruhe liquid metal based pumping of reactor exhaust gases) patentiert.

Die Funktionalität der Quecksilberdiffusionspumpe für die Anwendungen in der Fusion wurde bereits 2014 von



Abb. 8: Das neue Quecksilberlabor entsteht in Bau602. Links der Vorraum/Schleuse, rechts der 20'' Laborcontainer

uns gezeigt. Darauf aufbauend wurde in mehreren Iterationsschritten ein Design für eine Testpumpe entwickelt, bei der alle kritischen Bauteile so modular angeordnet sind, dass sie einfach ausgewechselt werden können, und damit parametrische Untersuchungen erlauben. Diese Pumpe soll nächstes Jahr gebaut und dann 2019 an der Anlage THESEUS charakterisiert werden. Zu diesem Zweck wurde die Anlage (druckstoßfeste Auslegung des Behälters, festverdrahtete Wasserstoffüberwachung, SPS-basierte Limitierung des max. Wasserstoffinventars) in diesem Jahr durch den TÜV für den Betrieb mit Wasserstoff zugelassen.

Die Anlage THESEUS wird aber zunächst zur Charakterisierung eines tritium-kompatiblen Vorvakuumpumpstandes verwendet, der die neue Technologie der Quecksilberringpumpen enthält. Dieser Pumpstand wird für die DT-Kampagne an der Fusionsmaschine JET benötigt (2019/20), da keinerlei technologischen Alter-

nativen zur Verfügung stehen. Der Pumpstand enthält nicht nur zwei Quecksilber-Flüssigkeitsringpumpen, sondern auch noch eine zuschaltbare Booster-Einheit, die auf dem Quecksilberdiffusionsprinzip beruht. Damit kann der Pumpstand direkt als Vorpumpe für die verwendeten Turbomolekularpumpen bei JET eingesetzt werden. Damit werden wertvolle Betriebserfahrungen gesammelt, die dann wiederum in das Design der DEMO-Systeme einfließen können. Von besonderem Interesse ist hier das Zusammenspiel von Diffusions- und Ringpumpe, wie es ähnlich auch im KALPUREX-Prozess von DEMO auftreten wird.

Nach über 2 Jahren Bauzeit wurde der Pumpstand im November dieses Jahres fertig montiert, siehe Abb. 9, und schließlich vom Aufbaubereich in der TOSKA-Halle des Instituts in den THESEUS-Testbereich verladen.

Kontakt: Thomas.Giegerich@kit.edu



Abb. 9: Der JET-Pumpstand. Letzte Montearbeiten (a), Rückseite (a) und Vorderseite (c).

Abb. 9 (b) zeigt das Einheben in den Experimentierbereich zwischen dem Hg-Lab (rechts), der Anlage TRANSFLOW (vorne) und THESEUS (links). Wenn die Tests an THESEUS im nächsten Jahr abgeschlossen sind, wird der Pumpstand dann an JET zum weiteren Einbau geliefert. Der Bau des Pumpstandes bedeutete einen straffen Zeitplan und war nur mit vereinten Kräften möglich. Darauf sind wir ganz besonders stolz.



Blick in die Reparatur-Handschuhbox (RBX) des Tritiumlabors Karlsruhe: Ein Mitarbeiter bereitet eine instand gesetzte Normetex 9 cfm-Scroll-Pumpe für einen Probelauf vor.

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 1000 m² stehen mehr als 15 Handschuhkästen zur Verfügung. Diese dienen dem sicheren Einschluss der tritiumführenden Versuchsanlagen und bieten ein Experimentiervolumen von rund 125 m³. Die Versuchsanlagen zur Handhabung von Tritium sind mit einem geschlossenen Tritiumkreislauf, dezidierten sowie zentralen Tritiumrückhaltesystemen (TRS) verbunden. Sie sind mit Prozessleittechnik entsprechend den individuellen Anforderungen der Wissenschaft ausgestattet. Damit erfüllt das TLK sämtliche Voraussetzungen für die Planung, Aufstellung und Durchführung von Experimenten mit reinem Tritium und Tritiumgasmischungen.

Ein Arbeitsschwerpunkt des TLK liegt auf der Entwicklung von Technologien für den Brennstoffkreislauf von Fusionsreaktoren innerhalb des Programms „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, eingebunden in das Programm „Materie und Universum“ (MU).

Das Forschungsfeld Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen deckt die folgenden Bereiche ab:

- Tritiumanlagen und -prozessierung
- Tritium- und Wasserstoffanalytik
- Physik der Wasserstoffisotope
- Suche nach neuer Physik



Abb. 1: Demontageschritte an einer tritiumkompatiblen Scroll-Pumpe. In der RBX wird eine bereits mit Tritium betriebene, kontaminierte Pumpe untersucht. Dabei werden Wartungs- und Reparaturstrategien entwickelt sowie Erfahrungen für neu zu fertigende Pumpen gewonnen.

Tritiumanlagen und -prozessierung

Der Bereich Tritiumanlagen und -prozessierung umfasst alle Tätigkeiten zur Weiterentwicklung von Verfahren der Handhabung von Tritium. Daher ist er eng mit angrenzenden Bereichen verbunden. Im Bereich Tritiumanlagen und -prozessierung wurden 2017 im geschlossenen Tritiumkreislauf des TLK mehr als $2 \cdot 10^{16}$ Bq (56,2 g) Tritium sicher und ohne sicherheitsrelevante Zwischenfälle prozessiert. Dieses Gas wurde mit einer Isotopenkonzentration von >98% H₃ zur Verfügung gestellt. Bei einem momentanen, in fester Form als Urantritid gelagerten Inventar von 25 g war der geschlossene Tritiumkreislauf des TLK für diese Aufgabe unverzichtbar. Die zum Kreislauf gehörenden Prozessschritte Tritiumreinigung, Isotopentrennung und Tritiumbilanzierung wurden stets mit hoher Verfügbarkeit sichergestellt.

Weiterhin wurde die Erprobung eines im TLK entwickelten modularen TRS abgeschlossen, was bei Neubeschaffungen Einsparungen von rund 100 k€ ermöglicht. Für die Experimentiereinrichtung Tritium Absorption IR-Spektroskopie 2 (TApIR 2) schlossen die Forscher sämtliche Planungs- und Konstruktionsaufgaben ab und begannen mit der Aufstellung des Experiments. Außerdem stellten sie den Tritium-Hydrogen-Deuterium-Kreislauf (TriHyDe) fertig, sodass 2018 hochpräzise Tritiumgasmischungen, unter anderem für die Kalibrierung von Tritiumanalysesystemen, hergestellt werden können.

Auch für die Experimente ZEolite Membranes for Tritium Experiment (ZEMTE_x) und Multi Nozzle Vacuum Sieve



Abb. 2: Ein Ausschnitt aus der untersuchten strukturierten Kolonnenpackung (links) sowie der gesamte Versuchsaufbau (rechts).

Tray (MNVST) wurden alle Aufbau- und Vorbereitungsarbeiten vorgenommen, um die zugehörigen Forschungstasks abschließen zu können.

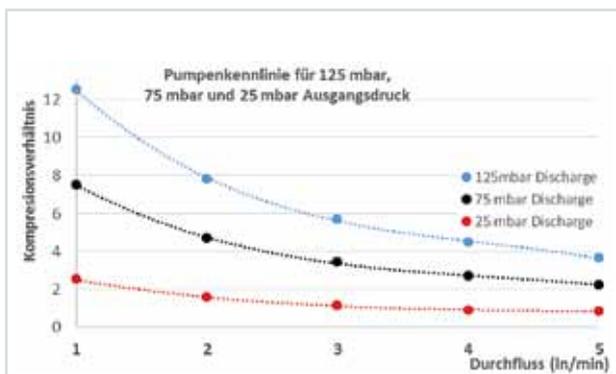


Abb. 3: Pumpenkennlinien der Scroll-Pumpe; Kompressionsverhältnis als Funktion des Durchflusses für verschiedene Pumpenausgangsdrücke.

Unter den Arbeiten im Jahr 2017 hervorzuheben sind zum einen die Planung, Aufstellung, Inbetriebnahme und Durchführung von Experimenten zur Wasserdetritierung in Kooperation mit dem rumänischen Institut ICIT, zum anderen die Arbeiten an tritiumkompatiblen Vakuumpumpen. Die Wasserdetritierung, ein Prozess innerhalb des Tritiumkreislaufs, bedarf besonderer Aufmerksamkeit, da tritiiertes Wasser (HTO) in vielen Prozessen bei der Handhabung von Tritium anfällt. Quellen von HTO finden sich in typischen Tritiumanwendungen wie dem TRS, aber auch in nuklearen Anwendungen, wie schwerwassermoderierten Kernreaktoren. Vor der Abgabe an die Umwelt muss HTO detritiert werden. Das heißt, Tritium muss entfernt oder ausgetauscht werden. Der untersuchte Prozess basiert auf dem Verfahren LPCE (Liquide Phase Catalytic Exchange). Tritiiertes Wasser wird bei einem Durchsatz von 5 Kg h⁻¹ im Gegenstrom mit 8 m³ h⁻¹ Wasserstoff in einer ca. 3 m langen Kolonne von 100 mm Durchmesser prozessiert. 2017 wurde die Integration der Anlage in das TLK geplant und vorgenommen. Eine zweiwöchige Experimentierkampagne brachte erste Ergebnisse, die es ermöglichen, Dekontaminationsfaktoren und Stoffübergangskoeffizienten für eine strukturierte katalytische Kolonnenpackung zu ermitteln (Abbildung 1).

Tritiumkompatible Vakuumpumpen sind essenziell für den Betrieb von Tritiumanlagen. Derzeit sind geeignete Modelle jedoch nicht mehr auf dem Markt verfügbar. Im Rahmen der entsprechenden Entwicklungsarbeiten wurde eine bereits mit Tritium betriebene Normetex 9 cfm-Scroll-Pumpe, die das Ende ihrer Lebenszeit erreicht hatte, in der TLK Reparaturbox (RBX) untersucht (Abbildung 2), um Wartungs- und Reparaturstrategien für vorhandene Pumpen zu entwickeln. Die RBX ist ein Handschuhkasten, der für die Reparatur von mit Tritium kontaminierten Apparaten ausgestattet ist. Parallel dazu entwickelt das TLK in Kooperation mit der Firma Air Squared eine neue tritiumkompatible Scroll-Pumpe. 2017 lieferte Air Squared die erste Scroll-Pumpe an das TLK. Dieses führte Experimente zur Messung von Pumpenkennlinien durch. (Abbildung 3).

Kontakt: Stefan.Welte@kit.edu

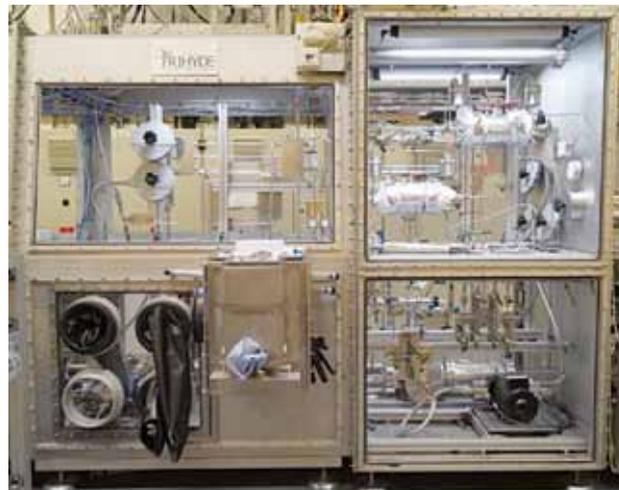


Abb. 4: Der experimentelle Aufbau des Tritium-Hydrogen-Deuterium-Experiments im TLK.

Tritium- und Wasserstoffanalytik

Unerlässliche Voraussetzungen für die am TLK mit Tritium durchgeführten Experimente sind die zuverlässige Bilanzierung und quantitative Analyse der sechs Wasserstoffisotope H₂, HD, D₂, HT, DT und T₂ sowie weiterer vorkommender tritierter Verbindungen, beispielsweise HTO. Angesichts der Vielfalt der eingesetzten Prozessmedien und experimentellen Bedingungen, wie Druck, Temperatur, Tritiumkonzentration und Phasenzustand, müssen Experimentatoren und Ausrüstung hohe Anforderungen erfüllen.

Das TLK verfügt über langjährige Erfahrungen im Einsatz vielfältiger klassischer Tritiumanalytikmethoden, wie Kalorimeter, Ionisationskammern und Gaschromatographen, und verbessert diese Methoden sowie die dahinterstehenden Kalibrierverfahren kontinuierlich. Darüber hinaus fokussiert es auf die Neu- und Weiterentwicklung hochpräziser Analytikmethoden, wie Laser-Raman-Spektroskopie, Beta-induzierte Röntgenspektroskopie (BIXS) und Infrarot-Spektroskopie, entsprechend den gestiegenen Anforderungen durch KATRIN und die Fusion.

TriHyDe

Zur Weiterentwicklung und Kalibrierung der bestehenden Tritiumanalytik benötigt das TLK genaue Gasmischungen aller sechs Wasserstoffisotope in einem weiten Druck- und Konzentrationsbereich. Das TLK baut dazu den Tritium-Hydrogen-Deuterium-Kreislauf (TriHyDe) auf. In dieser Anlage lassen sich mithilfe zweier exakt bekannter Mischvolumina anhand des Druckverhältnisses beliebige Gaszusammensetzungen mit Mischungunsicherheiten <2 % herstellen, die anschließend in situ anhand verschiedener Messtechniken analysiert werden können.

Ein Ziel von TriHyDe ist die Kalibrierung des am TLK entwickelten Laser-Raman-Systems (LARA) zur Überwachung der Isotopenzusammensetzung der Tritiumquelle für KATRIN. Dabei hat die Bestimmung der Isotopenzusammensetzung der Quelle direkten Einfluss auf die Neutrinomassenbestimmung. Daneben können weitere Analyseverfahren wie Beta-induzierte Röntgenspektrometrie, Massenspektrometer oder Ionisationskammern inline kalibriert und verglichen werden.

Nach dem erfolgreichen verfahrenstechnischen und elektrischen Aufbau befindet sich das System zurzeit in der Inbetriebnahmephase. Der Palladium-Permeator zur Reinigung von Tritiumproben wurde erfolgreich getestet und integriert; die Schnittstelle zwischen Handschuhbox und LARA-System wurde installiert. Erste Messungen mit Tritium sind für Anfang 2018 geplant.

CLARA

Das TLK entwickelte die vorhandenen LARA-Systeme 2017 durch Aufbauplanungen für ein Kapillar-Laser-Raman-System weiter. In den bisher vorhandenen LARA-Systemen werden die in einer tritiierten Gasmischung vorhandenen Moleküle mithilfe eines Lasers nur in einem räumlich eng begrenzten Volumen (mit ca. 6 mm Länge) angeregt und wird die emittierte Raman-Strahlung zur Analyse genutzt. Das neuartige Kapillar-Laser-Raman-System (CLARA) nutzt eine etwa 80 cm lange gasgefüllte Nickel-Kapillare, durch die ein Laserstrahl gesendet wird. Dadurch vergrößert sich das Volumen, in dem die Gasmischung angeregt werden kann, und damit steigt auch die Intensität der aufgenommenen Raman-Strahlung. Eine Goldbeschichtung im Inneren der Kapillare reflektiert das erzeugte Raman-Licht zum Spektrometersystem. Durch diese Anordnung lässt sich das Signal-Rausch-Verhältnis um etwa zwei Größenordnungen verbessern. Dies ermöglicht kürzere Messzeiten, geringere Probendrücke oder preiswertere Laser. Für 2018 sind der Aufbau des Systems sowie erste Messungen mit H, D geplant.

Weiterentwicklung der LARA-Kalibrierung

In den vergangenen Jahren wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich die Raman-Systeme im TLK in situ kalibrieren lassen: Anstelle der Gaszelle wird ein optischer Standard in das System eingebaut, durch dessen zertifiziertes Emissionsspektrum sich das Raman-Spektrometer genau kalibrieren lässt. 2017 wurde das Verfahren systematisch untersucht und dabei weiterentwickelt, sodass es sich nun ebenfalls innerhalb einer Handschuhbox einsetzen lässt und Genauigkeiten im niedrigen Prozentbereich liefert.

Kontakt: Marco.Roellig@kit.edu

Physik der Wasserstoffisotope

Im Bereich Physik der Wasserstoffisotope wird vor allem der Isotopeneffekt zwischen Protium (H), Deuterium (D) und Tritium (T) genutzt, um Erkenntnisse über die verschiedenen Prozessen zugrunde liegende Physik zu erlangen. Von Interesse sind sowohl die molekularen Eigenschaften selbst als auch die Wechselwirkungen zwischen Molekülen und anderer Materie. Erkenntnisse dazu können Fragen beantworten, wie sie beispielsweise bei der Entwicklung von Analytiksystemen oder bei Prozessen wie der Isotopentrennung aufkommen. Das TLK führt dazu experimentelle sowie theoretische Arbeiten durch.

Die in diesem Bereich begonnenen Arbeiten werden häufig in anderen Bereichen fortgeführt, in denen es um konkrete Anwendungen geht. Daher bestehen enge Verknüpfungen innerhalb des gesamten Forschungsfelds ebenso wie mit den Bereichen kryogene Stoffeigenschaften sowie Tritiumextraktion und -rückgewinnung. Derzeit werden Wasserstoffisotope und ihre Wechselwirkung untereinander, wie die Bildung von molekula-



Abb. 5: Konverter des Testaufbaus. Das mittlere U-Rohr enthält das Katalysatormaterial. Am Ein- und Ausgang des U-Rohrs befindet sich jeweils ein Pt-100-Sensor zur Temperaturmessung.

ren Dimeren beim Experiment KATRIN, oder die Wechselwirkung mit fester Materie, wie bei der katalytischen Ortho-Para-Konversion, genauer untersucht.

Kryogene Ortho-Para-Wasserstoffkatalyse

Molekularer Wasserstoff erscheint in zwei Formen: Ortho-Wasserstoff (o) und Para-Wasserstoff (p). Sie unterscheiden sich in ihren Eigenschaften mehr oder weniger stark. Bei Raumtemperatur liegt das op-Gleichgewicht bei ca. 3:1, bei 20 K fast vollständig bei reinem Parawasserstoff. In der flüssigen Phase findet die op-Konversion auf natürlichem Weg in einem Zeitraum von Stunden bis zu wenigen Tagen statt. Die dabei frei werdende Energie führt zum Verdampfen des Wasserstoffs und macht damit eine dauerhafte Lagerung unmöglich. Um diesen Effekt zu verhindern und eine Rückverflüssigung während der Lagerung und des Transports überflüssig zu machen, wird die op-Konversion bereits während der Verflüssigung mithilfe von Katalysatoren erzwungen. Der dabei meistverwendete Katalysator ist Eisenoxid (Fe_2O_3).

Solche Wasserstoffverflüssiger werden in Bezug auf die verwendete Katalysatormenge derzeit meist überdimensioniert, da die Leistungsparameter der Katalysatoren noch nicht genau genug bekannt sind. Eine genauere Kenntnis dieser Parameter erlaubt die Auslegung effizienterer Wasserstoffverflüssiger, wodurch sich in großen Anlagen viel Energie einsparen lässt.

Zur Untersuchung und Charakterisierung solcher Katalysatormaterialien baute das TLK eine Versuchsanlage auf, mit der sich sowohl intrinsische Eigenschaften des Katalysators als auch die Abhängigkeit der op-Konversion von Druck, Fluss und Temperatur untersuchen lassen. In der Versuchsanlage wird Gas in einem Kreislauf durch einen mit Eisenoxid gefüllten Konverter und anschließend durch eine Raman-Zelle zirkuliert, mit der das op-Verhältnis inline und in Echtzeit gemessen wird. Durch das Eintauchen des Converters (Abbildung 5) in einen mit flüssigem Stickstoff gefüllten Dewar beginnt die heterogene Katalyse. Um den op-Katalyseprozess genau zu untersuchen, wird nur eine geringe Menge an Katalysatormaterial verwendet, damit pro Durchlauf durch den Konverter nur ein Teil des Gases katalysiert wird. Durch die gleichzeitige Raman-Messung des op-Verhältnisses lässt sich die zugehörige anlagenspezifische Zeitkonstante bestimmen. 2017 wurden Aufbau und Inbetriebnahme der Anlage erfolgreich abgeschlossen; der reguläre Messbetrieb wurde aufgenommen. Anhand der ersten Messreihen wurde die Zeitkonstante der op-Konversion für Pro-

tium (H_2) abhängig von Druck und Fluss untersucht. Mit Hilfe einer mathematischen Modellierung der Anlage soll nun aus der anlagenspezifischen Zeitkonstante eine materialspezifische Zeitkonstante gewonnen werden. Diese kann dann dazu dienen, beliebige Konvertersysteme auszulegen.

Molekularer Wasserstoff, Cluster und Dimere

Das Experiment KATRIN nutzt zur Messung der Masse des Neutrinos eine gasförmige Quelle aus molekularem Tritium, T_2 . Beim Zerfall erhält das Tochtermolekül $3HeT^+$ einen Rückstoß, der für die Neutrinomassenanalyse berücksichtigt werden muss. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass Tritium aufgrund der niedrigen Temperaturen in der KATRIN-Quelle in Form von Dimeren – Clustern aus zwei Wasserstoffmolekülen – vorliegt. Diese Cluster würden aufgrund der höheren Masse einen geringen Rückstoß erfahren (Abbildung 6). Bisher wurde angenommen, dass Cluster oberhalb von 27 K nur in geringen Konzentrationen auftreten und daher nicht signifikant zur Energiebilanz beitragen. Mit den 2017 durchgeführten Messungen wurde zunächst die relative Konzentrationsänderung der D_2 -Dimere abhängig vom Druck (0,5 bis 2,8 bar) und der Temperatur (19 bis 32 K) untersucht. Folgende Fragen bleiben offen: Wie viele Dimere befinden sich absolut in der Quelle? Welchen Einfluss haben Dimere durch die Masse, innere Anregung und Dissoziation auf die Energiebilanz und damit die KATRIN-Systematik?

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 gibt keine Antwort auf die Frage, warum die Allgemeine Relativitätstheorie auf kleinen Skalen nicht mit der Quantenphysik kompatibel ist. Darüber hinaus sollten Neutrinos nach dem Standardmodell masselos sein, doch die Beobachtung von Neutrinooszillationen weist eindeutig auf eine winzige Masse hin. All diese Unzulänglichkeiten verlangen nach einer experimentellen Suche nach neuer Physik, die ein neues Verständnis des Universums und der grundlegenden Prinzipien eröffnen wird.

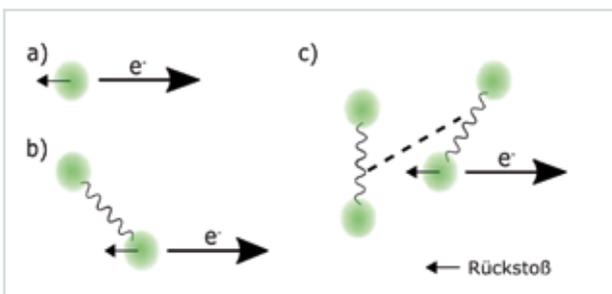


Abb. 6: a) zeigt den Zerfall eines einzelnen Tritiumatoms. Der Rückstoß erfolgt entgegen der Richtung des emittierten Elektrons. b) zeigt den Zerfall eines Tritiummoleküls. Dabei kann der Rückstoß zu einer Rotation führen. c) zeigt den Zerfall für ein Dimer. Der Rückstoß kann dabei unter anderem zur Rotation des Dimers oder zur Variation des Abstands der Moleküle zueinander führen.

Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN

Ziel des Karlsruhe Tritium Neutrino Experiments KATRIN ist die modellunabhängige Messung der Neutrinomasse mit einer Sensitivität von $200 \text{ meV}/c^2$. Die Motivation für KATRIN ergibt sich aus der Schlüsselrolle von Neutrinos in der Astroteilchenphysik, 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 β -Zerfall molekularen Tritiums nahe dem kinematischen Endpunkt von 18,6 keV (maximale beim β -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 m lange Experimentiereinrichtung geführt. Ein System aus zwei elektrostatischen Retardierungsspektrometern erlaubt es, die Elektronenenergien mit einer Auflösung von 0,93 eV zu bestimmen (Abbildung 7).

Derzeit ist eine weltweite Kollaboration mit mehr als 150 Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern unter Federführung des KIT damit befasst, dieses Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik am und im Tritiumlabor Karlsruhe aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Design, Aufbau und erfolgreiche Ausführung des Experiments KATRIN stellen höchste Anforderungen an die Prozesstechnik, besonders die Tritiumverfahrenstechnik, die Ultrahochvakuum- und die Kryotechnik sowie die Stabilisierung der Hochspannung.

Im Rahmen von KATRIN hat das ITEP die verantwortliche Leitung für die Tritiumprozesstechnik sowie die Kryotechnologie inne. Die Arbeit des ITEP ist zu mehr als 95 % im Quell- und Transportsystem angesiedelt (Abbildung 7). Wegen der Handhabung großer Mengen an Tritium (40 g pro Tag) wird das System komplett im TLK und mit dessen Expertise aufgebaut.

Hauptbestandteil ist ein WGTS (Windowless Gaseous Tritium Source) genanntes, supraleitendes Magnetsystem von 16 m Länge, das in seinem $\approx 30 \text{ K}$ kalten Strahlrohr die gasförmige Tritiumquelle beherbergt. Außerdem befinden sich auf der Strahlachse im rückwärtigen Teil das sogenannte Kalibrations- und Monitoringsystem (CMS) und im vorderen Teil – Richtung Spektrometer – das Transportsystem. Dieses hat die Aufgabe, die -Elektronen aus dem Tritiumzerfall ins Spektrometer zu leiten und gleichzeitig über Pumpen den Tritiumgasfluss ins Spektrometersystem um mehr als zwölf Größenordnungen zu reduzieren. Dies geschieht einerseits in der differentiellen Pumpstrecke (DPS2) durch den Einsatz von Turbomolekularpumpen und andererseits – als letzte Stufe – mit der kryogenen Pumpstrecke (CPS), die bei 3,5 bis 4 K betrieben wird. Sowohl DPS2 als auch CPS stellen supraleitende Magnetkryostatsysteme von 7 bzw. 9 m Länge dar.

2017 wurde der Aufbau der Quell- und Transportsektion weitestgehend abgeschlossen. Dies stellt einen wichtigen Meilenstein im Projekt dar, weil damit 2018 alle Gaskreisläufe gemeinsam in Betrieb gehen können – zunächst mit inaktiven Gasen (H_2 , D_2), dann mit radioaktivem Tritium. Nachdem im Jahr 2016 WGTS, DPS und CPS-Magnetkryostaten erfolgreich in den STS-Bereich integriert und deren Kühl- und Magnetsysteme charakterisiert worden waren, laufen diese nun zusammen mit der Kry-

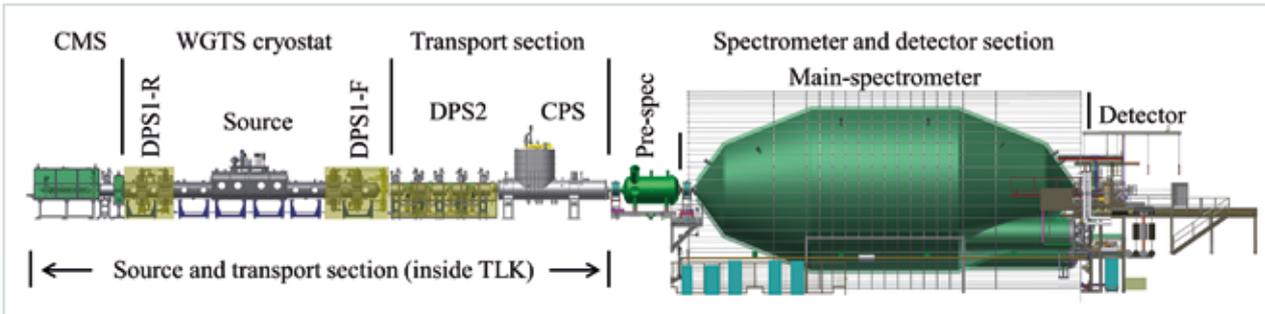


Abb. 7: Schematische Darstellung des internationalen Großexperiments KATRIN. Die bei β -Zerfällen in einer hochintensiven, fensterlosen, molekularen Tritiumquelle (WGTS) entstehenden Elektronen werden über eine Tritiumpumpstrecke mit den aktiven und passiven Elementen DPS2 und CPS zu einem System aus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

oinfrastruktur des ITEP im Routinebetrieb. Die Einzelsysteme waren 2016 erfolgreich in Betrieb gegangen. 2017 begann die Verrohrung der Einzelsysteme hin zu den inneren Tritiumkreisläufen von KATRIN sowie dem TLK, und die notwendige Instrumentierung dieser Systeme wurde installiert. Die verfahrenstechnischen Arbeiten an WGTS und DPS wurden im Juli 2017 abgeschlossen. In den ersten Wochen des Jahres 2018 werden alle weiteren Arbeiten beendet, die Tritiumgaskreisläufe getestet und in Betrieb genommen.

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. Dazu wurden die notwendigen Systeme und Rohrleitungen vorbereitet.

Die Mess- und Automatisierungsgruppe des TLK erfüllte bei den Arbeiten an KATRIN 2017 ein umfassendes und arbeitsintensives Aufgabenspektrum. Für die TRS und UDH an WGTS, DPS und Rear System übernahm sie hardwareseitig die Planung, Beauftragung und Abnahme der Schaltschränke und programmierte softwareseitig die Prozessleittechnik. Die automatisierungstechnischen Arbeiten an den Tritiumkreisläufen von WGTS, DPS, CPS und Rear System bestanden in der Softwareerstellung für die Automatisierungstechnik einschließlich der Anbindung an die KATRIN-Netzwerke und Datenbanken. Zur Automatisierung von Pumpen, Ventilen und verschiedenen Sensor- und Regeleinheiten wurden verschiedene Treiber- und Steuerbausteine entwickelt. Die dazu erforderlichen Tests liefen an eigens aufgebauten verfahrenstechnischen Versuchsständen.

Um einen sicheren KATRIN-Tritiumbetrieb zu gewährleisten, wurde ein Alarm Control Center eingerichtet, über das sich Meldungen aus der Prozessleittechnik per SMS an die Operatoren verschicken lassen. Neben den umfangreichen Aufbauarbeiten, die 2018 abgeschlossen sein werden, wurde auch eine wichtige Messphase mit radioaktivem Krypton durchgeführt (siehe Highlight 1).

Hochauflösende Laser-Spektroskopie

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

in Testsystemen und hochgenauen theoretischen Berechnungen. Mit fortschreitender Verbesserung der experimentellen und theoretischen Genauigkeit können Abweichungen einen eindeutigen Hinweis auf neuartige Effekte darstellen. 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 Isotopologe H_2 , HD und D_2 . Dagegen wurden HT , DT und T_2 bisher von Präzisionsuntersuchungen ausgeschlossen, unter anderem wegen der radiochemischen Aggressivität von Tritium. Nun planen Forscher am TLK, in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der Vrije Universiteit Amsterdam die hochauflösende Spektroskopie von molekularem Wasserstoff weiter voranzutreiben und dabei erstmals auch die drei radioaktiven Moleküle einzubeziehen. Der Abschnitt Highlight 2 berichtet über die ersten hochauflösenden Messungen an T_2 .

Kontakt: Magnus.Schloesser@kit.edu



Abb. 8: Blick auf den STS-Bereich. Das DPS-System wird gerade in eine Handschuhbox verpackt, verfahrenstechnisch verrohrt und automatisierungstechnisch verkabelt.

Highlight 1 Kryptonmessphase mit dem Experiment KATRIN

In KATRIN wurden 2017 bei einem Testlauf erstmals Elektronen am rückwärtigen Ende des Quellbereichs erzeugt und anhand des magnetischen Führungsfelds durch die 70 m lange Anlage bis zum Detektor geleitet, wo sie schließlich nachgewiesen wurden. Dabei wurde die elektromagnetische Transporteigenschaft des Experiments KATRIN eindrucksvoll demonstriert und optimiert.

2016 waren die Elektronen noch über den Fotoeffekt mit UV-Licht aus einer Goldoberfläche herausgelöst und dann beschleunigt worden. Im Juli 2017 wurde metastabiles Krypton, ^{83m}Kr , als Elektronenquelle verwendet. Dieses radioaktive Gas entsteht beim Zerfall von radioaktivem Rubidium, ^{83}Rb . Anders als Tritium, das ein kontinuierliches Spektrum aufweist, emittiert ^{83m}Kr seine monoenergetischen Konversionselektronen bei definierten Energien bis zu 32 keV. Damit ist dieses Gas prädestiniert, um das Experiment KATRIN zu charakterisieren und seine Energiemessung zu kalibrieren.



Abb. 10: Krypton- ^{83m}Kr -Generator im TLK, bestehend aus Rubidium-Präparat (in Bleiburg) und ^{83m}Kr Einlasssystem in KATRIN-Quelle.

Beim Betrieb mit Krypton kann das WGTS Strahlrohr nicht bei Nominaltemperatur von 30 K betrieben werden, was in diesem Modus durch eine Temperaturstabilisierung mit siedendem Neon erreicht wird. Damit Krypton nicht an den Wänden festfriert, wurde das Strahlrohr mit siedendem Argon bei 100 K betrieben. Auch wurde eine vergleichbare stabile Einspeisung wie im Neonbetrieb in den vorangegangenen Jahren erreicht. Wie Abbildung 9 zeigt, wurde ^{83m}Kr in einem Generator aus Rubidium erzeugt und dann gasförmig in das KATRIN-Strahlrohr bei der WGTS eingelassen. Das Gas verteilt sich dann ähnlich wie später im regulären Betrieb das Tritiumgas innerhalb der WGTS und der DPS. Analog werden auch die Konversionselektronen von ^{83m}Kr magnetisch über die Energieanalyse der Spektrometer zum Detektor geführt. Daher bietet diese Methode eine perfekte Simulation der Tritiumquelle zur Untersuchung der integralen Transporteigenschaften.

Eine weitere Quelle basierte auf Krypton, das auf einer punktförmigen Fläche schockgefroren wurde. Diese Quelle wurde zwischen Spektrometer und Quellbereich in das Strahlrohr gefahren und der Querschnitt abgefahren, sodass sich die räumlich aufgelöste Transmissionsfähigkeit der KATRIN-Spektrometer messen ließ. Durch die Verwendung beider Quellen – gasförmig in Quellbereich und gefroren vor dem Spektrometer –

wurden komplementäre Daten gewonnen. Die wichtigsten Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Der gesamte Hardwarekomplex, der für den Betrieb des Experiments KATRIN notwendig ist, wurde reibungslos über die Messdauer von zwei Wochen betrieben. Neben dem Hardwarebetrieb wurden die Datenaufnahme und die Rohdatenverarbeitung bis hin zur High-Level-Analyse erfolgreich demonstriert.

Wie sich zeigte, lässt sich der magnetische Flussschlauch von 191 Tcm^2 ohne Kollision im Strahlrohr und ohne Energieänderung (adiabatisch) vom Quellbereich durch die Spektrometer zum Detektor führen. Außerdem wurden die theoretischen Modelle der Elektronentransmission in KATRIN validiert und eine globale Ausrichtung

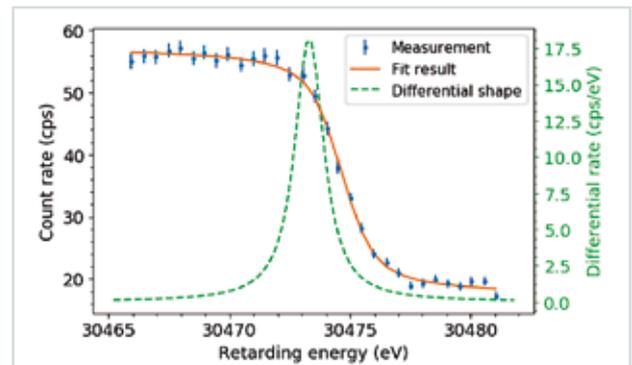


Abb. 9: Konversionselektronen-Linie (L-32) aus gasförmiger ^{83m}Kr Quelle, gemessen im Experiment KATRIN mit Scan der Retardierungsspannung am Hauptspektrometer.

aller Einzelsysteme relativ zueinander gemessen. Die erfolgreiche Kryptonmessphase lieferte nicht nur direkte Ergebnisse für die KATRIN-Charakterisierung vor dem Start der Tritiummessphase, sondern auch Erkenntnisse für die Zeit danach. Wenn die KATRIN-Quelle bei Designaktivität von 10^{11} Tritiumzerfälle pro Sekunde betrieben wird, können sich im Plasma aus den Zerfalls- und Sekundärelektronen sowie den entsprechenden Ionen Raumladungen bilden. Diese Raumladungen führen zu Verzerrungen im Elektronenspektrum, aus dem die Neutrinomasse bestimmt wird. Wird nun Krypton gleichzeitig mit Tritium eingelassen, werden die Verzerrungen auch in den monoenergetischen Kr-Linien zu beobachten sein. Dies ermöglicht dann eine Korrektur im Neutrinospektrum. Die erstmalige Demonstration einer stabilen Erzeugung von ^{83m}Kr und einer zuverlässigen Injektion in das KATRIN-Strahlrohr bildet einen wichtigen Meilenstein für die Plasmadiagnostik während der Neutrinomessphase.

Neben der Charakterisierung des Experiments KATRIN wurden auch hochauflösende Konversionselektronenspektren der 32 keV und 9,4 keV Gammaübergänge mit hoher Statistik aufgenommen. Aus diesen Daten lassen sich die Hyperfeinaufspaltung und weitere schwache Satellitenlinien untersuchen, was ein besseres Verständnis der kernphysikalischen Eigenschaften ermöglicht. Die ersten Ergebnisse, die über die Neutrinocommunity hinaus von Interesse sind, belegen die einzigartige Spektroskopiefähigkeit von KATRIN mit höchster Auflösung, großer Statistik und Energiegenauigkeit.

Highlight 2 Hochauflösende Spektroskopie mit tritiierten Molekülen

In den vergangenen Jahrzehnten ist die Präzision der hochauflösenden Laserspektroskopie an Wasserstoff stetig gestiegen. Diese ist inzwischen genau genug, um tatsächlich neue Theorien zu testen, beispielsweise mit zusätzlichen Dimensionen, die einen Schlüssel zu Quantengravitationstheorien liefern könnten. Einige der Effekte neuer Physik sind proportional zum Produkt der Kernmassen. Daher wird der Schritt von H_2 nach T_2 die Sensitivität darauf um eine Größenordnung verbessern.

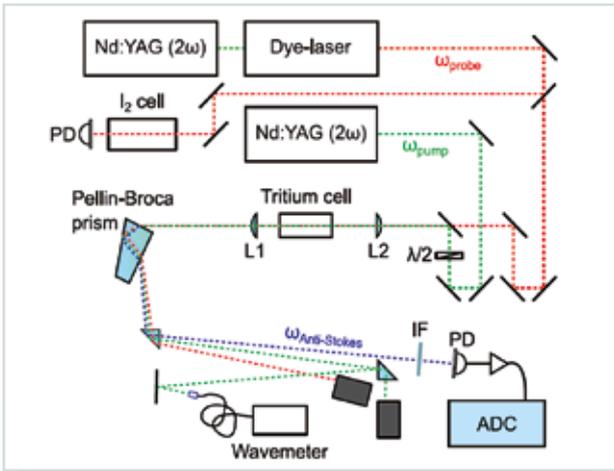


Abb. 11: CARS Aufbau. Zwei schmalbandige gepulste Laser, grün und rot verstimmbar, werden in eine Tritiumgaszelle fokussiert. Falls die Energiedifferenz der Lichtteilchen einem Quantenübergang im T_2 Molekül entspricht, wird Anti-Stokes-Licht (blau) generiert und daraufhin detektiert.

2017 begann das TLK, in Zusammenarbeit mit zwei Gruppen erste hochauflösende Spektren von tritiierten Molekülen aufzunehmen. Das TLK bietet dafür einzigartige Möglichkeiten: eine Tritiuminfrastruktur, mit der sich nahezu beliebige Tritiumproben herstellen lassen, sowie Spektroskopielabore mit modernsten schmalbandigen Lasersystemen, absoluten Frequenzkalibrierungen durch optische Frequenzkämme und hochauflösenden Absorptionsspektrometern, dazu eine langjährige Expertise.

Zusammen mit der Gruppe von Professor Ubachs von der Vrije Universiteit Amsterdam baute das TLK ein System auf der Grundlage von Kohärenter Anti-Stokes Raman-Streuung (CARS – Abbildung 11) auf und stattete es mit einer tritiumgefüllten optischen Gaszelle aus. Damit gelang es, ein hochauflösendes Spektrum aufzunehmen, das zwar mit der Theorie innerhalb der Fehler übereinstimmt, aber in der Genauigkeit ($0,02\text{ cm}^{-1}$) vorherige Messungen aus den 80er-Jahren um einen Faktor fünf übersteigt (Abbildung 12).

Zusammen mit der Gruppe von Professor Dr. Johannes Orphal am Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (IMK-ASF) des KIT maß das TLK hochauflösende Spektren von tritiierten Wassermolekülen (HTO, DTO, und T_2O). Auch dazu lagen bisher nur wenige Daten vor, da weltweit nur wenige Labore tritiiertes Wasser in dieser Konzentration herstellen können und zugleich die entsprechende spektroskopische Expertise besitzen. Die genannte Kollabora-

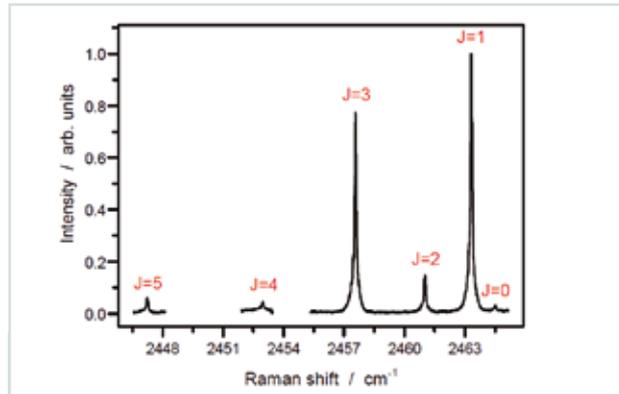


Abb. 13: Hochauflösendes CARS Spektrum der ersten Vibrationsanregung des T_2 Moleküls. Die J Werte stehen für die verschiedenen Rotationsanregungen.

tion deckt beide Punkte hervorragend ab. Durch die bereits durchgeführten und die noch geplanten Messungen mit einem hochauflösenden Fourier Transformations Infrarot Spektrometer des IMK-ASF werden neue Daten erhoben, um die quantenmechanischen Modelle kleiner Moleküle bei höchster Präzision zu validieren.

Zunächst wurde im TLK eine Spektroskopiezelle entwickelt, mit der sich tritiiertes Wasser (beispielsweise T_2O oder HTO) synthetisieren lässt und die trotz der geringen Stoffmenge, die sich aus der Freigrenze von 1 GBq ergibt, noch ausreichend Signalintensität liefert. Die tritiumbeladene Zelle wurde dann in das Spektrometer des IMK-ASF eingebaut und mehrere Tage gemessen.

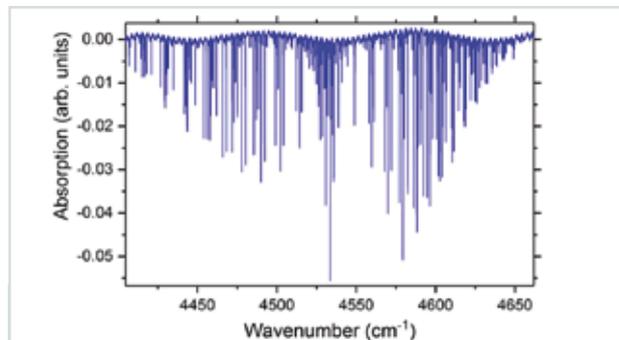


Abb. 12: Hochauflösendes Spektrum der $2v_1$ Bande von HTO.

Ein Überblicksspektrum ist in Abbildung 13 zu sehen. Dieses zeigt eine Absorptionsbande ($2v_1$) des HTO Moleküls. Jede der ca. 300 Linien entspricht demselben Vibrationsübergang, aber einem anderen Rotationsübergang im Molekül. Aus einer Analyse all dieser Linien lässt sich somit die Struktur bestimmen, beispielsweise Bindungswinkel und Bindungsabstände zwischen H, O und T Atom im Molekül.

Abschließend ist zu betonen, dass es sich bei der Spektroskopie dieser tritiierten Wassermoleküle nicht um bloße physikalisch-chemische Grundlagenforschung handelt. Tritiiertes Wasser wird in Spuren sowie in großen Mengen als (Neben-) Produkt in Fusionskraftwerken vorkommen. Da dieser Stoff hochgradig radiotoxisch ist, ist es notwendig, Verfahren zu entwickeln, mit denen er sich auffinden lässt. Die beschriebene Arbeit stellt einen wichtigen Schritt in diese Richtung dar.

40 Jahre ITEP

Highlights Dekade 1977–1986

Verfasser: Dr. Wilfried Goldacker

Das Institut für Technische Physik ging 1977 aus dem IEKP (Institut für Experimentelle Kernphysik) hervor um sich unter der Leitung von Prof. Werner Heintz mit dem Forschungsthema „Grundlagen und technische Anwendungen der Hochstromsupraleitung“ zu widmen. Ziel war es in Deutschland die Aktivitäten zur Supraleitung für Fusionsanlagen in „einem“ Institut zu bündeln welches in enger Zusammenarbeit mit der Industrie die F&E Aufgaben leisten sollte wie es von Prof. Wolfgang Klose, Mitglied des Vorstands, in den Mitteilungen der GFK (Gesellschaft für Kernforschung) formuliert wurde.

Die Arbeiten zu Beschleunigermagneten aus der Zeit der IEKP-Zugehörigkeit wurden mit der Entwicklung des Magnetsystems für den Detektor CELLO des e+e Speicherings PETRA am DESY in Kooperation mit CEN/Saclay fortgesetzt (s. Abb.1). ITEP verantwortete die Entwicklung der beiden Kompensationsspulen samt des Kryostaten und der Helium Transferleitung.



Abb. 1: Supraleitender Magnet für CELLO Detektor (1979)

Zur Entwicklung von Kernfusionsanlagen waren große supraleitende Magnete unerlässlich und das Institut leistete in führender Position umfangreiche Design- und Auslegungsarbeiten der Magnetsysteme für die unterschiedlichen Reaktorkonzepte wie die Tandem Spiegelmaschine Karlsruhe (TASKA), den Internationalen Tokamak-Reaktor (INTOR), den Next European Torus (NET) und Wendelstein 7X (W7X), für die drei erstgenannten war ITEP verantwortlich. Das erste experimentelle Großexperiment war die internationale Large Coil Task (LCT), eine Tokamak-Anordnung von 6 D-förmigen Magneten in einem Torus des Oak-Ridge-National-Lab. in USA. Das ITP entwickelte verantwortlich den EURATOM-LCT-Magneten mit einem Feld von 9T bei 3.8 K (Abb.2) und transferierte ihn nach erfolgreichem Test in der TOSKA-Testanlage (erbaut 1979-83) in die USA zum Test im Torus-Verbund (1984). Besondere Umstände in der Forschungspolitik der USA veranlasste das ITEP, nun unter der Leitung von Prof. Peter

Komarek, die Abschlussberichte des Großexperiments zu erstellen (1986-87), die technologische Basis aller Magnete für die nachfolgenden Reaktor-Projekte bis hin zu ITER.



Abb.2: EURATOM-LCT-Magnet in TOSKA-Testanlage



Abb.3: LCT-Roebel-Leiter mit supraleitenden NbTi-Strands, separiert durch Kühlkanäle mit Stahlhülle

Eine Besonderheit des LCT-Magneten war das erstmals in einer Roebelstruktur verseilte supraleitende Kabel aus NbTi-Supraleiterdrähten mit vollständiger Transposition der Strands zur Reduktion der Wechselstromverluste und dessen industrielle Herstellung (Abb.3).

Die Anwendungen der Supraleitung im ITP orientierten sich parallel auch an Innovationen zur Energietechnik mit Entwicklungsarbeiten zum supraleitenden Turboläufer von Synchronmaschinen, Projekt ROTAX mit BBC und Siemens/KWU (1974–1983) oder der Entwicklung des Magnetschweiders mit supraleitenden Multipolspulen, dem Projekt ESCOS (1977–1981).

Die Anwendungen ständig begleitend erfolgten intensive Arbeiten zur Leiterentwicklung und zu physikalischen Grundlagen der Supraleitung. Leiter sind in hohen Magnetfeldern großen Lorentzkräften und damit verbundenen Dehnungen ausgesetzt. Auf Basis eines 13T Splitcoil-Magneten wurde daher die Testanlage FBI entwickelt, die Strommessungen unter hohen Zugkräften gestattete (Abb.4). Das grundlegende Verständnis der Wechselwirkung von mechanischen Kräften und der supraleitenden Eigenschaften war Gegenstand intensiver Forschung. Messungen unterschiedlich verstärkter Nb₃Sn-Drähte in der FBI-Anlage demonstrierten die Möglichkeit einer gezielten Vorspannung des Supraleiters und damit einer anwendungsbezogenen geschneiderten Verstärkung (Abb.5). Als Material für hohe Magnetfelder oberhalb NbTi wurden Nb₃Sn-Drähte systematisch fortentwickelt durch Zulegierung verschiedener ternärer Zusätze, die zu einer Stromerhöhung im hohen Feld (>15 T) führten. Ternäre Drähte erweiterten schrittweise die Anwendbarkeit der Drähte in Feldern um 25 T (Abb.6). Neue Supraleiter, wie Chevrelphasen, waren hoffnungsvolle Kandidaten mit sehr hoher Feldverträglichkeit und wurden als anwendbare Drähte zu einer führenden Performance entwickelt.

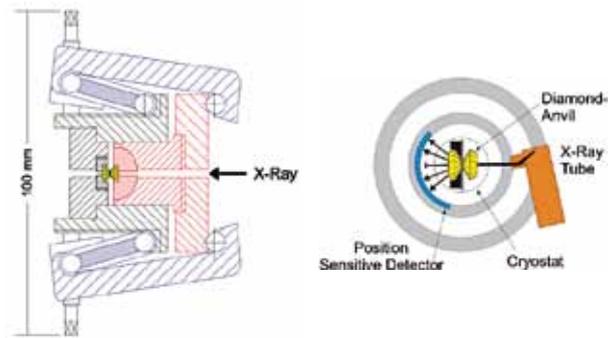


Abb.7: Schematische Skizzen der Diamantdruckzelle (1GPa) und der Röntgendiffraktionsanlage

Für grundlegende Untersuchungen an Supraleitern wurde Röntgendiffraktion unter Druckanwendung (Diamantzelle) entwickelt (Abb.7) und später mit einer Apparatur zur Messung der kritischen Temperatur T_c unter Druck ergänzt. Zusammen mit einer neuen hochauflösenden spezifischen Wärme Anlage konnte für viele Materialien ein tieferes Verständnis der Physik erzielt werden, erarbeitet in zahlreichen Diplom- und Doktorarbeiten.

Im Bereich der Kyotechnik entstand der wichtige Experimentierstand HELITEX, in dem strömungs-technische Untersuchungen und Wärmeübergangsmessungen an Helium bei verschiedenen thermodynamischen Zuständen über eine lange Zeit durchgeführt werden konnten (1977–1994, Abb.8).

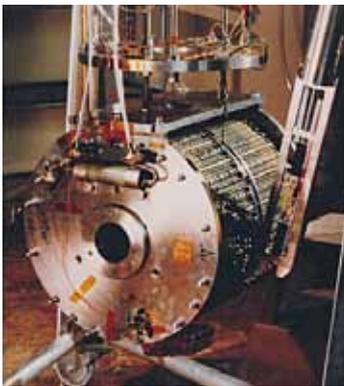


Abb.4: Split-Coil-Magnet (13T) der FBI-Testanlage mit Zugspannungshalter (rechts) für supraleitende Drähte

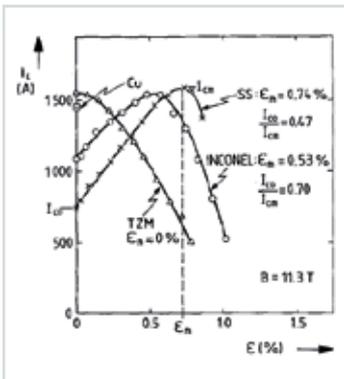


Abb.5 Verhalten des kritischen Stroms verschieden verstärkter Nb₃Sn-Drähte unter axialer Zugspannung, gemessen in FBI-Testanlage

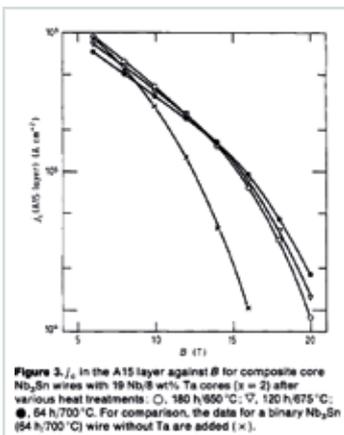


Abb.6 Stromerhöhung Ta-legierter Nb₃Sn-Drähte im Hochfeld (rechts), Vergleich mit binärer Referenz (links)



Abb.8: HELITEX-Anlage

Highlights Dekade 1987–1996

Verfasser: Dr. Theo Schneider

Als verkleinertes Modell für zukünftige Kernfusionsreaktoren und ergänzend zu dem Fusionsmagnetprojekt LCT (Large Coil Task) baute das Institut die Anlage TESPE - eine Laboranordnung von toroidalen supra-leitenden Spulen- auf, die die quantitative Überprüfung von Entwurfsgrundlagen und Auslegungskriterien, die Entwicklung von Komponenten (Supraleiter) und Messtechniken für große Spulen sowie Sicherheitsuntersuchungen ermöglichte. TESPE konnte im Endausbau mit sechs D-förmigen NbTi-Spulen 1987 erfolgreich betrieben werden und wichtige Erkenntnisse zum sicherheitstechnischen Systemverhalten liefern (Abbildung 1a). Im Zuge der Arbeiten zum Stellarator W7-X wurde TESPE 1992 zur STAR-Anlage umgebaut.

Die Torusanordnung der Spulen wurde durch eine lineare Anordnung ersetzt (Abbildung 1b), so dass sie als Testanlage für Modellwicklungen des W7-X Leiters zur

Verfügung stand. Ziel eines weiteren Fusionsmagnetprojektes war die Entwicklung und Bau der Poloidal-feldspule POLO, die schnell gepulst werden konnte (Abbildung 1c). Hierzu erarbeitete das ITP ein neues Leiterkonzept, entwickelte hochspannungsfeste Stromzuführungen (30 kA / 23 kV) und testete 1994/95 die POLO-Spule erfolgreich. Ein ergänzender Test der LCT-Spule zeigte 1996, dass durch forcierte Helium II-Kühlung mit überkritischem Druck die Magnetfeldstärke auf 11 Tesla bei einem Magnetstrom von 19.4 kA gesteigert werden konnte (Abbildung 1d).

Die Experimentieranlage HOMER I erreichte 1987 durch einen weiteren Ausbau mit (NbTi)3Sn-Spulen als weltweit erstes rein supraleitendes Magnetsystem eine Magnetfeldstärke von 20.1 T (Abbildung 1a und 1b). Basierend auf den Erfolgen in der Magnetsystem- und Kryostatentwicklung wurde mit der Firma Bruker Analytik GmbH

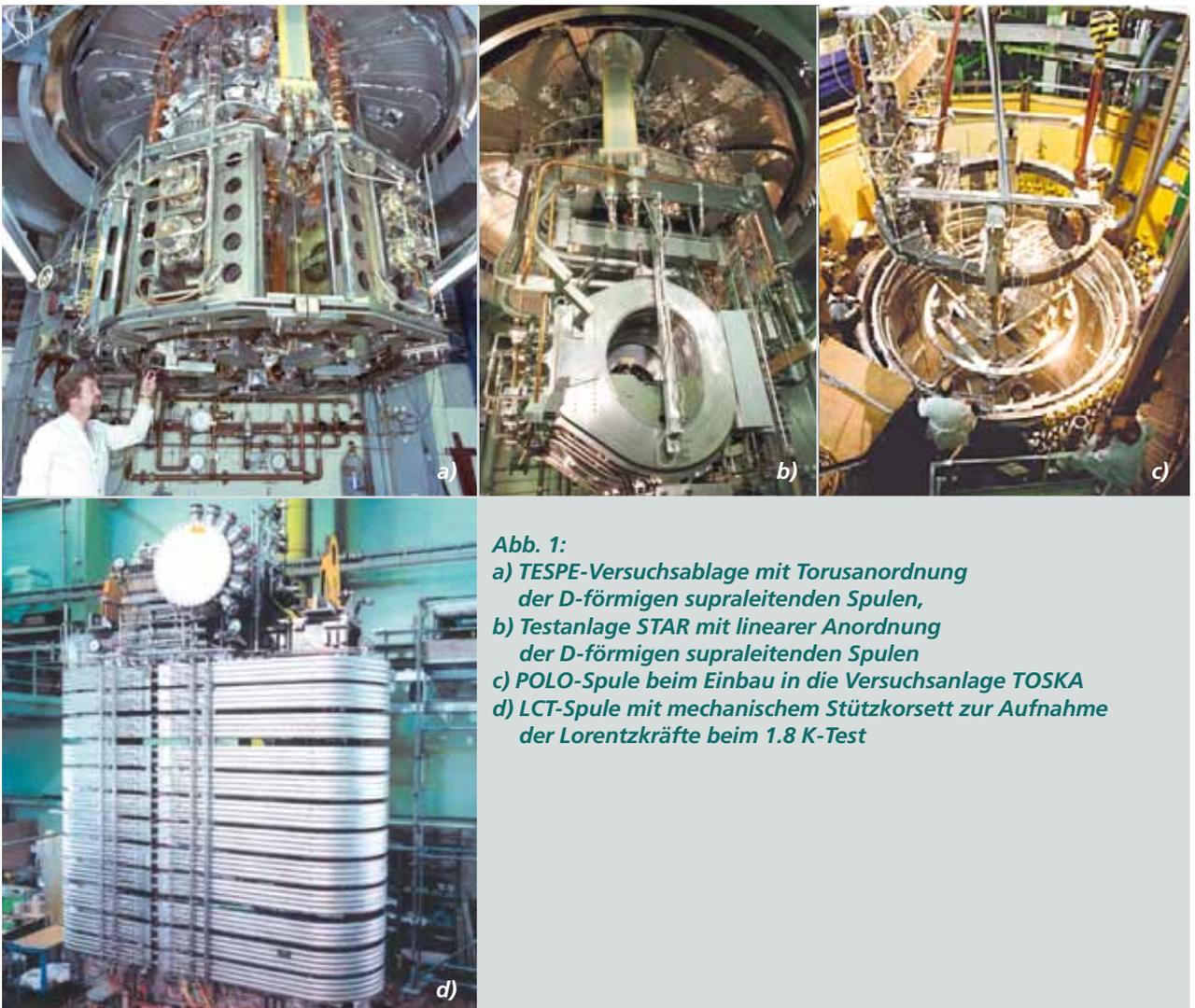


Abb. 1:

- a) TESPE-Versuchsablage mit Torusanordnung der D-förmigen supraleitenden Spulen,
- b) Testanlage STAR mit linearer Anordnung der D-förmigen supraleitenden Spulen
- c) POLO-Spule beim Einbau in die Versuchsanlage TOSKA
- d) LCT-Spule mit mechanischem Stützkorsett zur Aufnahme der Lorentzkräfte beim 1.8 K-Test

eine Kooperation über die Entwicklung hochauflösender Hochfeld-NMR-Spektrometer geschlossen. Im Verantwortungsbereich des ITPs lagen Berechnungen, Konstruktion, Bau und Test eines NMR Magnetsystems mit einer Feldstärke von 17.63 T sowie Auslegung, Konstruktion und Test eines verlustarmen mW-Kryostaten für LHe II-Temperaturen (siehe Abbildung 1c). Das weltweit erste 750 MHz NMR-Spektrometer wurde im Jahr 1991 auf den Markt gebracht. Nach gelungenem Technologietransfer an Bruker folgten neue Kooperationen, in denen 1995 das weltweit erste 800 MHz-NMR-Spektrometer erfolgreich an der Goethe-Universität in Frankfurt installiert wurde.

Um ein tieferes Verständnis über die grundlegenden Mechanismen supraleitender Materialien zu erhalten wurden bis 1988 die Anlagen für Druckexperimente und zur Dilatometrie neu konzipiert und installiert.

Bei der Entwicklung von Hochleistungs-Gyrotrons für die ECRH-Heizung von Fusionsreaktoren wurde 1990 ein Prototyp eines 140 GHz Gyrotrons dem Stellarator

W7-AS für Pilotexperimente zur Energieübertragung im Plasma bereitgestellt. Die kryotechnische Infrastruktur des Instituts wurde 1993 mit der Inbetriebnahme der bis dato modernsten He-Kälteanlage (2 kW @ 4 K) und 1994 durch den thermischen Isolationsteststand THISTA zur Untersuchungen optimaler thermischer (Super-) Isolationen erweitert (Abbildung 3a und 3b).

Am Niederspannungsnetz der Badenwerk AG, Karlsruhe, in Fischweier (Albtal) beim Sägewerk Schoenthaler wurde der erste schnelle Kompensator mit Supraleitendem Magnetischen Energiespeicher (SMES) (Abbildung 3c) 1997 versuchsweise in Betrieb genommen. Der Speicher besteht aus einer mit flüssigem Helium (4,2K) gekühlten supraleitenden Spule aus Mischmatrix-NbTi-Draht und ist über einen leistungselektronischen Umrichter an das 400V-Drehstromnetz angeschlossen. Der mit dem SMES ausgestattete Kompensator wurde entwickelt, um an einem Anschlusspunkt von Verbrauchern verursachte Netzurückwirkungen zu kompensieren und damit stöempfindliche Verbraucher zu schützen

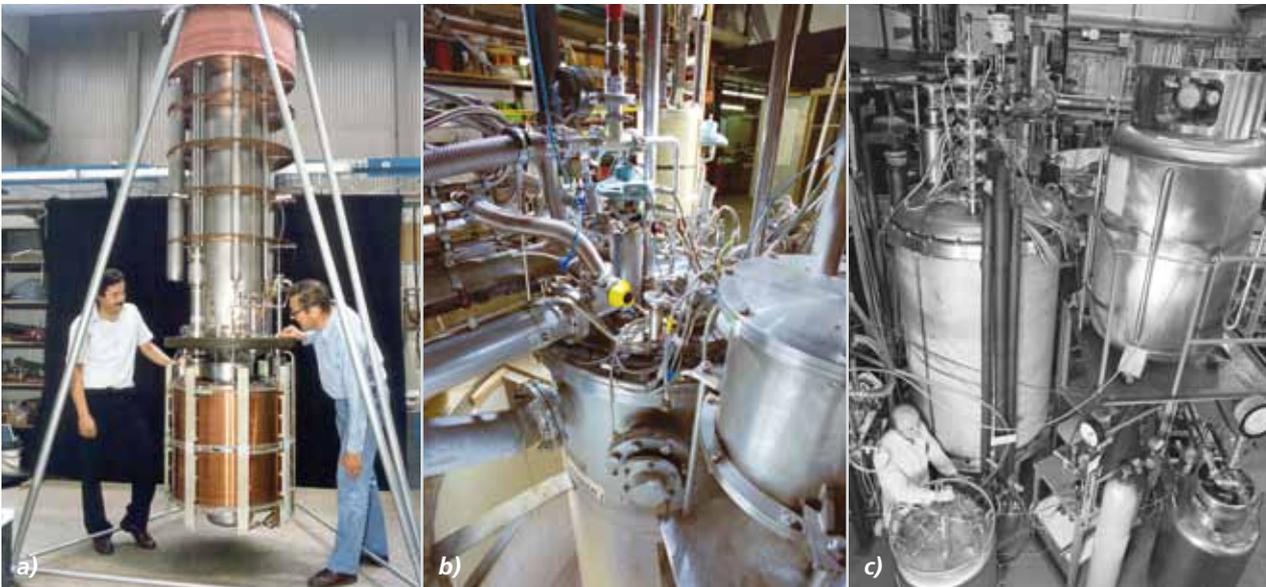


Abb. 2: a) Magnetsystem HOMER I – NbTi-Sektion b) Magnetsystem HOMER I – 20 T-NbSn-Sektion c) Test des verlustarmen mW-Kryostaten zur Entwicklung des 750 MHz NMR-Magnetsystems

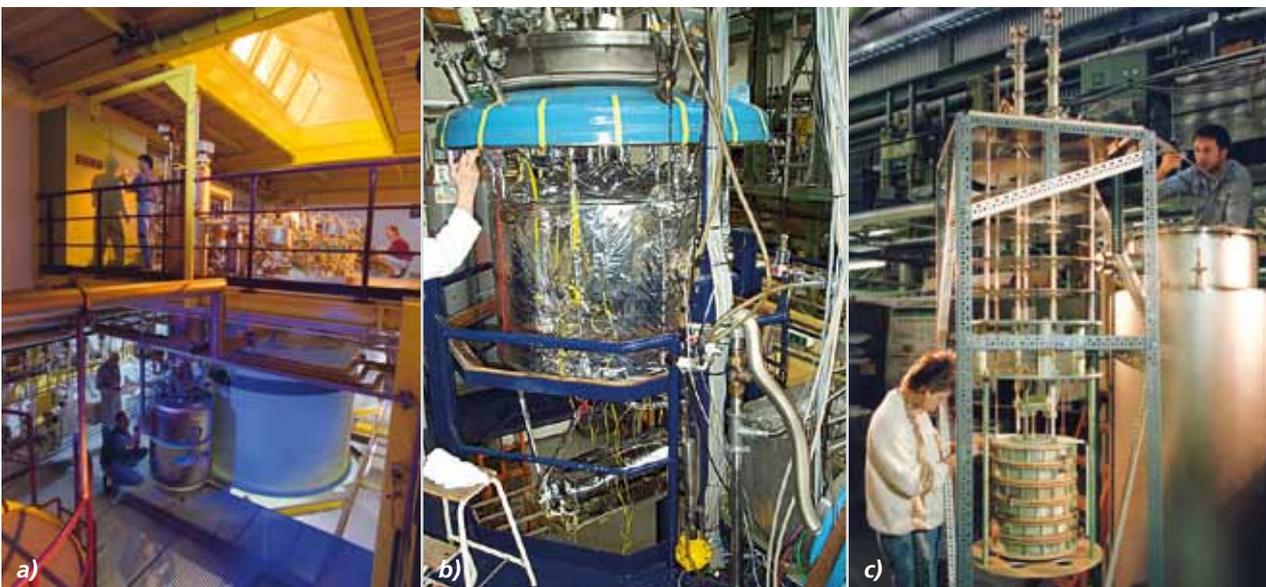


Abb. 3: a) 2 kW- Kälteanlage b) THISTA –Messstand c) SMES-Solenoidspulen des Kompensators

Highlights Dekade 1997–2006

Verfasser: Dr. Walter Fietz

2017 feierte das ITEP sein 40-jähriges Bestehen. Wir blicken aus diesem Anlass auf wichtige Projekte, Ergebnisse und Ereignisse zurück. Im Folgenden sind die Highlights der Jahre 1997 bis 2006 zusammengefasst.

Bei den Arbeiten für den Stellarator W7-X war das ITEP eingebunden in die Auslegung der supraleitenden Magnete, die einen NbTi-Leiter in Cu-Matrix mit Al-Hülle verwenden. Im Rahmen der Vorbereitungen zum Bau dieser Spulen fertigte das ITEP eine W7-X Demonstratorspule und testete sie 1998 erfolgreich in der Anlage TOSKA (Abbildung 1).



Abb. 1:
W7-X
Demo-
spulentest
in TOSKA.

Im März 2001 stellte Bruker BioSpin das erste hochauflösende 900 MHz-NMR-Spektrometer vor (Abbildung 2). Das Team des Hochfeldlabors bearbeitete im Rahmen eines Technologietransferprojekts die Themen Magnetauslegung, Leiterspezifikationen und Supraleitercharakterisierung. Zudem wurde die Magnet-Test-Anlage MTA I umgebaut, um die ersten Tests des 21,1 T-Magneten durchzuführen.



Abb. 2: Das erste 900 MHz-NMR-Magnetsystem.

Im Rahmen der Technologieentwicklung für ITER wirkte das ITEP bei der Entwicklung und dem Bau der Modellspule TFMC (Abbildung 3) im Maßstab 1:3,5 mit. Die TFMC diente dazu, die für ITER benutzten Designcodes zu validieren, die industriellen Fertigungsmethoden zu erproben und die Funktionsfähigkeit der Spule experimentell zu überprüfen. In einer ersten Testphase 2001

wurde die TFMC erfolgreich in TOSKA getestet. In einer zweiten Testphase wurde die TFMC erfolgreich im Hintergrundfeld der LCT-Spule bei Strömen bis zu 80 000 A und Feldern von 10,5 T getestet (Abbildung 4). Bei diesen Tests wurden Design, Modellierungen und industrielle Fertigung validiert sowie die prinzipielle Funktionsfähigkeit des ITER-TF-Spulentendesigns belegt.

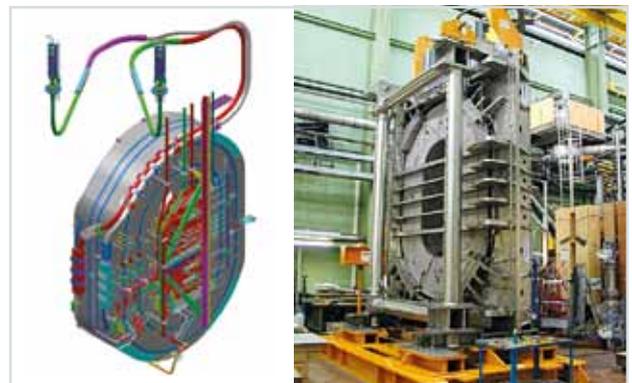


Abb. 3: Grafische Darstellung des Prinzips der ITER-Modellspule TFMC (links) und die fertige Modellspule (rechts).



Abb. 4: Einbau der TFMC und der LCT-Spulen für den kombinierten Test in TOSKA.

Supraleitende Strombegrenzer sollen im Fehlerfall Stromnetze elektrisch trennen und dadurch auftretende Kurzschlussleistungen begrenzen. Das ITEP entwickelte einen supraleitenden Strombegrenzer für 10 kV/10 MVA, der als aktive Elemente bifilare Bi2223-Spulen auf Massivmaterialbasis enthält. 2003 belegten erste Tests die Funktionsfähigkeit (Abbildung 5) des Strombegrenzers. 2004 und 2005 wurde dieser dann als weltweit erster resistiver Strombegrenzer im Feldversuch getestet.

Auf der Basis der Erfahrungen des ITEP mit dem Bau von Stromzuführungen entwickelten ITEP und CRPP gemeinsam einen HTS-Stromzuführungsdemonstrator für ITER (Abbildung 6). Dieser wurde 2004 erfolgreich in



Abb. 5: Strombegrenzer für das BMBF-Projekt CURL 10.

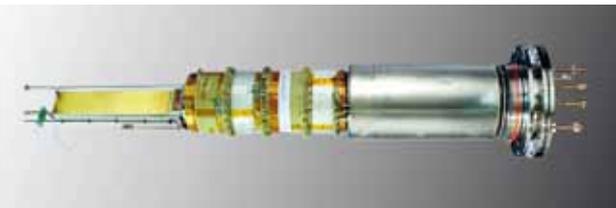


Abb. 6: 80 kA-HTS-Stromzuführungsdemonstrator für ITER.

TOSKA getestet. Mit einem Strom von 80 kA bei 4,5 K Helium-Kühlung und einem Strom von 77 kA bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff wurden zwei Weltrekorde aufgestellt.

2005 wurde die erste Anwendung des Supraleiters MgB₂ realisiert. Das ITEP fertigte einen feinen MgB₂/Fe/SS-Draht (Ø 310 µm) für eine Stromzuführung für das Röntgenspektrometer XRS-2, das von der NASA in den Weltraum transportiert wurde (Abbildung 7).



Abb. 7: Röntgenspektrometer XRS-2 (links), MgB₂-Draht (rechts oben) und Start der Rakete (rechts unten).

Im Juli 2006 erreichte die Experimentieranlage HOMER II (Abbildung 8) ihr Designfeld von 20 T in einer freien Bohrung von 185 mm. HOMER II stellt nach den Anlagen JUMBO und HOMER I die dritte Generation von rein supraleitenden Hochfeldexperimentieranlagen im ITEP/Hochfeldlabor dar. Die Anlage wurde so konzipiert, dass sie in der ersten Ausbaustufe ein Magnetfeld von 20 T in einem gegenüber HOMER I stark vergrößerten Volumen erzeugt. In einer zweiten Phase soll anhand von Hochfeldeinsatzspulen aus hochtemperatur-supraleitenden Materialien ein Zentralfeld von 25 T erreicht werden. Das supraleitende Magnetsystem der 20 T-Konfiguration der Anlage HOMER II besteht aus ineinandergeschachtelten NbTi- und (Nb_x)₃Sn-Solenoidspulen.

Das ITEP arbeitete auch äußerst aktiv an der Entwicklung großer Kryopumpen für die Fusion. Mit der neu aufgebauten



Abb. 8: Hochfeld-experimentier-anlage HOMER II.

ten Großanlage TIMO charakterisierten die Forscher eine Modellkryopumpe im Maßstab ca. 1:3 für ITER in allen Betriebszuständen. Zudem gewannen sie umfassende Datenreihen zur Validierung selbst entwickelter Designcodes (Thermohydraulik, Vakuumströmung). Damit schufen sie erfolgreich eine Wissensplattform für das Design zukünftiger Kryopumpen, sodass die Folgeaufträge für die ITER-Serienpumpen (Torus, Kryostat, NBI) gesichert waren. Abbildung 9 zeigt die daraus resultierende Modellkryopumpe, die 2006 im ITEP vollständig charakterisiert wurde.



Abb. 9: ITER-Modellkryopumpe.

An der 2004 ausgeschriebenen Entwicklung des Hauptspektrometertanks von KATRIN war das ITEP von Anfang an wesentlich beteiligt. Auch unterstützte das ITEP die industrielle Fertigung intensiv, besonders mit seinem Know-how in den Bereichen Qualitätssicherung und Lecksuche. Nach der Fertigung wurde der Spektrometertank aufgrund seiner enormen Größe von Deggendorf auf Umwegen über die Donau, das Schwarze Meer, das Mittelmeer, die Nordsee und den Rhein per Schiff nach Leopoldshafen transportiert. Der Transport des Großbehälters (1250 m³) am 25. Oktober 2006 vom Rhein zum damaligen Forschungszentrum Karlsruhe (Abbildung 10) traf international auf lebhaft Resonanz in Wissenschafts- und Publikumsmedien.



Abb. 10: Transport des KATRIN-Hauptspektrometertanks durch Leopoldshafen.

Highlights Dekade 2007–2017

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe

2009 lieferte unser Kooperationspartner Bruker BioSpin das weltweit erste **1000 MHz-NMR-Spektrometer** (Abbildung 11) an einen Kunden aus – ein weiterer wichtiger Meilenstein der NMR-Technologie in der bis dahin über 25-jährigen Kooperation. Für die folgende NMR-



Abb. 11: 1000 MHz-NMR-Spektrometer von Bruker BioSpin.

Generation über 1000 MHz begannen das ITEP und Bruker BioSpin 2010 gemeinsame Entwicklungen mit Hochtemperatur-Supraleitern, die deren grundsätzliche Tauglichkeit in Magnetfeldern größer als 25 T belegten.

Im Rahmen internationaler Vereinbarungen war das ITEP von 2007 bis 2017 verantwortlich für die Entwicklung von verlustarmen **Hochstromzuführungen für die Fusionsprojekte W7-X** in Greifswald und **JT60-SA** in Japan (Abbildung 12). Für das Projekt W7-X wurden bis 2013 insgesamt 16 Stromzuführungen mit einem Nennstrom von 18,2 kA ausgelegt, gefertigt und erfolgreich getestet.

Für JT60-SA wurden bis 2017 sechs Stromzuführungen mit 26 kA und 20 Stromzuführungen mit 20 kA ausgeliefert. Beide Arten von Stromzuführungen wurden mit einem verlustarmen Teil aus Hochtemperatur-Supraleitern und einem hocheffizienten Wärmetauscher aus Kupfer hergestellt. Bei beiden Projekten gelang es, den anspruchsvollen Kosten- und Zeitrahmen einzuhalten.

2008 begannen am ITEP erste allgemeine Untersuchungen zu **supraleitenden Kabeln**. 2010 führte das ITEP gemeinsam mit Nexans, RWE und der Leibniz



Abb. 12: Stromzuführungen für W7-X (oben) und JT60-SA (unten).

Universität Hannover eine Studie zur Anwendung eines supraleitenden Kabels in der Innenstadt von Essen durch. Im Rahmen eines anschließenden Verbundprojekts gelang es dem ITEP, Nexans und RWE bis 2014, das weltweit längste supraleitende Kabel mit einer Länge von 1 km und einer Leistung von 40 MVA bei einer Spannung von 10 kV zu entwickeln und erfolgreich in Betrieb zu nehmen. Das Kabel, das zusammen mit einem supraleitenden Strombegrenzer installiert wurde, erfüllt alle betrieblichen Anforderungen. 2015 erhielt das Projekt den Deutschen Innovationspreis für Klima und Umwelt in der Kategorie umweltfreundliche Technologien des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Abbildung 13).



Abb. 13: Verleihung des Deutschen Innovationspreises für Klima und Umwelt 2015.

Einige wichtige Meilensteine für **KATRIN** wurden mit der Entwicklung der **Laser-Raman-Spektroskopie** (Abbildung 14) erreicht. 2009 führte das ITEP erstmals eine Messung mit Tritium durch, 2011 folgten erste Kalibrierungsmessungen. Die Raman-Spektroskopie ist mittlerweile aus Forschung und Betrieb des TLK nicht mehr

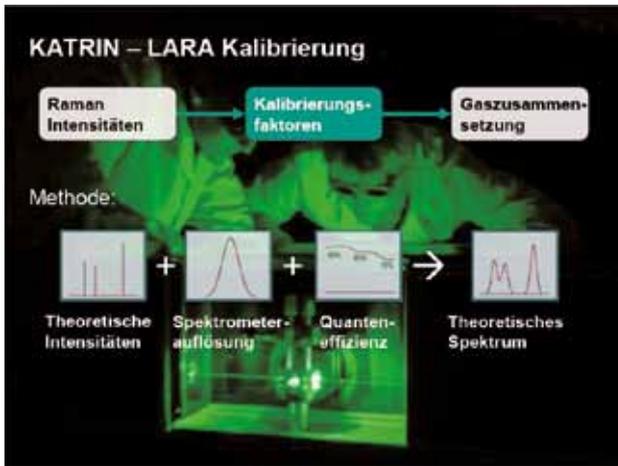


Abb. 14: Methode der Laser-Raman-Kalibrierung für KATRIN.

wegzudenken. Nach vielen Jahren Entwicklung geht das Verfahren mehr und mehr in den Routinebetrieb über. Zum einen dient es als Referenz bei der Kalibrierung anderer Methoden, wie der IR-Spektroskopie, zum anderen fungiert es als Messinstrument für den Betrieb. So lässt sich inzwischen bei jedem Tritiumtransfer mithilfe der Raman-Spektroskopie die Zusammensetzung genau bestimmen.

Ein weiterer wesentlicher Meilenstein für das KATRIN Experiment war 2011 der Nachweis der Temperaturstabilität der Tritiumquelle. Mit 3 mK war die Temperaturstabilität der Tritiumquelle um fast einen Faktor zehn besser als die Spezifikation. Dadurch lässt sich der systematische Fehler bei der Messung deutlich reduzieren. Weitere Highlights von KATRIN, bei denen viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP mitwirkten, waren 2016 das First Light und 2017 die erste Kryptonmessung. 2018 soll die Messphase starten.

Eine weitere wichtige Aufgabe des ITEP ist die Entwicklung des Brennstoffkreislaufs für zukünftige Fusionskraftwerke. Da die bestehenden Konzepte für ITER sich nicht auf ein Fusionskraftwerk anwenden lassen, wurde ein neues Verfahren des Direct Internal Recyclings entwickelt, das bereits heute als Referenz dient. Die Erfinder Dr. Christian Day und Dr. Thomas Giegerich erhielten dafür 2014 den European Prize for Innovation in Fusion Research.

Die Entwicklung von verlustarmen und hochstromtauglichen Multileiterkonzepten mit Hochtemperatur-Supraleitern startete am ITEP 2006 mit der Entwicklung eines ersten hochtemperatur-supraleiter-basierten Roebel-Leiters. In den folgenden Jahren führte das ITEP zahlreiche Arbeiten zur Charakterisierung und Herstellung der Roebel-Leiter durch. 2015 bekam Dr. Wilfried Goldacker für seine Verdienste auf diesem Gebiet den Excellence Award der Europäischen Gesellschaft für Angewandte Supraleitung (ESAS) verliehen. 2016 wurde ein vom ITEP gefertigter Roebel-Leiter erstmals in einem Demonstratormagneten am CERN erfolgreich getestet.

Ein weiteres Hochstromleiterkonzept basiert auf dem Stapeln von Hochtemperatur-Supraleiter-Bandleitern mit unterschiedlicher Leiterbreite. Die dadurch entstehende Struktur eines Kreuzleiters (CrossConductor – CroCo) ermöglicht äußerst kompakte Leiter und hohe

Stromdichten bei hohen Magnetfeldern. So wurden Rekordstromdichten von mehr als 500 A/mm² und Ströme von 10 kA bei 12 T und 4,2 K erzielt. Die Miterfinder Dr. Walter Fietz und Dr. Michael Wolf erhielten 2016 für diese Entwicklung den European Prize for Innovation in Fusion Research.

Die Ausbildungsaktivitäten am ITEP entwickelten sich ebenfalls höchst erfreulich. So nahmen die Vorlesungen von vier Semesterwochenstunden 2007 auf mehr als 20 Semesterwochenstunden 2016 zu. Die Zahl der Doktoranden stieg von elf im Jahr 2007 auf 35 im Jahr 2017.

Bereits 2005 führte das ITEP ein zertifiziertes Arbeitsschutzmanagement-System ein und gehörte damit zu den Vorreitern in Europa. In den Jahren 2009, 2013 und 2016 bestätigten erfolgreiche Rezertifizierungen den ausgesprochen hohen Standard des Arbeitsschutzes am ITEP.

2007 begann die Sanierung einiger wesentlicher Büro- und Laborgebäude des ITEP. Die kombinierten Büro- und Laborgebäude 410 und 416 (Abbildung 15) wurden 2012 bzw. 2016 neu in Betrieb genommen. Die Laborthalle 411 wurde einer kompletten Sanierung unterzogen. Noch sind nicht alle Arbeiten abgeschlossen, aber die Arbeitsbedingungen haben sich bereits entscheidend verbessert.



Abb. 15: Gebäude 416 im Sommer 2016.

Seit 2007 wurden einige wichtige Leitungspositionen im Institut neu geschaffen bzw. neu besetzt. 2008 übernahm Kai Bauer die technisch-administrative Geschäftsführung des Instituts. Seit 2009 leitet Dr. Beate Bornschein als Nachfolgerin von Dr. Lothar Dörr das Tritiumlabor Karlsruhe. Mit der Leitung einer 2010 gebildeten Helmholtz-Nachwuchsgruppe zu Wechselstromverlusten in Hochtemperatur-Supraleitern durch Dr. Francesco Grilli wurde das Thema der Simulation und Modellierung von Supraleitern am ITEP nachhaltig gestärkt und neu aufgestellt. 2011 wurde Professor Dr. Steffen Grohmann auf eine Professur für Kryo- und Kältetechnik am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Fakultät Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik des KIT berufen, verbunden mit einer Gruppenleitung der Kryo F&E am ITEP. Als weiterer Direktor des ITEP wurde 2013 Professor Dr. Bernhard Holzapfel berufen; seine Position ist mit einer Professur für Supraleitende Materialien an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des KIT verbunden.

Lehre und Bildung

Vorlesungen, Seminare, Workshops und Sommerschulen

Vorlesungen

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Supraleitende Systeme der Energietechnik (Holzapfel) WS 16/17, WS 17/18
Supraleitende Materialien (Holzapfel) WS 16/17, WS 17/18
Energy Storage and Network Integration (Noe) WS 16/17, WS 17/18
Übungen zu Energy Storage and Network Integration (Noe, Kottonau) WS 16/17, WS 17/18
Project Management for Engineers (Noe, Grohmann, Day) SS 17
Grundlagen und Technologie supraleitender Magnete (Holzapfel) SS 17
Superconducting Materials for Energy Applications (Grilli) SS 17

KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik
Vakuumtechnik (Day) WS 16/16, WS 17/18
Übung zu Vakuumtechnik (Day, Varoutis) WS 16/17, WS 17/18
Kältetechnik A (Grohmann) WS 16/17, WS 17/18
Übungen zu Kältetechnik A (Grohmann, Mitarbeiter) WS 16/17, WS 17/18
Kryotechnik B (Grohmann) WS 16/17, WS 17/18
Übungen zu Kryotechnik B (Grohmann, Mitarbeiter) WS 16/17; WS 17/18
Kryotechnik A (Grohmann) SS 17
Übungen zu Kryotechnik A (Grohmann) SS 17
Kältetechnik B (Grohmann) SS 17
Übungen zu Kältetechnik B (Grohmann, Mitarbeiter) SS 17

KIT-Fakultät Maschinenbau
Fusionstechnologie A (Bornschein, Day, Demange, Fietz, Frances, Weiss) WS 16/17, WS 18/18
Fusionstechnologiekolloquium* (Noe) SS 17
Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren (Fietz, Weiss) SS 17
Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf (Bornschein, Day, Demange) SS 17

KIT-Fakultät Physik
Hauptseminar Astroteilchenphysik: Neutrinos und dunkle Materie (Größle) WS 16/17, SS 17, WS 17/18
Messmethoden und Techniken in der Experimentalphysik (Bornschein, Priester) SS 17

House of Competence
„Wissenschaftliches Schreiben und Präsentieren ...“ mit inhaltlich-konzeptioneller WS; Beteiligung von Dr. B. Bornschein WS 16/17, SS 17, WS 17/18

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau
Konstruktionslehre (Bauer) WS 16/17, WS 17/18
Arbeitssicherheit und Umweltschutz (Bauer) SS 17
Thermodynamik 1 für Maschinenbauer (Neumann) WS 16/17, WS 17/18
Thermodynamik 2 für Maschinenbauer (Neumann) SS 17

* Organisation mit ITEP Beteiligung

Lehre und Bildung

Doktorarbeiten – Master- und Diplomarbeiten – Bachelor-, Studien- und Praxisarbeiten

Betreute Doktorarbeiten 2017

(* 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)*

Roman Bause (SUPRA)

Design und Konstruktion einer elektrischen Maschine basierend auf Hochtemperatur Supraleitenden Bulk Magneten
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Doppelbauer (KIT-ETIT), Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Matthias Corduan (SUPRA)

Design, Konstruktion und Test einer rotierenden elektrischen Maschine basierend auf supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid (MgB₂)
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 REBa₂Cu₃O_{7-x}-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)*

Aurélien Godfrin (SUPRA)

AC loss characterization of superconducting devices for power applications
Betreuer: Dr. F. Grilli, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

David Gomse (KRYO)

Entwicklung eines Wärmeübertragers für MRC-Cryocooler
Betreuer: Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

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)*

Moritz Hackenjos (TLK)

Aufbau und Inbetriebnahme des äußeren und inneren Tritium-Kreislaufs der WGTS und DPS des KATRIN-Experiments
Betreuer: Dr. M. Sturm, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Sebastian Hellmann (SUPRA)

Technologieentwicklung für supraleitende strombegrenzende Transformatoren
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

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. Größle, 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)*

Yinzhen Liu (SUPRA)

Design and test of a superconducting DC wind generator demonstrator
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Doppelbauer (ETIT), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Sven Meyer (SUPRA)

Elektrische Transporteigenschaften epitaktischer Fe-basierter Supraleiterschichten

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

Sebastian Mirz (TLK)

Untersuchung der Molekularen Effekte in allen sechs flüssigen Wasserstoffisotopologon mithilfe Infrarot- und Ramanspektroskopischer 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)*

Fabian Schreiner (SUPRA)

Aufbau eines supraleitenden DC Windkraftgenerators und Untersuchung der Netzanbindung

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

Oleksiy Troshyn (SUPRA)

Ex-situ ReBCO Schichten auf ISD-biaxial texturierten Substraten für supraleitende Bandleiter der 2. Generation

Betreuer: Dr. V. Große (Theva GmbH, Ismaning), Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)*

Christina Weber (KRYO)

Experimentelle Untersuchung und Modellentwicklung zum Einfluss der Zweiphasenströmung auf die Funktionsweise von Sicherheitseinrichtungen von Flüssig-helium-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)*

Shengnan Zou (SUPRA) ** 19.07.2017

Magnetization of High Temperature Superconducting Trapped Field Magnets

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

Betreute Masterarbeiten 2017

(* akademischer Betreuer; ** abgeschlossen)

Max Aker

Materialstudien zur Unterdrückung des Tritiummemoryeffekts in BIXS Analytiksystemen

Betreuer: Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik), Prof. Dr. B. Holzapfel*

Victor Maximo Arredondo Solis

Commissioning of a gas separation facility for tritium extraction from helium with inorganic zeolite membranes

Betreuer: Dr. L. Frances, Prof. Dr. habil. G. Tovar (IGVP, Uni Stuttgart)*

Paul Blanchier

Thermal-hydraulic Analysis of an HTS conductor made of HTS Crocos for the European Demonstration Reactor (DEMO)

Betreuer: Dr.-Ing. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)*

Carl Bühler 28.02.2017**

Impact of 2,4-Penanedione on the Performance of Y0.5Gd0.5Ba2Cu3O7-δ Superconductors Prepared by the Chemical Solution Deposition

Betreuer: Dr. M. Erbe, Prof. Dr. B. Holzapfel*

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)*

Christof Ebner

Mechanische und elektromechanische Untersuchungen an HTS CroCo-Supraleiterkabeln

Betreuer: Dr.-Ing. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)*

Grzegorz Jakubiec

Investigation of delamination strength and its microstructure in REBCO coated conductors

Betreuer: Dr. F. Grilli, Dr. M. Stepien (Silesian University of Technology)*

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*

Sebastian Knott 15.05.2017**

Optimierung einer Helium-Kälteanlage zur Kühlung hochtemperatursupraleitender Stromschienen

Betreuer: Dr.-Ing. A. Alekseev (Linde AG, München), 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)*

Alexander Kraus 15.05.2017**

Entwicklung, Implementierung und Verifizierung einer Ab-Initio-Methode zur Vorhersage von Infrarotspektren flüssiger Wasserstoffisotopologe
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Krzysztof Kubiczek

Uniformity of the J_c angular dependence of REBCO tapes on magnetic field along the conductor's length
Betreuer: Dr. F. Grilli, Dr. M. Stepien (Silesian University of Technology)*

Keerthi Raj. Kunniyoor

Design and analysis of MgB₂ sc wire for hydrogen level measurement at various operating conditions
Betreuer: T. Richter, Prof. Dr. P. Ghosch (IIT Kharagpur)*

Alexander Marsteller ** 14.04.2017

Measurement of Temperature Stability and Homogeneity of the KATRIN WGTS Cryostat
Betreuer: M. Hackenjos, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Johannes Müller

Hochauflösende Spektroskopie von tritiiertem Wasser
Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. J. Orphal (KIT, IMK-ASF)*

Maximilian Schlereth 06.07.2017**

Hydrogen Permeation Experiments on Non-porous Metal Foils in the HERMES Setup
Betreuer: B. Peters, Prof. Dr.-Ing. W. Schabel (KIT, CIW)*

Eugen Shabagin 31.03.2017**

Modeling of Transient Heat and Mass Transfer of a Solid Deuterium Neutron Moderator for the Generation of Ultra-Cold Neutrons
Betreuer: D. Gomse, Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

Arne Smolinski

Experimentelle Charakterisierung des Katalysevorganges von ortho/para-Katalysatoren für Wasserstoff und Deuterium
Betreuer: B. Krasch, Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

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)*

Jens Tamson 26.09.2017**

Verfahrens-, mess- und sicherheitstechnische Auslegung eines Tieftemperatur-Phasengleichgewichtsprüfstands
Betreuer: T. Kochenburger (ITTK), Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

Kimo Toema 11.04.2017**

Modellierung einer dreistufigen Wärmeübertrager-Kaskade zur Verflüssigung von Wasserstoff
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. T. Wetzel (TVT), Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

Matthias Wecker 10.05.2017**

Entwicklung und Aufbau eines Experiments zur Oberflächencharakterisierung von KATRIN Rear-wall-Kandidaten mittels UV-Licht
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Dr. M. Sturm, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Genrich Zeller

Berechnung des Fehlerbudgets und Erstellen einer Kalibrierungsvorschrift für das KATRIN Laser Raman Systems
Betreuer: Prof. Dr. U. Husemann (IEKP), Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Xiaodong Zhao 15.08.2017**

High-resolution Coherent-Antistokes Raman Spectroscopy of Tritium
Betreuer: Dr. M. Schlösser, PD Dr. A.-N. Unterreiner (KIT, IPC)*

Betreute Diplomarbeiten 2017

(* akademischer Betreuer)

Florian Altenbrand 30.09.2017**

Messung und Modellierung der Effizienz von ortho/para-Katalysatoren für Wasserstoff und Deuterium
Betreuer: Prof. Dr. B. Kraushaar-Czarnetzki (KIT, CVT), Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

Betreute Bachelorarbeiten 2017

(* akademischer Betreuer; ** abgeschlossen)

Kai Baumgarten 05.10.2017**

Grundlegende Untersuchungen zur supraleitenden Levitation mittels Hochtemperatur-Supraleitenden (HTS) Bandleitern
Betreuer: Dr.-Ing. M. Wolf, Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Daniel Bitter 08.08.2017**

Literature Study and Analysis of Metal-Hydrogen Properties for Separation and Storage
Betreuer: B. Peters, Prof. Dr. A. Möslang (IAM-AWP Fak. Maschinenbau)*

Julian Blaschtschak

Untersuchung zur Beladung von metallischen Magnetkalorimetern mit Tritium
Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Leonhard Hasselmann

Beladungstest von Metalloberflächen mit Tritium
Betreuer: Dr. M. Schlösser, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)*

Jonas Heimpel 08.05.2017**

Thermal desorption study for further development of a metal foil pump
Betreuer: B. Peters, Prof. Dr. S. Grohmann (KIT, CIW/VT)*

Rica Jansen 04.09.2017**

Konzepterstellung für ein Prozessmanagement in der

Wissenschaftsadministration

Betreuer: Dipl.-Ing.(FH) K. Bauer; Dipl.-Ing.(FH) D. Kohl (DH)*

Johannes Kern

Elektromechanische Untersuchungen an HTS CroCo-Triplet-Leiterverbänden (TBD)

Betreuer: Dr.-Ing. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)*

Matthias Kluge 08.09.2017**

Auslegung und Konstruktion eines Helium-Wasserbadanwärmers für kryogene Experimente

Betreuer: Dr. R. Lietzow, Prof. Dr. T. Haalboom (DH)*

Daniel Kuntz

Modifizierung des Boilers einer Diffusionsvakuum-pumpe für den Betrieb mit Quecksilber und Tritium

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

Quoc Hung Pham 09.11.2017**

Elektromechanische Untersuchungen an REBCO Hochtemperatursupraleitern

Betreuer: Dr.-Ing. M. Wolf, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Julian Sandrock 21.08.2017**

Entwicklung einer analogen Datenerfassungselektronik einschließlich Softwareerstellung auf Grundlage eines Raspberry Pi

Betreuer: C. Melzer, M. Sauerteig (DH)

Lehre und Bildung

Kolloquien

- 24.01.2017 Search for the Neutron Electric Dipole Moment Using Ultracold Neutrons at PSI
Schmidt-Wellenburg, PSI
Dr. Bornschein
- 09.05.2017 Charge Order in the Cuprates: Crystals, Films and Hetero-structures – a Review
Prof. Matthieu Le Tacon
Karlsruher Institut für Technologie (D), IFP
Prof. Holzapfel
- 23.05.2017 Laser Spectroscopy for Nuclear Physics: Radii of the Lightest Nuclei
Prof. Randolph Pohl
Johannes Gutenberg-Universität Mainz;
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Dr. Bornschein
- 14.11.2017 First results from divertor operation in the Wendelstein 7-X stellarator
Thomas Sunn-Pedersen
Prof. Dr.-Ing. Noe
- 21.11.2017 Overview of LHC magnets conceptual designs and development
Glyn Kirby
Dr. Goldacker
- 28.11.2017 Superconducting magnets for MRI
Gert Mulder
Dr. Goldacker

Lehre und Bildung

Fach- und Gastvorträge

17.01.2017	ITER Conductor Performance Analysis: Experimental Results and Interpretation Codes Prof. Marco Braschi from the University of Bologna, Gastvortrag	13.06.2017	Optimierung einer Helium-Kälteanlage zur Kühlung hoch-temperatursupraleitender Stromschienen Sebastian Knott Fachvortrag, Masterarbeit Bereich Kryo
20.02.2017	SuperOx Perspective for 2G HTS Wires and their Practical Applications Dr. Sergey Samoilenkov SuperOx, Russia Gastvortrag, IB SUPRA / Prof. Noe	06.07.2017	Hydrogen Permeation Experiments on Non-Porous Metal Foils in the HERMES Setup Maximilian Schlereth Fachvortrag, Masterarbeit Bereich VAKUUM
21.02.2017	Origins of in-field Ic tape to tape distribution for ReBCO tapes purchased for 32T project and Beyond 20T: ReBCO tape characterization Dmytro Abraimov Florida State University, Tallahassee Gastvortrag, IB SUPRA/Dr. Goldacker	01.08.2017	Messung und Modellierung der Effizienz von ortho/para-Katalysatoren für Wasserstoff und Deuterium Florian Altenbrand Fachvortrag, Diplomarbeit, TLK
03.03.2017	Impact of 2,4-Pentanedione on the Performance of Y0.5Gd0.5Ba2Cu3O7-d Superconductors Prepared by the Chemical Solution Deposition Carl Bühler Fachvortrag Masterarbeit, IB SUPRA	08.08.2017	Literaturstudie und Analyse über Materialdaten von Me-tallen zur Trennung und Lagerung von Wasserstoff Daniel Bitter Fachvortrag, Bachelorarbeit
28.03.2017	Modellierung des instationären Wärme- und Stofftransports eines Neutronenmoderators aus festem Deuterium zur Erzeugung ultrakalter Neutronen Eugen Shabagin Fachvortrag Masterarbeit, IB KRYO	15.08.2017	High-resolution Coherent-Antistokes Raman Spectroscopy of tritium Xiaodong Zhao Fachvortrag, Masterarbeit Institutsbereich Tritiumlabor
11.04.2017	Modellierung einer dreistufigen Wärmeübertrager-Kaskade zur Verflüssigung von Wasserstoff Kimo Toema Fachvortrag Masterarbeit, IB KRYO	26.09.2017	Verfahrens-, mess- und sicherheitstechnische Auslegung eines Tieftemperatur-Phasengleichgewichtprüfstands Jens Tamson Fachvortrag, Masterarbeit Institutsbereich KRYO
11.04.2017	Power Hardware in-the-Loop: Simulator-Hardware Interface Algorithms Lukas Dritschler Fachvortrag (externe) Masterarbeit IB SUPRA	05.10.2017	Grundlegende Untersuchungen zur supra-leitenden Levitation mittels hochtemperatur-supraleitenden (HTS) Bandleitern Kai Baumgarten Fachvortrag, Bachelorarbeit Institutsbereich FUSION
18.04.2017	Thermal Desorption Study for further Development of a Metal Foil Pump Jonas Heimpel Fachvortrag Bachelorarbeit IB VAKUUM	09.11.2017	Elektromechanische Untersuchungen an Rebco Hochtemperatursupraleitern Quoc H. Pham Fachvortrag, Bachelorarbeit Institutsbereich FUSION
		30.11.2017	Power-to-X – Background, experiences, and future work Prof. Dr. Antti Kosonen Gastvortrag, Lappeenranta University of Technology, Finland

Zahlen und Daten

Organigramm

Supraleiter- und Kryo-Materialien (Holzapfel)	Energietechnische Anwendungen (Noe)	Supraleitende Magnettechnologie (Fietz)	Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs (Day)	Physik und Technologie von Wasserstoffisotopologen (Bornschein)
Supraleitende Materialien Hänisch (FT1-1)	Supraleitende Netzkomponenten Noe (FT2-1)	Spulentechnologie Schneider (FT3-1)	Vakuumtechnologie und Prozessintegration Day (FT4-1)	Tritiumanlagen und -prozessierung Welte (FT5-1)
Kryo-Strukturmaterialien Weiss (FT1-2)	Neue Anwendungen der Supraleitung Schlachter (FT2-2)	HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen Fietz (FT3-2)	Tritiumextraktion und -rückgewinnung Frances (FT4-2)	Tritium- und Wasserstoffanalytik Röllig (FT5-2)
Kryogene Stoffeigenschaften Grohmann (FT1-3)	Modellierung von Supraleitern und Komponenten Grilli (FT2-3)	Rotierende Maschinen Neumann (FT3-3)	Strömung verdünnter Gase Varoutis. (FT4-3)	Physik der Wasserstoffisotopologen Größe (FT5-3)
Leitertechnologien Wolff (FT1-4)	Tiefemperatur-Systeme, -Verfahren und -Prozesse Lietzow (FT2-4)	Industrieanwendungen Kläser (FT3-4)	Vakuumhydraulik Giegerich (FT4-4)	Suche nach neuer Physik Schlösser (FT5-4)
	Echtzeit Systemintegration Geisbüsch (FT2-5)			

Personalstand (30.11.2017)

Gesamt	239	zusätzlich, während 2017:	
Akademiker	67	Gäste	8
Ingenieure und Techniker	63	Praktikanten	9
Sonstige	29	Studentische Hilfskräfte	36
Doktoranden	32	Studien-, Bachelorarbeiten	13
Master/Diplom	25		
DH-Studenten	12		
Auszubildende	9		
Trainees	2		

Zahlen und Daten

Personalveränderungen

Neu eingestellt
(ohne Praktikanten, Gäste und
studentische Hilfskräfte)

Patrice Allgeier

Karoline Altmann

Nico Baumgärtner

Roman Bause

Thomas Beigl

Anton Booz

Pascal Coenen

Matthias Corduan

Tim Dammert

Wolfram Freitag

Armin Gruber

Sebastian Hepp

Tobias Hofmann

Rica Jansen

Maximilian Jüngert

Matthias Kluge

Mayraluna Lao

Marc Lautenschläger

Alexander Marsteller

Uwe Mirasch

Cyra Neugebauer

Julian Sandrock

Saskia Schäfer

Magnus Schlösser

Fabian Schreiner

Eugen Shabagin

Stefan Weber

Romy Wüst

Julian Weinbrecht

Ausgeschieden
(ohne Praktikanten, Gäste und
studentische Hilfskräfte)

Patrice Allgeier

Melanie Bacher

David-Paul Demange

Jonas Faul

Sebastian Fischer

Marion Gilliar

Cristian Gleason-González

Aurélien Godfrin

Sarah Götz

Veronika Gretz

Sebastian Hellmann

Wu Hong

Nadja Kästle

Beate Kloppe

Michael Korevaar

Manuel Pitz

Thomas Richter

Victor Rodriguez-Zermeno

Rosa Rotondo

Uwe Saller

Yannick Stalf

Irina Völker

Anne-Kathrin Weber

Stefan Weber

Zou Shengnan

Zahlen und Daten

Studentische Hilfskräfte

Florian Altenbrand

Dominic Barthlott

Evelyn Bens

Johanna Bobien

Alexander Böhmländer

Carl Bühler

Martin Chetan

Felix Diel

Lukas Dritschler

Tobias Feifel

Marius Frank

Michael Groß

Felix Hahl

Till Holzhäuser

Florian Hörmann

Fabian Immel

Thomas Karcher

Johannes Kern

Rafael Klenk

Linda Korrman

Alexander Kraus

Paul Masuch

Martin Meinzer

Judith Miller

Felicitas Müller

Marc Neu

Daniel Rau

Daniel Saad

Max Reimer

Alexander Schlenga

Pia Schulz

Maren Stöckl

Mark Weyrauch

Genrich Zeller

Xiaodong Zhao

Nicolas Ziegler

Zahlen und Daten

Gastwissenschaftler

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
Prof. Dr. H. Telle 06.03.17–31.12.17	Instituto pluridisciplinar, Universidad Complutense de Madrid, Spanien	Dr. A. Kosonen 01.09.17–01.12.17	Lappeenranta University of Technology, Finland
Dipl.-Ing. Uwe Naumann 01.08.16–30.06.18	Bergische Universität, Wuppertal, Deutschland	S. Schubotz 03.07.17–31.08.18	Bergische Universität Wuppertal, BRD
Dipl.-Physiker Norman Haußmann 01.08.16–30.06.18	Bergische Universität, Wuppertal, Deutschland	Dr. P. O'Brien 25.09.17–31.01.18	Queensland University of Technology, Brisbane, Australien
Prof. Dr. Klaus Helbing 01.08.16–30.06.18	Bergische Universität, Wuppertal, Deutschland	M. Li 10.10.17–30.09.18	Shanghai University, China
Dr. Phil. Stephanie V. Hickford 01.08.16–30.06.18	Bergische Universität, Wuppertal, Deutschland	Dr. Philipp Chung-On Ranitzsch 24.10.16–31.12.19	Westfälische Wilhelms Universität, Münster, Deutschland
Dipl.-Physiker Enrico Ellinger 01.08.16–31.08.18	Bergische Universität, Wuppertal, Deutschland		

Veröffentlichungen

Fusion

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenbeiträge

* Meyer, H.; et.al.

Overview of progress in European medium sized tokamaks towards an integrated plasma-edge/wall solution
Band 57, Heft 10, Nuclear fusion, 0029-5515, 1741-4326

* Bonelli, F.; Varoutis, Stylianos; Coster, David P.; Day, Christian; Zanino, Roberto;
Self-consistent coupling of DSMC method and SOLPS code for modeling tokamak particle exhaust
Band 57, Heft 6, Nuclear fusion, 0029-5515, 1741-4326

* Buekki-Deme, Andras; Calderoni, Patrick; Demange, David; Fanghaenel, E.; Le, T.-L.; Sirch, M.; Ricapito, Italo
Experimental Investigation of ZrCo Getter Beds as Candidate Process for the Tritium Extraction Systems of the European Test Blanket Modules
Band 71, Heft 4, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Carella, E.; Moreno, C.; Urgorri, F.R.; Demange, D.; Castellanos, J.; Rapisarda, D.
Tritium Behavior in HCPB Breeder Blanket Unit: Modeling and Experiments
Band 71; Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Cismondj, F.; Agostinetti, P.; Aiello, G.; Aubert, J.; Bachmann, C.; Biel, W.; Boccaccini, L.V.; Bruschi, A.; Day, Chr.; Del Nevo, A.; Di Gironimo, G.; Fernandez, I.; Franke, T.; Grossetti, G.; Hernandez, F.; Iglesias, D.; Keep, J.; Lang, P.; Loving, A.; Norajitra, P.; Mazzone, G.; Marzullo, D.; Ploekl, B.; Mozzillo, R.; Rapisarda, D.; Sonato, P.; Tran, M.Q.; Vaccaro, A.; Villari, R.; You, J.H.; Zeile, C.
Progress in EU-DEMO in-vessel components integration
Band 124, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196

* Cristescu, Ion; Bukki-Deme, A.; Carr, R.; Gramlich, N.; Groessle, R.; Melzer, C.; Schaefer, P.; Welte, Stefan
Review of the TLK Activities Related to Water Detritiation, Isotope Separation Based on Cryogenic Distillation and Development of Barriers Against Tritium Permeation
Band 17, Heft 3, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Frattolillo, A.; Bombarda, F.; Day, Christian; Lang, P.T.; Migliori, S.; Pégourié, B.
An innovative approach for DEMO core fuelling by inboard injection of high-speed pellets
Band 124, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196

* Giegerich, T.; Day, C.; Jäger, M.

Mercury ring pump proof-of-principle testing in the THESEUS facility
Band 124, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196

* Giruzzi, G.; et.al.

Physics and operation oriented activities in preparation of the JT-60SA tokamak exploitation
Band 57, Heft 8, Nuclear fusion, 0029-5515, 1741-4326

* Groessle, Robin; Kraus, Alexander; Mirz, Sebastian; Wozniowski, Sebastian

First Calibration of an IR Absorption Spectroscopy System for the Measurement of H-2, D-2, and HD Concentration in the Liquid Phase
Band 17, Heft 3, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Hanke, Stefan; Hauer, Volker; Day, Christian; Dalla Palma, Mauro; Sartori, Emanuele; Dal Bello, Samuele; Zaccaria, Pierluigi; Zhang, Mingxing

Experimental characterization of the gas injection nozzle for the ITER Neutral Beam Test Facility neutralizer
Band 123, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196

* Mirz, Sebastian; Besserer, Uwe; Bornschein, Beate; Groessle, Robin; Krasch, Bennet; Welte, Stefan

Design of a Spectroscopy Experiment for All Hydrogen Isotopologues in the Gaseous, Liquid, and Solid Phase
Band 17, Heft 3, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Okino, F.; Frances, L.; Demange, D.; Kasada, R.; Konishi, S.

Tritium recovery efficiency from an array of PbLi droplets in vacuum
Band 71, Heft 4, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Peters, Benedikt Josef; Day, Christian

Analysis of low pressure hydrogen separation from fusion exhaust gases by the means of superpermeability
Band 124, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196

* Ploekl, B.; Day, C.; Frattolillo, A.; Igitkhanov, Y.; Lang, P. T.; Pégourié, B.; Zohm, H.

Matter injection technology for DEMO, state of the art
Band 123, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196

- * Priester, Florian
A New Device for Activity Measurement of Tritiated Water
Band 71, Heft 4, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641
- * Scannapiego, Matthieu; Day, Christian
Experimental investigation on charcoal adsorption for cryogenic pump application
Band 278, IOP conference series / Materials science and engineering, 1757-8981, 1757-899X
- * Toigo, V.; et.al.
A substantial step forward in the realization of the ITER HNB system: The ITER NBI Test Facility
Band 123, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196
- * Varoutis, S.; Bonelli, F.; Day, C.; Igitkhanov, Y.
Optimization of pumping efficiency and divertor operation in DEMO
Band 12, Nuclear materials and energy, 2352-1791
- * Varoutis, S.; Gleason-González, C.; Moulton, D.; Kruezi, U.; Groth, M.; Day, C.; Wiesen, S.; Harting, D.
Simulation of neutral gas flow in the JET sub-divertor
Band 121, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196
- * Yu. Igitkhanov; Day, Ch; Lang, P.; Plöckl, B.
Assessment of Pumping Requirements in DEMO Reactor
Band 72, Heft 4, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641
- * Zhang, Mingxing; Day, Christian; Varoutis, Stylianos; Cai, Guobiao
Rarefied gas flow into vacuum through short tubes at variable wall temperatures
Band 35, Heft 2, Journal of vacuum science & technology / A, 0734-2101, 1520-8559
- * Draghia, M. M.; Cristescu, I.; Trantea, N.; Pasca, G.; Fuciu, A.
Tritium accountancy and relevant instrumentation for the WDF from Cernavoda NPP
Band 71, Heft 4, Fusion science and technology, 0748-1896, 1536-1055, 1943-7641
- * Fietz, Walter H.; Heller, R.; Wolf, Michael J.; Gade, P. V.
High temperature superconductor cables for EU-DEMO TF-magnets
Band 125, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196
- * Heller, R.; Fietz, W.H.; Kienzler, A.
High power high temperature superconductor current leads at KIT
Band 125, Fusion engineering and design, 0920-3796, 1873-7196
- * Shirai, H.; Barabaschi, P.; Kamada, Y.; JT-60SA Team
Recent progress of the JT-60SA project
Band 57, Heft 10, Nuclear fusion, 0029-5515, 1741-4326
- * Wolf, Michael J.; Fietz, Walter H.; Preuss, Alan
Investigation of HTS CrossConductor Joints, Connectors, and Terminations
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Zappatore, A.; Heller, R.; Savoldi, L.; Zanino, R.
Modelling of the test of the JT-60SA HTS current leads
Band 85, Cryogenics, 0011-2275, 1879-2235
- * Neuberger, Heiko; Rey, Joerg; Hees, Manuel; Materna-Morris, Edeltraud; Bolich, Daniel; Aktaa, Jarir; Meier, Andreas; Fischer, Stephen; Schorle, Cornelia; Fuhrmann, Uwe; Heger, Rainer; Dlouhý, Ivo; Stratil, Ludek; Kloetzer, Bernhard
Selective Laser Sintering as Manufacturing Process for the Realization of Complex Nuclear Fusion and High Heat Flux Components
Band 72, Heft 4, Fusion science and technology, 1536-1055, 1943-7641, 0748-1896
- * Litaudon, X.; et.al.
Overview of the JET results in support to ITER
Band 57, Heft 10, Nuclear fusion, 0029-5515, 1741-4326

Eingeladene Vorträge

Dahlke, Christian; Giegerich, Thomas
Hermetische Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen für Tritium in Fusionsreaktoren
20. Praktikerkonferenz 'Pumpen in der Verfahrens- und Kraftwerkstechnik', Graz, A, April 24–26, 2017

Day, Christian
Vakuumtechnologie - Einmal zum Enddruck und zurück
OPTMAS Schule, Universität Kaiserslautern, 21. Februar 2017

Buchbeiträge

Day, Christian
Kenngrößen und Anwendungen von Kryopumpen
Seite 1–20, Handbuch Vakuumtechnik. Ed.: K. Jousten, Springer Reference Technik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 978-3-658-13403-7

Day, Christian
Kryotechnik und Kryopumpen
Seite 1–41, Handbuch Vakuumtechnik. Ed.: K. Jousten, Springer Reference Technik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 978-3-658-13403-7

Veröffentlichungen

Speicher und vernetzte Infrastrukturen (SCI)

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenbeiträge

* Bruzek, C. E.; Ballarino, A.; Escamez, G.; Giannelli, S.; Grilli, Francesco; Lesur, F.; Marian, A.; Tropeano, M.
Cable Conductor Design for the High-Power MgB₂ DC Superconducting Cable Project of BEST PATHS
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

* Bryja, Hagen; Hühne, Ruben; Iida, Kazumasa; Molatta, Sebastian; Sala, Alberto; Putti, Marina; Schultz, Ludwig; Nielsch, Kornelius; Hänisch, Jens
Deposition and properties of Fe(Se,Te) thin films on vicinal CaF₂ substrates
Band 30, Heft 11, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

* Cayado, Pablo; Erbe, Manuela; Kauffmann-Weiss, Sandra; Bühler, Carl; Jung, Alexandra; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard
Large critical current densities and pinning forces in CSD-grown superconducting GdBa₂Cu₃O_{7-x}-BaHfO₃ nanocomposite films
Band 30, Heft 9, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

* Godfrin, Aurelien; Kario, Anna; Gyuraki, Roland; Demencik, Eduard; Nast, Rainer; Scheiter, Juliane; Mankevich, Alexey; Molodyk, Alexander; Goldacker, Wilfried; Grilli, Francesco
Influence of the Striation Process and the Thickness of the Cu-Stabilization on the AC Magnetization Loss of Striated REBCO Tape
Band 27, Heft 6, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

* Gomse, D; Reiner, A; Rabsch, G; Gietzelt, T; Brandner, J J; Grohmann, S
Micro-structured heat exchanger for cryogenic mixed refrigerant cycles
Band 278, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

* Grilli, Francesco; Rodriguez Zermeno, Victor Manuel
Effect of Tape's Ic Inhomogeneity and Strand Misalignment on the Transport Capacity of Roebel Cables
Band 27, Heft 5, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

* Grinenko, V.; Iida, K.; Kurth, F.; Efremov, D. V.; Drechsler, S.-L.; Cherniavskii, I.; Morozov, I.; Hänisch, J.; Förster, T.; Tarantini, C.; Jaroszynski, J.; Maierov, B.; Jaime, M.; Yamamoto, A.; Nakamura, I.; Fujimoto, R.; Hatano, T.; Ikuta, H.; Hühne, R.
Selective mass enhancement close to the quantum critical point in BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂
Band 7, Heft 1, Scientific reports, 2045-2322

* Hauf, Ulla; Kauffmann, Alexander; Kauffmann-Weiss, Sandra; Feilbach, Alexander; Boening, Mike; Mueller, Frank E. H.; Hinrichsen, Volker; Heilmaier, Martin
Microstructure Formation and Resistivity Change in CuCr during Rapid Solidification
Band 7, Heft 11, Metals, 2075-4701

Heidt, Carolin; Henriques, Andre; Stamm, Michael; Grohmann, Steffen
First experimental data of the cryogenic safety test facility PICARD
Band 171, IOP conference series / Materials science and engineering, 1757-8981, 1757-899X

* Hellmann, Sebastian; Abplanalp, Markus; Hofstetter, Lukas; Noe, Mathias
Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer with Recovery-Under-Load Capabilities
Band 4, IEEE transactions on applied superconductivity 1051-8223, 1558-2515

* Herron, C. A.; Geisbüsch, J.; Landecker, T. L.; Kothes, R.; Gaensler, B. M.; Lewis, G. F.; McClure-Griffiths, N. M.; Petroff, E.
Polarization Gradient Study of Interstellar Medium Turbulence Using the Canadian Galactic Plane Survey
Band 835, Heft 2, The astrophysical journal, 0004-637X, 0004-637x, 1538-4357

* Hornung, Frank; Eisele, Matthias; Klaeser, Marion; Leys, Pauline; Ruf, Claudia; Schneider, Theo; Ruf, Claudia
From Double-Pancake Coils to a Layer Wound 5 T REBCO-HTS High Field Insert Coil Design
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

Iida, Kazumasa; Hänisch, Jens; Naito, Michio
Dimensional crossover in Fe-based superconductors
Band 52, Heft 6, Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan

- * Iida, Kazumasa; Sato, Hikaru; Tarantini, Chiara; Hänisch, Jens; Jaroszynski, Jan; Hiramatsu, Hidenori; Holzapfel, Bernhard; Hosono, Hideo
High-field transport properties of a P-doped BaFe₂As₂ film on technical substrate
Band 7, Scientific reports, 2045-2322
- Janzen, A; Boersch, M; Burger, B; Drache, J; Ebersoldt, A; Erni, P; Feldbusch, F; Oertig, D; Grohmann, S
Experimental validation of a self-calibrating cryogenic mass flowmeter
Band 278, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
- Janzen, Andreas; Burger, Birgit; Ebersoldt, Andreas; Heidt, Carolin; Langhans, Oliver; Reiner, Alexander; Grohmann, Steffen
Signal-to-noise ratio of temperature measurement with Cernox sensors at various supply currents
Band 171, Heft 1, IOP conference series / Materials science and engineering, 1757-8981, 1757-899X
- * Kauffmann-Weiss, S.; Hahn, S.; Weigelt, C.; Schultz, L.; Wagner, M.F.-X.; Fähler, S.
Growth, microstructure and thermal transformation behaviour of epitaxial Ni-Ti films
Band 132, Acta materialia, 1359-6454, 1873-2453
- * Kauffmann-Weiss, S.; Hassler, W.; Guenther, E.; Scheiter, J.; Denneler, S.; Glosse, P.; Berthold, T.; Oomen, M.; Arndt, T.; Stocker, T.; Hanft, D.; Moos, R.; Weiss, M.; Weis, F.; Holzapfel, B.
Superconducting Properties of Thick Films on Hastelloy Prepared by the Aerosol Deposition Method With Ex Situ MgB₂ Powder
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Kirby, Glyn A.; Nugteren, Jeroen van; Bajas, H.; Benda, V.; Ballarino, A.; Bajko, M.; Bottura, Luca; Broekens, K.; Canale, M.; Chiuchiolo, A.; Gentini, L.; Peray, N.; Perez, Juan Carlos; de Rijk, Gijs; Rijllart, Adriaan; Rossi, Lucio; Murtoemaeki, J.; Mazet, Jacky; Pincot, Francois-Olivier; Volpini, Giovanni; Durante, Maria; Fazilleau, P.; Lorin, Clement; Stenvall, A.; Goldacker, Wilfried; Kario, Anna; Usoskin, Alexander
First Cold Powering Test of REBCO Roebel Wound Coil for the EuCARD2 Future Magnet Development Project
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Kochenburger, T. M.; Gomse, D.; Tratschitt, I.; Zimmermann, A.; Grohmann, S.
Vapor-liquid and vapor-liquid-liquid equilibrium measurements and correlation of the binary mixtures 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) + (tetrafluoromethane (R14), trifluoromethane (R23), octafluoropropane (R218), nitrogen (R728) and argon (R740)) and ethane (R170) + trifluoromethane (R23)
Band 450, Fluid phase equilibria, 0378-3812, 1879-0224
- * Kottonau, D.; Shabagin, E.; Noe, M.; Grohmann, S.
Opportunities for high-voltage AC superconducting cables as part of new long-distance transmission lines
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Liu, Y.; Ou, J.; Noe, Mathias
A large-scale superconducting DC wind generator considering concentrated/distributed armature winding
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Li, Y.; Feng, F.; Li, Y.; Song, P.; Zou, S.; Wu, M.; Gu, C.; Zeng, P.; Qu, T.
Numerical Study on AC Loss Characteristics of REBCO Armature Windings in a 15-kW Class Fully HTS Generator
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Marian, A.; Ballarino, A.; Catalan, C.; Dittmar, N.; Escamez, G.; Giannelli, S.; Grilli, F.; Holé, S.; Haberstroh, C.; Lesur, F.; Poumarède, C.; Tropeano, M.; Vega, G.; Bruzek, C.-E.
An MgB₂ HVDC superconducting cable for power transmission with a reduced carbon footprint
Band 440, Lecture notes in electrical engineering, 1876-1100, 1876-1119
- * Morandi, Antonio; Ainslie, Mark Douglas; Grilli, Francesco; Stenvall, Antti
The 5th international workshop on numerical modelling of high temperature superconductors
Band 30, Heft 8, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668
- * Ou, Jing; Liu, Yingzhen; Schiefer, Markus; Doppelbauer, Martin
A Novel PM-Free High-Speed Linear Machine with Amorphous Primary Core
Band 53, Heft 11, IEEE transactions on magnetics, 0018-9464, 1941-0069
- * Prikhna, T. A.; Romaka, V. V.; Shapovalov, A. P.; Eisterer, M.; Sokolovsky, V.; Weber, H. W.; Grechnev, G. E.; Boutko, V. G.; Gusev, A. A.; Kozyrev, A. V.; Goldacker, Wilfried; Moshchil, V. E.; Sverdun, V. B.; Habisreuther, T.; Schmidt, C.; Kovylaev, V. V.; Shaternik, V. E.; Karpets, M. V.; Shaternik, A. V.
Structure and Properties of MgB₂ Bulks, Thin Films, and Wires
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515
- * Ramalingam, Rajinikumar; Atrey, M. D.
Theoretical analysis and coating thickness determination of a dual layer metal coated FBG sensor for sensitivity enhancement at cryogenic temperatures
Band 278, IOP conference series / Materials science and engineering, 1757-8981, 1757-899X
- * Ramalingam, Rajinikumar; Nast, R.; Neumann, H.
Strain Characterization of High Temperature Superconductor Tapes Using Embedded Fibre Bragg Grating Sensor in Mid-rip and Parallel Configuration
Band 30, Heft 7, Journal of superconductivity and novel magnetism, 0896-1107, 1557-1939, 1557-1947, 1572-9605

* Richter, Stefan; Kurth, Fritz; Iida, Kazumasa; Pervakov, Kirill; Pukenas, Aurimas; Tarantini, Chiara; Jaroszynski, Jan; Hänisch, Jens; Grinenko, Vadim; Skrotzki, Werner; Nielsch, Kornelius; Hühne, Ruben
Superconducting properties of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{As}_2$ thin films in high magnetic fields
Band 110, Heft 2, Applied physics letters, 0003-6951, 1077-3118

* Richter, T.; Bobien, S.; Fietz, W. H.; Heiduk, M.; Heller, R.; Hollik, M.; Lange, C.; Lietzow, R.; Rohr, P.
Design, construction and performance of the current lead test facility CuLTKa
Band 86, Cryogenics, 0011-2275, 1879-2235

* Rijckaert, Hannes; Pollefeyt, Glenn; Sieger, Max; Hänisch, Jens; Bennewitz, Jan; De Keukeleere, Katrien; De Roo, Jonathan; Hühne, Ruben; Bäcker, Michael; Paturi, Petriina; Huhtinen, Hannu; Hemgesberg, Maximilian; Van Driessche, Isabel
Optimizing Nanocomposites through Nanocrystal Surface Chemistry: Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Thin Films via Low-Fluorine Metal Organic Deposition and Preformed Metal Oxide Nanocrystals
Band 9, Heft 14, Chemistry of materials, 0897-4756, 1520-5002

* Schreiner, F.; Gutheil, B.; Noe, M.; Reiser, W.; Huwer, S.; Hanebeck, C.; Räch, C.; Röhrenbeck, M.; Schreiner, F.
Design and Manufacturing of a Multistage Cooled Current Lead for Superconducting High Current DC Busbars in Industrial Applications
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

* Shabagin, E.; Heidt, C.; Strauß, S.; Grohmann, S.
Modelling of 3D temperature profiles and pressure drop in concentric three-phase HTS power cables
Band 81, Cryogenics, 0011-2275, 1879-2235

* Shen, B.; Li, J.; Geng, J.; Fu, L.; Zhang, X.; Zhang, H.; Li, C.; Grilli, F.; Coombs, T. A.
Investigation of AC losses in horizontally parallel HTS tapes
Band 30, Heft 7, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

* Sieger, M.; Pahlke, P.; Lao, M.; Eisterer, M.; Meledin, A.; Van Tendeloo, G.; Ottolinger, R.; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard; Usoskin, A.; Kursumovic, A.; Macmanus-Driscoll, J. L.; Stafford, B. H.; Bauer, M.; Nielsch, K.; Schultz, L.; Hühne, R.
Tailoring Microstructure and Superconducting Properties in Thick BaHfO_3 and $\text{Ba}_2\text{Y}(\text{Nb}/\text{Ta})\text{O}_6$ Doped YBCO Films on Technical Templates
Band 27, Heft 4, IEEE transactions on applied superconductivity, 1051-8223, 1558-2515

* Sokolovsky, V.; Prikhna, T.; Meerovich, V.; Eisterer, M.; Goldacker, W.; Kozyrev, A.; Weber, H. W.; Shapovalov, A.; Sverdun, V.; Moshchil, V.
 MgB_2 -based superconductors for fault current limiters
Band 171, Heft 1, IOP conference series / Materials science and engineering 26th International Cryogenic Engineering Conference, ICEC 2016 and International Cryogenic Materials Conference 2016, ICMC 2016; Manekshaw Convention Centre New Delhi; India; 7 March 2016 through 11 March 2016, 1757-8981, 1757-899X

* Sparing, M.; Reich, E.; Hänisch, J.; Gottschall, T.; Hühne, R.; Fähler, S.; Rellinghaus, B.; Schultz, L.; Holzapfel, B.
Controlling particle properties in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ nanocomposites by combining PLD with an inert gas condensation system
Band 30, Heft 10, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

* Thekkethil, S. R.; Thomas, R. J.; Neumann, H.; Ramalingam, R.
Experimental investigation on mass flow rate measurements using fibre Bragg grating sensors
Band 171, IOP conference series / Materials science and engineering, 1757-8981, 1757-899X

* Venkatesan, V. N.; Ramalingam, R.
Numerical and experimental investigation of FBG strain response at cryogenic temperatures
Band 171, Heft 1, IOP conference series / Materials science and engineering, 1757-8981, 1757-899X

Weber, C.; Henriques, A.; Zoller, C.; Grohmann, S.
Safety studies on vacuum insulated liquid helium cryostats
Band 278, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

* Zermeño, Víctor M R; Habelok, Krzysztof; Stępień, Mariusz; Grilli, Francesco
A parameter-free method to extract the superconductor's $J_c(B, \theta)$ field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes
Band 30, Heft 3, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

* Zou, Shengnan; Zermeño, Víctor M. R.; Baskys, A.; Patel, A.; Grilli, Francesco; Glowacki, B. A.
Simulation and experiments of stacks of high temperature superconducting coated conductors magnetized by pulsed field magnetization with multi-pulse technique
Band 30, Heft 1, Superconductor science and technology, 0953-2048, 1361-6668

* Breining, Patrick; Veigel, Marc; Doppelbauer, Martin; Liu, Yingzhen; Noe, Mathias
Iron loss measurement of nonoriented silicon and cobalt iron electrical steel sheets at liquid nitrogen temperature using ring specimen
2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, USA, 21–24 May 2017

Eingeladene Vorträge

Bauer, Kai
Die Gefährdungsbeurteilung in hochspezialisierten Arbeitssystemen
35. Internationaler Kongress für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Düsseldorf, 17.–20. Oktober 2017

Duband, Lionel
Sub-kelvin cooling for space and ground-based telescope
European Cryogenic Days 2017, Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Filipenko, Mykhaylo

HTS-Technology for hybrid electric aircraft
European Cryogenic Days 2017, Karlsruhe, Germany,
13th–15th September 2017

Geisbüsch, Jörn

Overview of energy lab 2.0 and its power-hardware-in-the-loop facilities
Workshop on Information and Communication Technology of the Energy Lab 2.0 and on Mobility Systems, St.Petersburg, Russia, June 28–30, 2017

Geisbüsch, Jörn; Batista de Sousa, Wesley; Kaiser, Felix; Karrari, Shahab

Status of energy Lab 2.0 and overview of power-hardware-in-the-loop activities
OPAL-RT's 9th International Conference on Real-Time Simulation, Montreal, CDN, September 5–8, 2017

Goldacker, Wilfried; Kario, Anna; Otten, Simon; Kling, Andrea

HTS Roebel cables, the future and the potential
4th Workshop on Accelerator Magnets in High Temperature Superconductors (WAMHTS-4), Barcelona, E, February 15–17, 2017

Gyuraki, Roland; Sirois, Frederic; Grilli, Francesco

High-speed thermal imaging of quench propagation in HTS tapes using temperature-sensitive fluorescent films
25th International Conference on Magnet Technology (MT25), Amsterdam, NL, August 27 – September 1, 2017

Hänisch, Jens

Critical current anisotropy in cuprate and Fe-based superconducting thin films
MPI Seminar, Stuttgart, 21.02.2017

Hänisch, Jens; Iida, Kazumasa; Hühne, Ruben; Holzapfel, Bernhard

Strain effects in Fe-based superconducting thin films
Workshop on Surface and Interface Diffraction, DESY Hamburg, March 9–10, 2017

Hänisch, Jens; Iida, Kazumasa; Kurth, Fritz; Richter, Stefan; Hühne, Ruben; Grineko, Vadim; Holzapfel, Bernhard; Schultz, Ludwig

High-field transport properties of Fe-based superconducting thin films
2nd Workshop Itinerant Magnetism and Superconductivity (IMS 2017), Dresden, September 28–29, 2017

Herzog, Friedhelm; Kutz, Thomas; Stemmler, Mark; Kugel, Torsten

Liquid Nitrogen operated Cooling Systems for Superconducting Power Lines
2nd International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications (IWC-HTS), Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Holzapfel, Bernhard

Applied superconductivity research at the Institute for Technical Physics
Nagoya University, J, March 24, 2017

Holzapfel, Bernhard

High temperature superconductors for all superconducting magnets beyond 2ST
Neutronenseminar, Forschungs-Neutronenquelle Heinz-Maier-Leibnitz, Garching, 3.Juli 2017

Holzapfel, Bernhard

REBCO conductors
ESAS Summer School on Superconductivity, Lans-en-Vercors, F, June 25–30, 2017

Holzapfel, Bernhard

Superconducting materials in energy applications
Symposium 'The Great Transition – the Importance of Critical Metals for Green Energy Technologies', Darmstadt

Iida, K.; Tarantini, C.; Hänisch, J.; Kurth, F.; Jaroszynski, J.; Sumiya, N.; Chihara, M.; Hatano, T.; Schmidt, S.; Seidel, P.; Holzapfel, B.; Larbalestier, D.C.; Ikuta, H.

Intrinsic vortex pinning and critical current scaling in NdFeAs(O,F)
International Workshop on Recent Progress in Superconductivity (IWRS 2017), Pyeongchang(Yongpyong), South Korea, July 3–5, 2017

Jakob, Gerd

Cryogenics at the Extremely Large Telescope (ELT)
European Cryogenic Days 2017, Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Kario, A.; Kling, A.; Otten, S.; Mirasch, U.; Goldacker, W. Intermediate Roebel cable lengths as a first HTS cable used in the HTS demonstrator accelerator type coil
Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC), Madison, WI, July 9–13, 2017

Kario, A.; Otten, S.; Kling, A.; Goldacker, W.; Rossi, L.; Bottura, L.; Kirby, G.; van Nugteren, J.; Senatore, C.; Barth, C.; Bonura, M.; Dhalle, M.; Gao, P.; Rutt, A.; Usoskin, A.; Lorin, C.; Durante, M.

Optimization of Roebel cables for use in magnets
Low Temperature/High Field Superconductor Workshop, Santa Fe, NM, February 27 – March 1, 2017

Kario, A.; Otten, S.; Kling, A.; Mirasch, U.; Goldacker, W.; Senatore, C.; Barth, C.; Bonura, M.; Yang, Y.; Stenvall, A.; Dhalle, M.; Gao, P.; Wessel, S.; Usoskin, A.; Rutt, A.; Kirby, G.A.; Nugteren, J. van; Bajas, H.; Benda, V.; Ballarino, A.; Bajko, M.; Bottura, L.; Broekens, K.; Canale, M.; Chiuchiolo, A.; Fleiter, J.; Gentini, L.; Peray, N.; Perez, J.C.; de Rijk, G.; Rijllart, A.; Rossi, L.; Murtoemaeki, J.; Mazet, J.; Pincot, F.O.; Lorin, C.; Durante, M.; Fazilleau, P.

High temperature superconductor Roebel cables for accelerator demonstrator dipole magnets
Superconductivity Seminar, Krynica Morska, PL, October 9–13, 2017

Montanari, David

The Long-Baseline Neutrino Facility
European Cryogenics Days 2017, Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Noe, Mathias

Anwendungen der Supraleitertechnologie
1.Kaiserslauterer Supraleitersymposium, 27. September 2017

Noe, Mathias
Promising energy storage materials, technologies and applications
Ceramics for Energy (CEn 2017), Faenza, I, June 7–9, 2017

Noe, Mathias
Supraleiter erobern elektrische Netze – Widerstand zwecklos
Berliner Industriegespräche der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 24. Mai 2017

Noe, Mathias; Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Wolf, Michael
Status and perspectives in high-temperature superconductivity for nuclear fusion
Kolloquium, IPP Greifswald, 23. Juni 2017

Noe, Mathias; Kottonau, Dustin
Cooling Requirements of Superconducting Power Cables
European Cryogenic Days, Karlsruhe, Germany, 13th – 15th September 2017

Noe, Mathias; Mrzahn, Erik
Hochtemperatur Supraleiter: Kabel und Strombegrenzer Kabelnetze in der Energieversorgung : 89. Kabelseminar, Hannover, 21.–22. Februar 2017

Ohsaki, Hiroyuki
Review and update on MAGLEV
European Cryogenic Days 2017, Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Pfotenhauer, John M.
Recent Advances in Cryogenic Pulsating Heat Pipes
2nd International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications (IWC-HTS), Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Reis, Thomas; Waele, A.T.A.M. de; Oswald, Johannes; Oswald, Bernhard; Berberich, Eva
Cryogenic challenges for different superconductive motor topologies
II. International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications, Karlsruhe, Germany, September, 13–15, 2017

Sieger, M.; Pahlke, P.; Hänisch, J.; Lao, M.; Elsterer, M.; Meledin, A.; Van Tendeloo, G.; Nielsch, K.; Schultz, L.; Hühne, R.
Fast PLD growth of nanostructured YBCO coated conductors with artificial pinning centers
30th International Symposium on Superconductivity (ISS2017), Tokyo, J, December 13–15, 2017

Tavian, Laurent
The Future Circular Collider (FCC) project and its cryogenic challenges
European Cryogenic Days (ECD) 2017, Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Trollier, Thierry; Boyle, Christopher; Tanchon, Julien; Reynolds, Hugh
Commercial Cryocoolers for use in HTS Applications
2nd International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications (IWC-HTS), Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Zenklusen, A.; Jurns, J.; Arnold, P.; Quack, H.
ESS Target Moderator Cryogenic Plant : Process Design
European Cryogenic Days 2017, Karlsruhe, Germany, 13th–15th September 2017

Veröffentlichungen

Materie und Universum (MU)

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenbeiträge

* Bornschein, Beate; Besserer, Uwe; Steidl, Markus; Sturm, Michael; Valerius, Kathrin; Wendel, Jürgen
The Five Phases to Standard Tritium Operation of KATRIN
Band 71, Heft 3, Fusion science and technology,
0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Bornschein, Lutz; Bornschein, Beate; Ebenhoech, Sylvia; Hackenjos, Moritz; Priester, Florian; Roellig, Marco; Sturm, Michael; Thuemmler, Thomas
Status of the Karlsruhe Tritium Neutrino Mass Experiment KATRIN
Band 71, Heft 4, Fusion science and technology,
0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

* Schlösser, M.; Zhao, X.; Trivikram, M.; Ubachs, W.; Salumbides, E.J.
CARS spectroscopy of the ($v = 0 \rightarrow 1$) band in T_2
Band 50, Heft 21, Journal of physics / B, 0022-3700,
0368-3508, 0953-4075, 1361-6455

Welte, S.; Fanghaenel, E.; Fischer, S.; Kramer, F.; Le, T. L.; Sturm, M.; Tuchscherer, N.
Experimental Performance Test of Key Components of the KATRIN Outer Tritium Loop
Band 17, Heft 3, Fusion science and technology,
0748-1896, 1536-1055, 1943-7641

Eingeladene Vorträge

Hackenjos, Moritz
FirstLight measurements of the KATRIN experiment
81. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung,
Fachverband Teilchenphysik, Münster, 27.–31. März
2017

Krasch, Bennet; Altenbrand, Florian; Gröbtle, Robin; Mirz, Sebastian; Off, Andreas
Design of an experiment for the experimental determination of the efficiency of converters for ortho/para conversion of hydrogen isotopologues
9th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (ICAVS-9), Victoria, CDN, June 11–16, 2017

Kraus, Alexander; Grössle, Robin; Mirz, Sebastian
D-Dimensional Fourier Grid Hamiltonian Method with Potential-Adapted Grid for Hydrogen Isotopologue Cluster Computations
DPG-Frühjahrstagung, Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP), Fachverband Molekülphysik, Mainz, 6.–10. März 2017

Veröffentlichungen

Materie und Technologie (MT)

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenbeiträge

* Holubek, T.; Casalbuoni, S.; Gerstl, S.; Glamann, N.; Grau, A.; Meuter, C.; De Jauregui, D. S.; Nast, R.; Goldacker, W.
A novel concept of high temperature superconducting undulator
Band 30, Heft 11, Superconductor science and technology 0953-2048, 1361-6668

Veröffentlichungen

Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen (EMR)

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenbeiträge

* Niemann, R.; Backen, A.; Kauffmann-Weiss, S.; Behler, C.; Rößler, U.K.; Seiner, H.; Heczko, O.; Nielsch, K.; Schultz, L.; Fähler, S.

Nucleation and growth of hierarchical martensite in epitaxial shape memory films

Band 132, Acta materialia, 1359-6454, 1873-2453

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.

Finely-tuned NIR-to-visible up-conversion in La₂O₃:Yb³⁺,Er³⁺ microcrystals with high quantum yield

Band 5, Heft 42, Journal of materials chemistry / C, 2050-7526, 2050-7534

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 8255023

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

Schienegebundene 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

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

Herausgeber

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

Stand August 2018

www.kit.edu