

## ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung  
Jahresbericht 2014

INSTITUT FÜR TECHNISCHE PHYSIK



## Impressum

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

Telefon +49 721/608-23501

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

Texte: O. Borisevich, B. Bornschein, L. Bornschein,  
C. Day, D. Demange, W. Fietz, S. Fischer, W.-S. Gil,  
W. Goldacker, R. Größle, J. Haag, R. Michling, S. Mirz,  
H. Neumann, M. Noe, F. Priester, M. Röllig, J. Sandrock,  
P. Schäfer, T. Schneider, M. Sturm, J. Wendel,

Fotos und Grafiken:  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Titelbild: Mit dem obligatorischen Knopfdruck  
starteten die Projektpartner und Ehrengäste das  
Projekt AmpaCity in Essen. Damit ging das längste  
Supraleiterkabel der Welt in den offiziellen Betrieb  
(Bild: RWE Deutschland AG).

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

Druck:  
Systemedia GmbH, 75449 Wurmberg

März 2015

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Ergebnisse aus den Forschungsbereichen</b>	<b>6</b>
Technologie für Fusionsmagnete	6
Supraleitende Hochfeldmagnete	12
Supraleitende Materialien und Energieanwendungen	18
Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)	24
Vakuumtechnik	30
Kryotechnik	36
Karlsruher Tritium Neutrino Experiment KATRIN	42
<b>Auszeichnungen und Preise</b>	<b>48</b>
<b>Lehre und Bildung</b>	<b>50</b>
Vorlesungen, Seminare, Workshops und Sommerschulen	50
Doktorarbeiten – Master- und Diplomarbeiten – Bachelor- und Studienarbeiten	51
ITEP Kolloquien	54
<b>Zahlen und Daten</b>	<b>55</b>
Organigramm ITEP	55
Personalstand	55
Personalveränderungen	56
Trainee / Studentische Hilfskräfte	58
Gastwissenschaftler	59
Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien	60
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>62</b>
Veröffentlichungen Programm „Kernfusion“	62
Veröffentlichungen Programm „Rationelle Energieumwandlung“	66
Veröffentlichungen Programm „Struktur der Materie“	71
Eingeladene Vorträge	72
Schutzrechtsbestände	74
<b>Kontakt</b>	<b>77</b>

# Vorwort

Das Institut für Technische Physik (ITEP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) versteht sich als nationales und internationales Kompetenzzentrum für Fusions-, Supraleitungs- und Kryotechnologie. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in den folgenden Bereichen:

- Technologie für Fusionsmagnete
- Tritiumverfahrenstechnologie
- Vakuumtechnik
- Kryotechnik
- Supraleitermaterialentwicklung und energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- Supraleitende Hochfeldmagnete

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

Für seine komplexen und meist multidisziplinären Aufgaben verfügt das ITEP über einzigartige Großversuchsanlagen, Labors und entsprechende technische Infrastruktur. Dazu gehören unter anderem:

- Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) als weltweit einziges zivil genutztes 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 sehr tiefen Temperaturen

Im Folgenden möchten wir kurz über wichtige wissenschaftliche Ergebnisse, erfolgreiche Entwicklungsprojekte, Herausforderungen und Ereignisse des Jahres 2014 am ITEP berichten.

Der Arbeitsbereich **Fusionsmagnete** hat für das Fusionsexperiment JT60-SA die Entwicklung, den Bau und den Test von Hochstromzuführungen mit Hochtemperatur-Supraleitern übernommen. 2014 nahm er in enger Zusammenarbeit mit dem Bereich Kryotechnik und dem Technikhaus die Anlage zum Test dieser Stromzuführungen fristgerecht in Betrieb. Parallel dazu fertigte er die ersten Stromzuführungen und testete anschließend mit Erfolg das erste Stromzuführungspaar. Weiterhin nahm er im Rahmen der Helmholtz Energy Materials Charac-

terization Platform neue Testanlagen für Materialtests bei tiefen Temperaturen in Betrieb und führte erste Messungen mit externen Nutzern durch.

Das **Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)** entwickelt für das internationale Fusionsexperiment ITER und das zukünftige Fusionskraftwerk DEMO die Tritiumextraktion aus dem Blanket. Dazu führte das TLK 2014 erstmals vollständige Tests von Prototypmembranen für die Tritiumextraktion durch. Weiterhin wurde die 2010 begonnene Erneuerung des Automatisierungssystems des TLK in Eigenregie mit minimaler Stillstandszeit abgeschlossen. Im Forschungsschwerpunkt Tritiumanalytik waren 2014 vor allem zwei Erfolge zu verzeichnen: Bei der Infrarot-Absorptionsspektroskopie wurde eine relative Kalibrierung ohne Tritium – das heißt mit H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub> – erreicht, die eine Genauigkeit von +5 % bietet. Bei der Laser-Raman-Spektroskopie wurde erreicht, dass die Kalibration mit einem einfachen Fluoreszenzstandard erfolgen kann.

Im Bereich **Vakuumtechnik** liegen die Schwerpunkte auf der Entwicklung von Vakuumsystemen mit extrem hohem Saugvermögen und der Entwicklung von numerischen Codes, besonders für die Vakuumströmung im Übergangsbereich. 2014 wurde die vakuumtechnische Modellierung des Asdex Upgrade Divertors durchgeführt. Der dazu entwickelte Code wurde mit einer Messung am Jet Divertor validiert. – Besonders erfreulich war die Auszeichnung von Dr. Christian Day und Thomas Giegerich mit dem „European Innovation Prize in Fusion Research“. Diesen erhielten sie für ihr neu entwickeltes Verfahren für den Brennstoffkreislauf von zukünftigen Fusionskraftwerken. Das bereits patentierte neue Referenzverfahren ermöglicht einen kontinuierlichen Betrieb bei hohen Durchsätzen und zugleich niedrigem Inventar.



*Dr. Christian Day (links) bei der Verleihung des „European Innovation Prize in Fusion Research“.*

Eine Kernaufgabe des Bereichs **Supraleitende Materialien & Energieanwendungen** liegt in der Entwicklung von supraleitenden Materialien, sowie wirtschaftlichen, verlustarmen und hochstromtauglichen Leiterkonzepten und deren Verknüpfung mit energietechnischen Anwendungen. Im Rahmen der erfolgreich eingeworbenen Helmholtz Rekrutierungsinitiative „Supraleitende Materialien“ wurden erste Labore in Betrieb genommen und neue Materialentwicklungsprojekte mit Industriepartnern initiiert. Im Bereich wurden 2014 mehrere hochtemperatur-supraleitende Roebel-Kabel in Testlängen bis zu 5 m für verschiedene Anwendungen, unter anderem für den LHC Upgrade beim CERN, gefertigt und sowohl am KIT als auch bei Partnern gemessen.

Hinsichtlich neuer energietechnischer Anwendungen der Supraleitung wurde im Rahmen eines Verbundprojekts in Essen das weltweit längste supraleitende Kabel (1 km, 40 MVA) in Kombination mit einem supraleitenden Strombegrenzer erfolgreich und ohne Zeitverzug in Betrieb genommen. Weiterhin startete ein neues Verbundprojekt zur Entwicklung eines neuartigen supraleitenden Strombegrenzers mit konventionellen Drosselspulen, verbunden mit einem supraleitenden Einsatz.

Der Arbeitsschwerpunkt des Bereichs **Supraleitender Hochfeldmagnete** liegt auf der Entwicklung von Magneten und Spulensystemen für hohe Magnetfelder mit Hochtemperatur-Supraleitern. 2014 schloss das ITEP seine Arbeiten in einer Industriekooperation zur Entwicklung eines hochauflösenden NMR-Systems erfolgreich ab. Unter anderem zeigten die Forscher, dass die entwickelten Modellspulen die mechanischen Anforderungen vollständig erfüllen. Für zukünftige Anwendungen von Magneten in Industrieheizern oder rotierenden Maschinen begannen erste Arbeiten zur Entwicklung großer hochtemperatur-supraleitender Rennbahnspulen. Dazu wurden erste Rechnungen sowie Charakterisierungen der Supraleiter durchgeführt und Modellspulen gewickelt.

Der Bereich **Kryotechnik** entwickelt, erweitert und betreibt komplexe und umfangreiche Kryosysteme, unter anderem für das Neutrino Experiment KATRIN und die Stromzuführungstestanlage CuLTKa. Die Anlage CuLTKa ging 2014 erfolgreich in Betrieb. Darüber hinaus sorgt der Bereich Kryotechnik für die Wartung und Instandhaltung der Kälteanlagen und die Versorgung des KIT mit flüssigem Helium und flüssigem Stickstoff. Im europäischen Verbundprojekt Suprapower ([www.suprapower-fp7.eu](http://www.suprapower-fp7.eu)) zur Entwicklung eines supraleitenden Windkraftgenerators wurde der Kryostat konstruiert und mit dessen Fertigung begonnen.

Für das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN ([www.katrin.kit.edu](http://www.katrin.kit.edu)) leistet das ITEP Beiträge zu den

Tritiumkreisläufen, zur Kryoversorgung und zu den supraleitenden Magneten. 2014 unterstützte es die Arbeiten zu den supraleitenden Magnetsystemen wesentlich, sodass diese ab 2015 schrittweise in Betrieb genommen werden können. Das ITEP führte auch die Gesamtkonzeption der Rear Section von KATRIN weiter. Daneben untersuchte es unter anderem mithilfe einer selbst aufgebauten Ultrahochvakuum-Kelvinprobe vielversprechende Materialkandidaten für die Rear Wall.

Was personelle Veränderungen am ITEP betrifft, ist die Zahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Ausbildung, wie Studierenden der Dualen Hochschule, Diplomanden, Doktoranden und Trainees, erfreulicherweise weiter gestiegen. Insgesamt bildete das ITEP 2014 mehr als 80 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in verschiedenen Disziplinen aus. – Einen schmerzlichen Verlust erlitt das Institut durch den Tod seines langjährigen verdienten Mitarbeiters Dr. Michael Sander. Er initiierte am ITEP die Arbeiten zu einem supraleitenden magnetischen Energiespeicher als Kurzzeitspeicher in Kombination mit einem flüssigen Wasserstoff als Langzeitspeicher und war maßgeblich an der Entwicklung des Speichers beteiligt.

In der Lehre konzipierte und startete das ITEP weitere neue Vorlesungen. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP boten 2014 insgesamt Vorlesungen von mehr als 34 Semesterwochenstunden im Jahr in vier verschiedenen KIT-Fakultäten an. Für ihr besonderes Engagement in der Lehre erhielt Dr. Beate Bornschein 2014 den Fakultätslehrpreis der KIT-Fakultät für Physik.

Unser ganz besonders herzlicher Dank gilt allen Partnern des ITEP aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie für die außerordentlich vertrauensvolle, fruchtbare und erfolgreiche Zusammenarbeit im Jahr 2014.

Herzlichst



Mathias Noe  
Institutsleitung



Bernhard Holzapfel



Erster Test zweier Stromzuführungen für JT-60SA in der neuen Testanlage CuLTKa.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Fusionsmagnete

*Leitung: Dr. Walter Fietz*

Der Bereich Fusionsmagnete des ITEP führte 2014 Arbeiten für die internationalen Projekte JT-60SA und ITER aus. Zusätzlich untersuchten die Wissenschaftler den Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern für künftige Fusionsreaktoren.

### Entwicklung und Bau von Stromzuführungen für JT-60SA

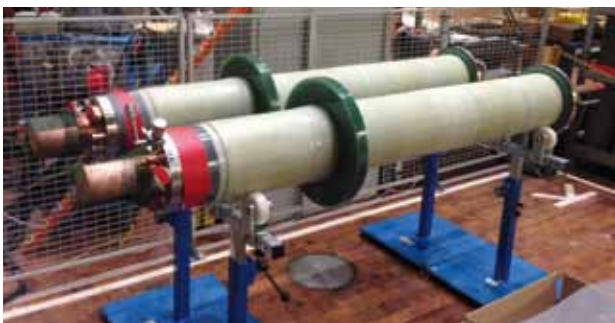
#### Fertigungsarbeiten für JT-60SA

Das BMBF sagte 2007 angesichts der Expertise des ITEP bei HTS-Stromzuführungen zu, Stromzuführungen für den Bau des Satelliten-Tokamaks JT-60SA zu liefern. Insgesamt werden sechs Stromzuführungen mit einem Betriebsstrom von 26 kA für die TF-Spulen und 20 Stromzuführungen mit einem Maximalstrom von 20 kA für die CS- und PF-Spulen des JT-60SA benötigt.

In einem ersten Teilprojekt, das von 2008 bis 2012 lief, arbeitete der Bereich Fusionsmagnete des ITEP das Design der Stromzuführungen aus, fixierte gemeinsam mit F4E und Japan die Anschlussbereiche an JT-60SA, stellte die Konstruktion fertig und beschaffte alle für den Bau erforderlichen Materialien.

In einem zweiten Projektteil, dessen Finanzierung bis 2017 laufen wird, begannen die Forscher 2013 mit der Fertigung der Stromzuführungen. Aufbauend auf den Erfahrungen bei der Fertigung der Stromzuführungen für W7-X, werden alle Stromzuführungen am KIT gefertigt, wobei das Technikhaus am Campus Nord eng eingebunden ist.

2014 stellten die Forscher alle sechs TF-Stromzuführungen fertig und testeten zwei Stromzuführungen erfolgreich unter Betriebsbedingungen. Fast alle Halbzeuge für die PF-Stromzuführungen sind inzwischen gefertigt; Ende 2014 standen insgesamt sechs Wärmetauscher bereit. Der Zusammenbau des ersten PF-Stromzuführungs-paars hat begonnen; dieses wird voraussichtlich im März 2015 fertiggestellt sein.



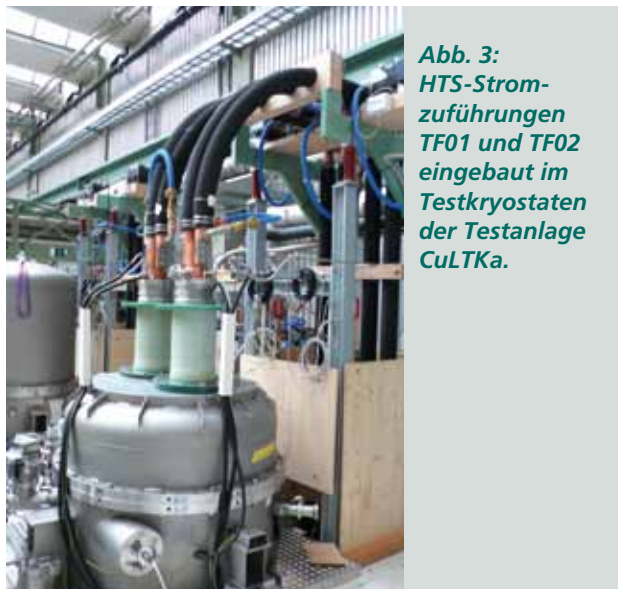
**Abb. 1:** HTS-Stromzuführungen TF03 und TF04 nach der Fertigstellung.



**Abb. 2:** 20 kA-Wärmetauscher nach erfolgreicher TÜV-Abnahme.

### Stromzuführungs-Testanlage CuLTka

Die für die Tests der 26 Stromzuführungen für JT-60SA benötigte neue Testanlage CuLTka (Current Lead Test facility Karlsruhe) wurde im Frühjahr 2014 – noch ohne Stromzuführungen – in Betrieb genommen. Im August 2014 setzte das Team die Inbetriebnahme nach der Integration der Stromzuführungen TF01 und TF02 in den Testkryostaten fort und testete erstmals erfolgreich zwei Stromzuführungen in CuLTka. Bis Ende 2014 nahmen die Mitarbeiter noch kleinere Modifikationen an CuLTka vor.



**Abb. 3:** HTS-Stromzuführungen TF01 und TF02 eingebaut im Testkryostaten der Testanlage CuLTka.

### Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleiter-Kabeln und Magnetentwicklung für DEMO

#### Status der Messungen in FBI

2014 nahm der Bereich Fusionsmagnete des ITEP Messungen an verschiedenen Hochtemperatur-Supraleiter-Kabeln vor. Unter anderem wurden in einer Masterarbeit Lötkontakte für HTS-Bänder untersucht. Ziele waren, einen umfassenden Überblick über die aktuellen Lötmethoden zu erhalten und die erfolgversprechendsten Methoden zu untersuchen sowie Methoden zu identifizieren.

ren, die niedrige Kontaktwiderstände ermöglichen. Um den Supraleiter dabei nicht zu schädigen, wurden effiziente und verlässliche Lötprozeduren erarbeitet. Zur Messung von Roebel Assembled Coated Conductors (RACC) in der FBI-Anlage war es erforderlich, dieses Kabel bezüglich der wirkenden Lorentzkräfte zu stabilisieren. Wegen der filigranen Mäanderstruktur wurde das Kabel in einer Stahlhülle mechanisch geklemmt. Um den maximal zulässigen Anpressdruck zu bestimmen, führte das Team Vorversuche mit unterschiedlichem Druck durch. Dabei stellte es fest, dass zusätzliche Kupferbänder notwendig sind, um eine Degradation des Kabels durch mechanischen Druck zu vermeiden.

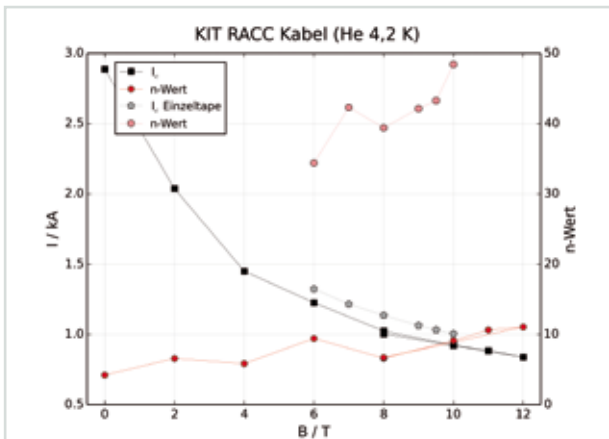


Abb. 4: Kritischer Strom eines RACC Kabels als Funktion des Magnetfelds (Feld senkrecht zur Bandebene).

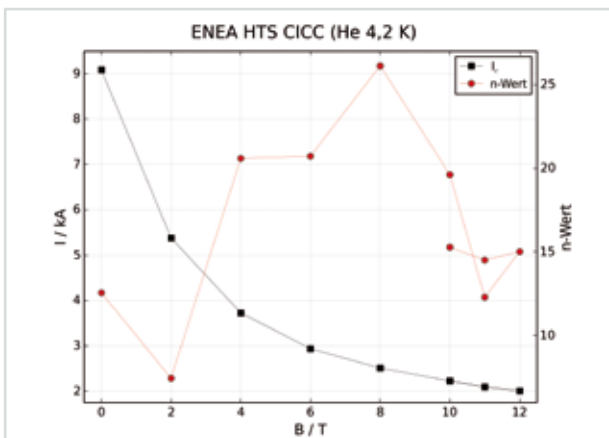


Abb. 5: Kritischer Strom über dem Magnetfeld der ENEA CICC Probe, gemessen in der FBI-Anlage.

Anschließend wurde mit dem ermittelten maximal zulässigen Anpressdruck ein HTS-Kabel aus zehn supraleitenden Bändern mit Zwischenlagen aus Kupfer mechanisch stabilisiert und im 12 T-Magneten der FBI-Anlage vermessen. Abbildung 4 zeigt das Messergebnis. Trotz der ungünstigen Magnetfeldorientierung senkrecht zur Bandebene ist das Ergebnis als gut zu bewerten, weil keine starke Degradierung zu sehen ist. Derzeit bereiten die Forscher ein Kabel unter Verwendung von 16 supraleitenden Bändern vor, um die Stabilisierungsmethode auch für höhere Lorentzkräfte zu validieren.

Neben dem RACC wurde ein Cable in Conduit Leiter von ENEA, basierend auf dem sogenannten Twisted Stacked Tape, in der FBI-Anlage gemessen (siehe Abbildungen 5

und 6). Hauptvorteil dieses Kabeldesigns ist die einfache Produktion: Dies ist gegenwärtig das einzige HTS Kabel der zweiten Generation (2G), das sich in voller Größe voll automatisiert herstellen lässt. Trotz des guten Stromtragverhaltens ist es für eine spätere Nutzung nötig, die Stromdichte zu erhöhen. Bei den abschließenden Messungen im Eigenfeld erwiesen sich die elektrischen Stromkontakte des Kabels als weitere Schwachpunkte.

Zurzeit bereitet das Team die Messung eines Twisted Stacked Tape Conductor (TSTC) von MIT vor. Untersucht werden soll das Stromtragverhalten bei unterschiedlichen Magnetfeldern, Temperaturen und mechanischen Belastungen.

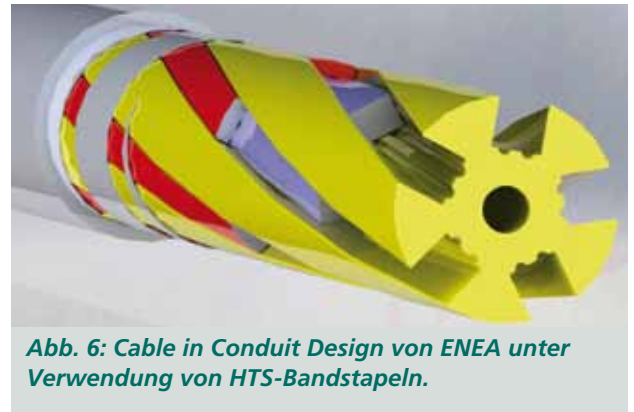


Abb. 6: Cable in Conduit Design von ENEA unter Verwendung von HTS-Bandstapeln.

### Designkonzept einer TF-Spule für DEMO

In einer Doktorarbeit wird ein Spulenkonzept einer TF-Spule für den Fusionsreaktor DEMO unter Verwendung von REBCO-Bandleitern untersucht. Ausgehend von existierenden Leiterkonzepten (CORC, TSC, Roebel-Rutherford), wurde ein mit Helium gekühlter und mit einer Stahlhülle versehener Leiter ausgewählt und damit das Wicklungspaket einer TF-Spule ausgelegt. Basis ist das aktuelle DEMO-Design, das sich aus dem PROCESS Systemcode ableiten lässt. Als Betriebstemperatur wurde 4.5 K gewählt, um das Potenzial der HTS-Materialien optimal auszunutzen.

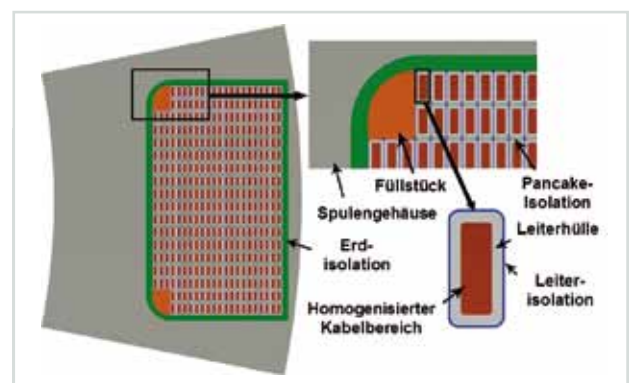


Abb. 7: Spulenquerschnitt inklusive Wicklungspaket (links), Ausschnitt des oberen Teils des Spulenquerschnitts (oben rechts) und REBCO-Leiterdesign (unten rechts) der TF-Spule für den DEMO Fusionsreaktor

Eine zweidimensionale strukturmechanische Analyse des Wicklungspakets der DEMO TF-Spule unter Verwendung eines HTS-Leiters wurde vorgenommen, und zwar in der Mittelebene des inneren Teils (siehe Abbildung 8) der TF-Spule, da dort die höchsten Lorentzkräfte auftreten. Dabei stellte sich heraus, dass die Leiterhülle aus



Edelstahl keinen hohen Belastungen ausgesetzt ist. Die Scherspannungen in der Leiterisolation sind hingegen sehr hoch, was an der zu niedrigen Steifigkeit des Spulengehäuses liegt (siehe Abbildung 8).

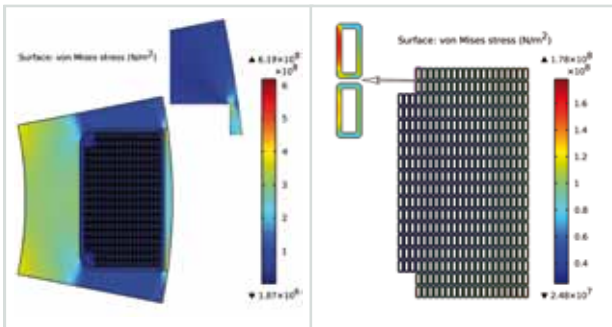


Abb. 8: Von Mises Stress im Spulengehäuse (links) bzw. im Wicklungspaket (rechts) des REBCO-Leiters der TF-Spule für den DEMO Fusionsreaktor.

Da auch das Gehäuse lokal hohe Belastungen erfährt, ist eine Optimierung erforderlich. – Die thermo-hydraulischen Analyse des REBCO-Leiters ist angelaufen.

### CryoMaK – Kryogenes Material Test Labor

#### Materialcharakterisierung für ITER und JT60-SA

Der Bereich Fusionsmagnete des ITEP unterstützt die laufende Produktion der Magnetkomponenten weiterhin durch Qualifikationsmessungen und Qualitätssicherung. Die Verträge mit ITER für kryogene Materialtests wurden bis in das Jahr 2015 verlängert.

#### Charakterisierung von elektrischen HTS Kontakten

Im Rahmen eines Kollaborationsvertrags mit ENEA wurden elektrische HTS-Kontakte charakterisiert; die Ergebnisse wurden in einem gemeinsamen Artikel veröffentlicht. Neben gelöteten Band-Band- und Band-Kupfer-Kontakten sind auch mechanische Band-Band-Kontakte wesentlich für HTS-Anwendungen und -Kabel. Für jede Anwendung bedarf es einer einfachen Methode, reproduzierbar niederohmige Band-Band-Verbindungen herzustellen. Dazu wurden überlappende Kontakte supraleitender 2G-Bänder mehrerer Hersteller unter Verwendung verschiedener Lote und Methoden untersucht. Wie sich zeigte, weichen die Kontaktwiderstände je nach verwendetem supraleitendem Band und Lot um mehrere Größenordnungen voneinander ab. Sogar beim Einsatz des gleichen Lots und supraleitender Bänder nur eines Herstellers variiert der Widerstand der gelöteten Kontakte abhängig von der Band-Charge.

Bei der Kompaktierung eines Hüllrohrs um ein Kabel werden die gestapelten Bänder durch den Anpressdruck miteinander verbunden. Der Inter-Band-Widerstand bestimmt die Stromverteilung im Kabel und auch die Wärmeausbreitung im Fall des Quenchs eines Bands.

Das Team stellte gelötete Band-Band- und Band-Kupfer-Kontakte sowie gepresste Band-Band-Kontakte her und maß sie für Bänder der beiden Hersteller SuperPower Inc. und SuNAM. Der spezifische Widerstand der gelöteten Band-Band-Kontakte ist für alle Bandtypen reproduzierbar, unterscheidet sich aber signifikant für Bänder von SuperPower Inc. bzw. SuNAM (Abbildung 9). Andererseits zeigte sich, dass der spezifische Widerstand von gelöteten Band-Kupfer-Kontakten bei beiden Herstellern vergleichbar ist. Werden die Kontakte mit

der gleichen Methode hergestellt, sind die Widerstandswerte dieser Verbindung reproduzierbar. Dies ist gerade für die Kontaktherstellung von HTS-Kabeln wesentlich, um eine gleichmäßige Stromverteilung in den einzelnen Bändern zu ermöglichen.

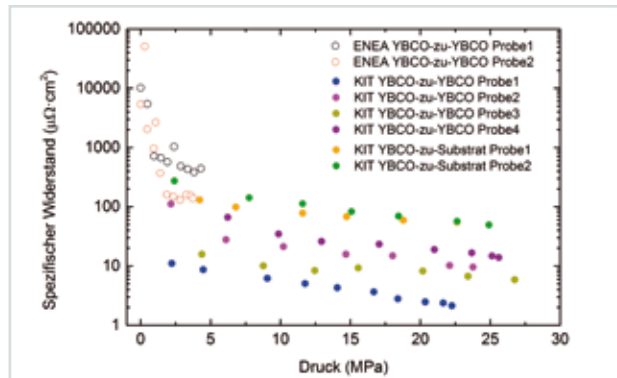


Abb. 9: Beispiel für den spezifischen Widerstand von mechanischen Band-Band-Kontakten als Funktion des Drucks für SuperPower Inc. Bänder (bei ENEA wurde ein maximaler Druck von etwa 5 MPa erreicht, bei KIT wurden die Messungen bis etwa 26 MPa erweitert).

Im Vergleich zu den gelöteten Verbindungen zeigen die mechanischen Kontakte einen spezifischen Widerstand, der zwei bis drei Größenordnungen höher liegt. Die Werte sind für beide Bandhersteller ähnlich.

#### Charakterisierung von HTS Bandstapeln

Das Cable in Conduit Konzept, basierend auf dem sogenannten Twisted Stacked Tape von ENEA, beinhaltet Stapel bestehend aus SuperPower Inc. oder SuNAM HTS-Bändern. Zur Modellierung der Temperaturverteilung im Kabel werden Daten der thermischen Leitfähigkeit dieser verlöteten oder losen Stapel benötigt. Mit Hilfe einer speziellen Vorrichtung war es möglich, die transversale thermische Leitfähigkeit zu messen.

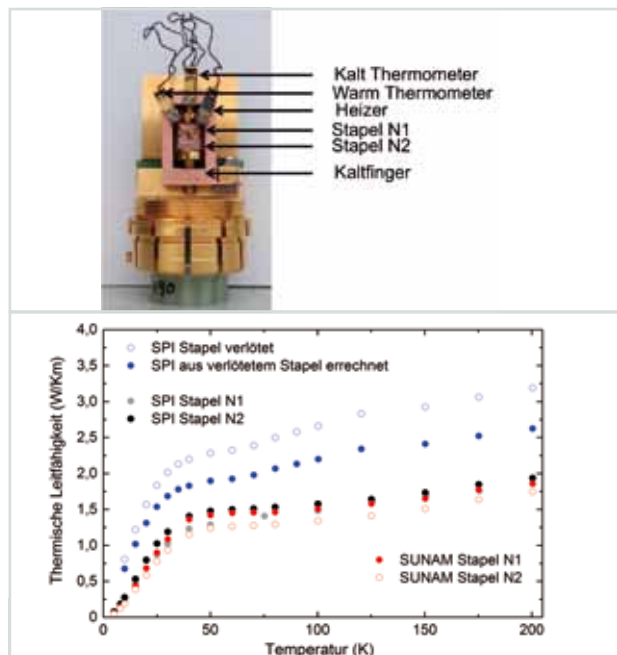


Abb. 10: Thermische Leitfähigkeit, gemessen mit der oben gezeigten Konfiguration: zwei Bandstapel mit Heizer in der Mitte und Kältefinger oben und unten.

### Highlight

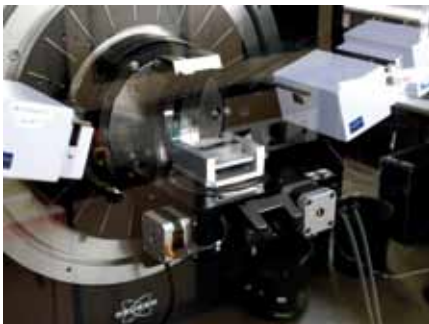
#### Helmholtz Energie Material Charakterisierungs-Plattform (HEMCP) in Betrieb

Um eine detaillierte Analyse von Materialien für Anwendungen in der Energietechnik zu ermöglichen, hat die Helmholtz-Gemeinschaft mit der Helmholtz Energie Material Charakterisierungs-Plattform (HEMCP) ein dezidiertes Förderprogramm eingerichtet. Das Gesamtbudget beträgt rund 40 Millionen Euro.

HEMCP bietet eine Infrastrukturplattform für die Entwicklung und Charakterisierung neuer Materialien in der Energietechnik. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung für Innovationen zur zukünftigen Energieversorgung und zum Umbau des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energien. Der Fokus von HEMCP liegt auf der Untersuchung von Funktionsmaterialien sowie Materialien für extreme Belastungen. Dazu wird die bestehende Geräteausstattung in den Helmholtz-Zentren strategisch verknüpft und systematisch ausgebaut. Das CryoMaK Labor warb zusammen mit dem Bereich SUPRA erfolgreich eine Finanzierung ein.

Für Strukturanalysen wurde ein BRUKER Röntgendiffraktometer angeschafft. Weiterhin wurde für thermische Untersuchungen eine Einrichtung zur Messung der Wärmekapazität installiert. Um die mechanischen Methoden zur Charakterisierung von Funktionsmaterialien zu erweitern, wurden ein Kerbschlag-Tester, ein Fallgewicht-Turm und eine 100 kN-Zugmaschine angeschafft. Alle Systeme wurden Anfang 2014 geliefert. Nach diversen Kalibrationen sind inzwischen alle Einrichtungen wie geplant in Betrieb. Zurzeit führt das Team Messungen mithilfe des Röntgendiffraktometers und der Wärmekapazitäts-Messeinrichtung an HTS-Bändern durch.

Erste Anfragen für mechanische Untersuchungen haben bereits das Institut für Angewandte Materialien (IAM) des KIT sowie die Yokohama Universität und NIMS (Japan) gestellt.



**Abb. 11:**  
**BRUKER**  
**Röntgendif-**  
**fraktometer.**



**Abb. 12:**  
**QUANTUM**  
**DESIGN**  
**Wärme-**  
**kapazitäts-**  
**option.**



**Abb. 13:** **GADALBINI** Kerbschlag Tester (links);  
**INSTRON** Fallgewicht-Turm (rechts).



**Abb. 14:**  
**MTS 100 kN-Zug-**  
**maschine.**

## Highlight Erstes HTS-Stromzuführungspaar für JT-60SA erfolgreich in CuLTKa getestet

Das ITEP hat die Aufgabe übernommen, die Stromzuführungen für den Satelliten-Tokamak JT-60SA zu liefern. Insgesamt werden sechs Stromzuführungen mit einem Betriebsstrom von 26 kA für die TF-Spulen und 20 Stromzuführungen mit einem Maximalstrom von 20 kA für die CS- und PF-Spulen des JT-60SA benötigt (siehe auch oben). Als Supraleitermaterial wird der Hochtemperatur-Supraleiter BiSCCO verwendet, wodurch die erforderliche Kälteleistung weitaus geringer ist.

Anfang November 2014 unterzog der Bereich Fusionsmagnete des ITEP die ersten beiden 26 kA-Stromzuführungen einem Abnahmetest unter Betriebsbedingungen. Dazu bauten die Mitarbeiter sie in einen Testkryostaten der neuen Anlage CuLTKa ein. Nach der Abkühlung über drei Tage erfolgte der Test nach Testplan. Abbildung 15 zeigt die Temperatur am warmen Ende des HTS-Moduls, die Heliumeintrittstemperatur in den Wärmetauscher bei einem Betriebsstrom von 25,7 kA für die beiden Stromzuführungen während des Sechsstunden Dauertests. Damit wurde ein stabiler Betrieb der Stromzuführungen demonstriert.

Abbildung 16 zeigt die gemessene Wärmelast am 4,5 K-Ende der Stromzuführungen ohne Betriebsstrom als Funktion des Temperaturgradienten über das HTS-Modul. Die Hintergrundverluste wurden zu ca. 2 W je Stromzuführung bestimmt, die Verluste durch die Stromzuführungen betragen für den nominellen Betriebszustand inklusive der durch den Vakuummantel hervorgerufenen Verluste etwa 3 W und stimmten damit sehr gut mit den Erwartungswerten überein.

Durch eine Massenstromabschaltung wurde eine Simulation des Verlusts der Kühlmittelströmung im Wärmetauscher bei einem Betriebsstrom von 25,7 kA durchgeführt. Dabei betrug die Zeit zwischen dem Abschalten des Kühlmittelstroms und einem Quench des HTS-Moduls ca. 15 Minuten, was weit über der in der Spezifikation geforderten Zeit von drei Minuten liegt.

Der elektrische Widerstand über die Klemmverbindungen zwischen dem kalten Ende der Stromzuführungen und den Kontakten des supraleitenden Verbindungsbügels ließ sich nicht exakt bestimmen, da er kleiner als  $1 \text{ n}\Omega$  war.

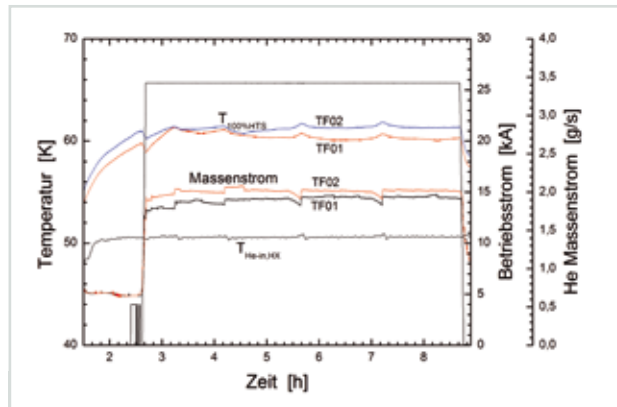


Abb. 15: Temperatur am warmen Ende des HTS-Moduls, Heliumeintrittstemperatur in den Wärmetauscher und Betriebsstrom für die beiden Stromzuführungen während des Sechsstunden-Dauertests.

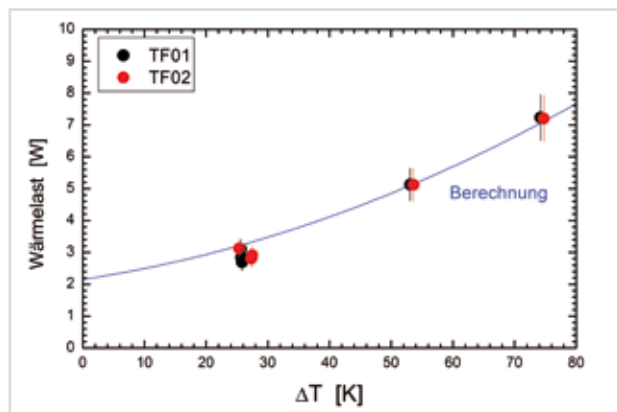
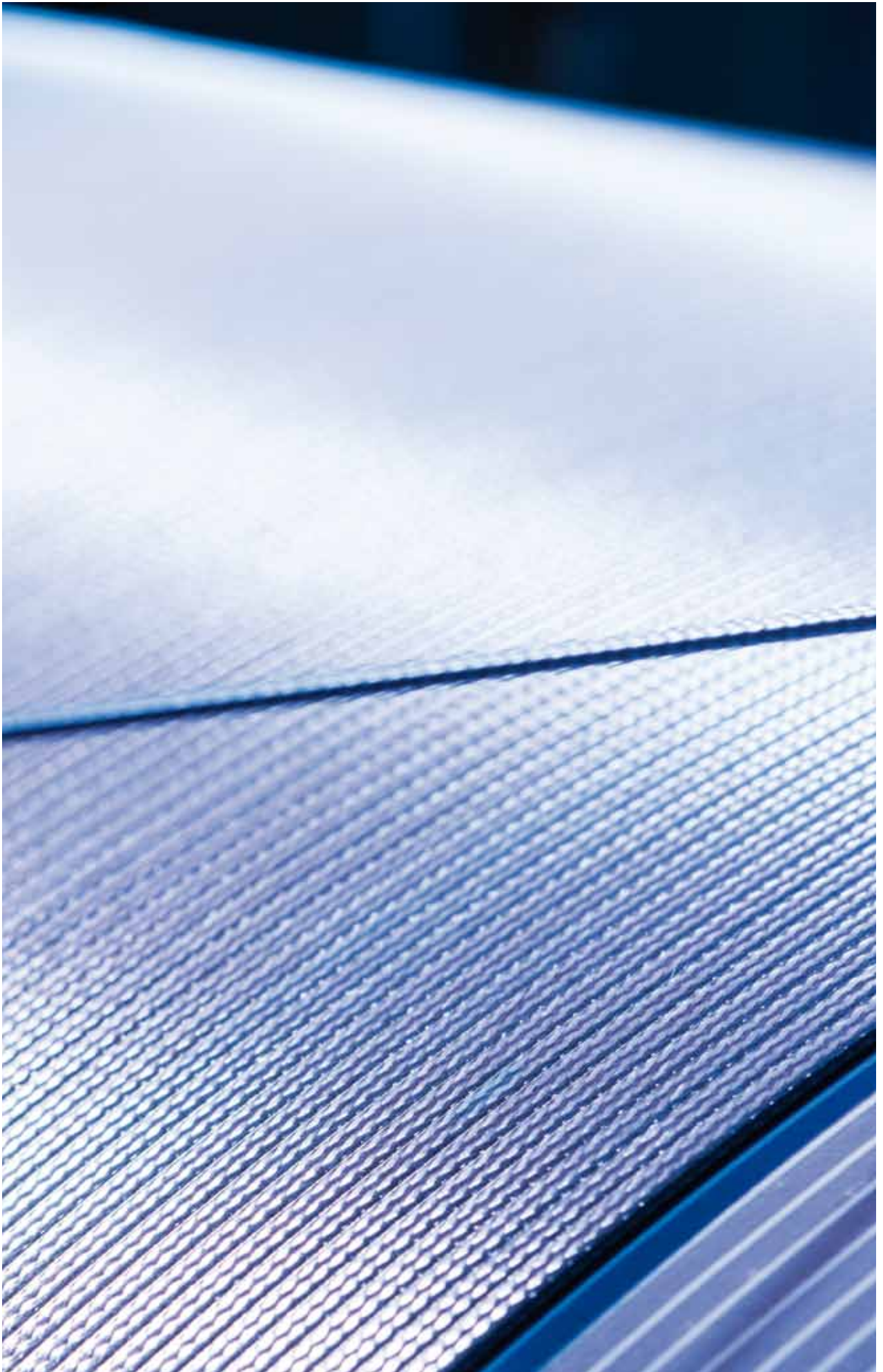


Abb. 16: Gemessene Wärmelast am 4,5 K-Ende der Stromzuführungen ohne Betriebsstrom als Funktion des Temperaturgradienten über das HTS-Modul und Vergleich mit den Rechenwerten.



Vorratsspule mit  $MgB_2$ -Supraleiter während der Wicklung eines mehrlagigen  $MgB_2$ -Solenoiden im Rahmen des EWI-LIQHYSMES Projekts.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleitende Hochfeldmagnete

Leitung: Dr. Theo Schneider

Der Bereich Supraleitende Hochfeldmagnete (HFM) des ITEP führte 2014 die Arbeiten zur Entwicklung von Hochtemperatur-Einsatzspulen mit kommerziellen REBCO-Bandleitern für Hochfeldmagnetsysteme mit Zentralfeldstärken im Bereich von 25 bis 30 T fort. Die Ergebnisse flossen in ein Magnetdesign für den Hochfeldausbau der HOMER II-Anlage und in die Entwicklung eines hochauflösenden 1 200 MHz-NMR-Spektrometers in Kooperation mit der Bruker BioSpin GmbH ein. Die Arbeiten in einem ergänzenden Projekt mit Bruker BioSpin zur Qualitätssicherung der NMR-Spektrometer mit Frequenzen von 800 bis 1000 MHz wurden vertragsgemäß durchgeführt. Der Bereich baute zusätzlich eine Wickelvorrichtung zur Fertigung von Race-track-Scheibenwicklungen auf, nahm ihn in Betrieb und führte erste Wicklungen durch. Die Arbeiten an supraleitenden Undulatoren wurden fortgesetzt. Als Highlight wurde der großvolumige  $MgB_2$ -Solenoid des LIQHYSMES-Projekts fertiggestellt und ersten Funktionstests in der Magnettestanlage MTA I unterzogen.

### Hochfeldmagnetentwicklung

#### Hochfeld-Einsatzspulen HOMER II

Das supraleitende Magnetsystem der HOMER II-Experimentieranlage besteht in seiner Grundkonfiguration aus ineinandergeschachtelten NbTi- und  $(NbX)3Sn$ -Spulen, die bei einer Temperatur von 1.8 K in einer frei zugänglichen Bohrung von 185 mm Durchmesser ein Magnetfeld einer Stärke von 20 T erzeugen. Der Ausbau der Anlage in einen Feldbereich von mehr als 25 T ist nur durch den Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) möglich. Die wismutbasierten Supraleiter der ersten Generation (1G) können nicht verwendet werden, da sie durch das in den Leiter eindringende superfluide 1.8 K-Helium (Ballooning) zerstört werden, wie durch den HFM-Test einer 1G-Einsatzspule im Jahr 2004 belegt wurde. Die Arbeiten konzentrieren sich daher auf eine Technologieentwicklung mit den REBCO-HTS-Leitern der zweiten Generation.

Der 2013 erfolgreich ausgeführte Bau und der Test einer kleinen REBCO-Solenoidspule, die im Hintergrundfeld von 20 T der HOMER I-Anlage ihr Designfeld von 1 T erreichte, sowie Tests an mehrlagigen Solenoiden unter hoher Lorentzkraftbelastung haben gezeigt, dass das Material prinzipiell für den Bau von Spulen mit einem Durchmesser von 180 mm geeignet ist. Da die REBCO-Leiter noch nicht in ausreichender Länge ohne normalleitende Verbindungen verfügbar sind und der Preis des Leiters überdurchschnittlich mit der Länge wächst, wählten die Wissenschaftler vorerst ein Doppelpancake-Design für die Einsatzspulen aus. Durch Variationen von Parametern wie Anzahl der Sektionen, Innen- und Außendurchmesser der Doppelpancakes, Magnetstrom und damit Zentralfeldstärke optimierten die Forscher

das Design. Weitere Randbedingungen waren die kommerziell verfügbaren Leiterlängen, die Kosten, das Anisotropieverhalten  $I_c(B, \Phi)$  der REBCO-Leiter und der Homogenitätsbereich des Zentralmagnetfelds.

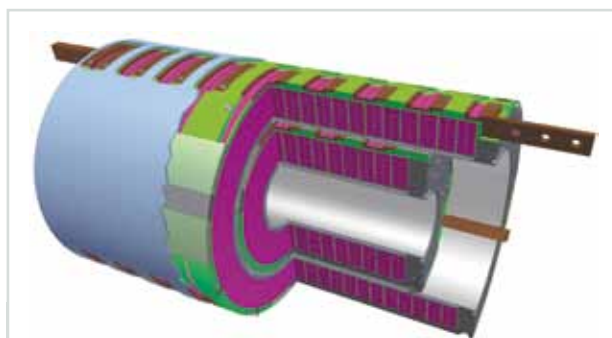


Abb. 1: Schematische Zeichnung der HTS-Einsatzspulen für HOMER II als Doppelpancake-Stapel.

Abbildung 1 zeigt eine schematische 3D-Darstellung der REBCO-Einsatzspulen. Zwei Doppelpancake-Stapel werden ineinandergeschachtelt mit 17 inneren und 24 äußeren Doppelpancakes. Zur elektrischen Verbindung der Doppelpancakes untereinander werden aufgrund der positiven Erfahrungen mit der ersten 1G-Einsatzspule Lötverbindungen mit Kupfer gefertigt, die den großen Lorentzkräften bei 20 T standhalten. Für die Einsatzspulen werden ungefähr 2,6 km REBCO-Leiter benötigt. Die Einsatzspulen erzeugen bei einem Magnetstrom von 145 A ein zusätzliches Magnetfeld von 5 T. In Abbildung 2 ist die Feldverteilung der Einsatzspulen dargestellt.

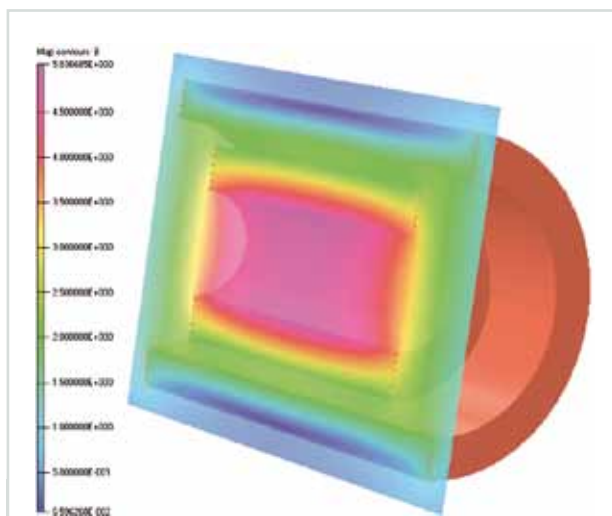


Abb. 2: Feldverteilung  $B(r, z)$  in der Mittelebene der HTS-Einsatzspulen bei Nominalstrom.

### 1200 MHz NMR-Projekt

Bruker BioSpin und der Bereich HFM des ITEP haben sich zum Ziel gesetzt, gemeinsam ein hochauflösendes 1200 MHz-NMR-Spektrometer zu entwickeln. Die Protonenresonanzfrequenz von 1200 MHz entspricht einer Zentralmagnetfeldstärke von 28,2 T - diese Feldstärke lässt sich nur mit Hochtemperatursupraleiter-Einsatzspulen realisieren.

Der Entwicklungsprozess der 2G REBCO-HTS-Leiter ist nicht abgeschlossen. Neue Firmen nehmen die Leiterproduktion auf; größere Produktionslinien werden in Betrieb genommen; neue Konzepte der Leiterherstellung werden verfolgt. Gleichzeitig arbeiten die Hersteller an der Verbesserung der REBCO-Schichtdicken, des Fluss-Pinnings und der Ic-Anisotropie für 77 K und Hochfeldanwendungen. Die Fertigung der REBCO-Bandleiter im Kilometermaßstab ist bis heute noch ungenügend.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt des Projektes ist daher die fortwährende Charakterisierung neuer verfügbarer REBCO-Bandleiter in den Anlagen des HFM-Bereichs. Im Vordergrund standen die Hochfeldeigenschaften der REBCO, ihr Anisotropieverhalten bei 4.2 K und hohen Magnetfeldern, sowie Untersuchungen zur Degradation durch superfluides Helium, Temperatur- und Kraftzyklen. Das Verhalten der REBCO in Bezug auf ihre Kraftbelastungen untersuchten die Wissenschaftler an speziellen Testobjekten, die den Anforderungen eines 1200 MHz-Einsatzmagneten angepasst wurden. Das HFM-Team hat die in 2014 anfallenden Arbeiten des Projektplans erfolgreich abgeschlossen.

### Kooperation – NMR-Magnettechnologie

Das ITEP-HFM und Bruker BioSpin entwickeln in einer seit 1985 laufenden Kooperation supraleitende Hochfeldmagnete für die hochauflösende NMR-Spektroskopie mit Protonenresonanzfrequenzen von 750 – 1000 MHz.

In ergänzenden Projekten zur NMR-Magnettechnologie unterstützt das HFM-Team seit mehr als 15 Jahren den Kooperationspartner durch flankierende Maßnahmen bei der Qualitätssicherung der supraleitenden Spulen und der weltweiten Markteinführung. Im Mittelpunkt steht die Charakterisierung und Qualifizierung kommerzieller technischer Tieftemperatur-Supraleiter durch hochauflösende E(I)-Messungen in den Experimentier-

anlagen JUMBO und HOMER I bei Magnetfeldstärken bis 20 T und Temperaturen von 4.2 K, 2.2 K und 1.8 K.

Die untersuchten Supraleiter unterscheiden sich in ihrem prinzipiellen Aufbau, in Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Abmessungen und physikalischen Eigenschaften, was eine Vielzahl von Testkonfigurationen erfordert. Neben den Supraleitern charakterisieren die Wissenschaftler auch die aus den Leitern hergestellten supraleitenden Verbindungen und optimieren ihre Restresistivität im pΩ-Bereich abhängig vom externen Magnetfeld und Transportstrom. Die Ergebnisse der Experimente und ihre Auswertung sind Kooperations-Know-how und unterliegen der absoluten Vertraulichkeit.

### Infrastruktur

#### Wartung, Ausbau und Modernisierung

Grundlegend für eine erfolgreiche Arbeit an den Projekten im Bereich HFM sind die Instandhaltung und Modernisierung der Experimentieranlagen JUMBO und HOMER I sowie die fortlaufende Integration von alten Anlagenkomponenten in das Prozessleitsystem. Diese Arbeiten sind eng auf die Projekte abzustimmen.

So schlossen die Mitarbeiter von HFM unter anderem die Umstellung der HOMER I-Heizungen auf eine kontinuierliche, prozessleitgesteuerte Regelung erfolgreich ab und integrierten diese in den Routinebetrieb (siehe Abbildung 3). Die Füllstands-Regelungen einzelner Heliumräume von HOMER I wurden in die MSR-Technik aufgenommen und mit WinCC visualisiert. Der Betrieb der Magnettestanlage MTA I wurde neu in die SPS-Steuerung Simatic S7 implementiert. Ventilsteuerung, Füllstandsregelung und Temperaturerfassung erfolgen nun über das Prozessleitsystem. Die Schnittstellen zur Steuerung über die 300 W-Anlage wurden an den Bereich Kryotechnik übergeben und in dessen WinCC-Visualisierung und Bedienoberfläche eingebunden. Ein erster Kalttest verlief zufriedenstellend, brachte jedoch Leckagen an den inzwischen 30 Jahre alten Ventilen zutage. Überprüfung, Reparatur und gleichzeitige Modernisierung der Ventile mit neuen, separaten Stellungsreglern sind inzwischen angelaufen.

Das Team hat zudem ein neues Heliumgas-Tableau an der JUMBO-Anlage installiert, mit dem der He-Abgas-



Abb. 3: Neue MSR-Steuerung der Heizungen der HOMER I-Anlage: links der Steuerschrank, rechts die Bedienoberfläche von WinCC.

strom der Testobjekte kontrolliert wird. So lassen sich neben der  $I_c(B)$ -Abhängigkeit auch die Parameter kritische Temperatur  $T_c$  und Restwiderstandverhältnis RRR technischer Supraleiter bestimmen, die zur Berechnung des Quenchverhaltens supraleitender Spulen notwendig sind.

Das Tableau ist so konzipiert, dass zum einen der Abgasstrom wie bisher manuell eingestellt werden kann. Zum anderen lässt sich über eine ergänzende programmgesteuerte Durchflussmessung -und -Regelung die Temperatur des Testobjekts im Heliumgasraum einstellen und variieren, wodurch  $T_c$  und RRR-Messungen möglich sind. Der gesamte Aufbau befindet sich derzeit noch in der Testphase.

### Spulentechnologie-Entwicklung

Supraleitende Spulen in Generatoren für Offshorewindparks oder in Magnetheizern für die metallverarbeitende Industrie besitzen hohe Potenziale zum Einsparen von Energie. Solche Spulen müssen als Scheibenwicklungen ausgeführt sein, beispielsweise in Form von Race-track-Spulen. Im Bereich HFM wurde dazu eine neue Wickelvorrichtung mit drehbarem horizontalem Wickeltisch aufgebaut. Mehrere Probewicklungen wurden mit Stahlband realisiert; das Verfahren wurde in mehreren Schritten optimiert. Zudem erarbeiteten die Wissenschaftler Lösungen für die mechanische Stabilisierung der Wicklungen auch unter großen Magnetkräften sowie zur Leitungskühlung durch Kleinkühler.

### Supraleitende Undulatoren

Das HFM unterstützt die Arbeiten von ANKA in einem vom BMBF geförderten Projekt (No. 05K12CK1) zur Entwicklung einer supraleitenden insertion device-Technologie für Synchrotron-Strahlungsquellen mit extrem kleiner Emittanz. Für einen neuartigen, leitungsgekühlten Prototyp-Undulator wurden erste Wicklungen mit niederfeld-optimierten NbTi-Rechteck-Supraleitern durchgeführt. Anhand der Testwicklungen wurden Optimierungsmöglichkeiten im Spulenkonzept gefunden. Das Team zeigte Verbesserungen auf und setzte diese konstruktiv um. Es finden zurzeit erste Testmessungen in der CASPER I-Anlage bei ANKA statt. Zur routinemäßigen Kontrolle der eingesetzten Hallsonden entwarf ANKA ein Helmholtz-Spulenpaar, dessen Wicklungen supraleitend ausgelegt sind. Nach mechanischen Verbesserungen an den Wickelkammern des Spulenkörpers wurden die Wicklungen des Helmholtz-Spulenpaars mit NbTi-Supraleitern fertig gestellt.

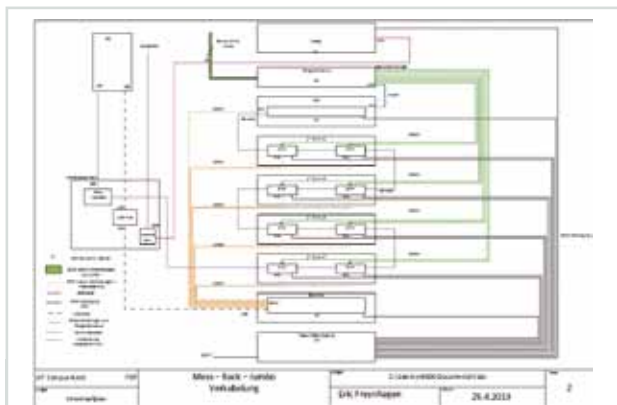


Abb. 4: Plan zur Kabelführung im neuen Geräterack der JUMBO-Experimentieranlage.

### Ausbildung

Der Bereich HFM des ITEP unterstützt DHBW-Studenten und Auszubildende gewerblich-technischer Berufe in ihren Praxisphasen. Bei der Ausbildung ist es notwendig, Aufgaben zu vergeben, die einerseits den Auszubildenden fordern und fördern, andererseits das Team bei seinen Projektarbeiten und Forschungsthemen unterstützen.

In der ersten Phase des Projekts eines DHBW-Studenten der Fachrichtung Elektrotechnik wurde die vorhandene Stickstoff-Füllstandsregelung der HOMER I-Experimentieranlage um eine zeitgesteuerte Regelung erweitert. Die technische Realisierung und der Funktionstest sind abgeschlossen. In der zweiten Phase soll ein neues, größeres Geräterack für die Messwerterfassung der JUMBO-Anlage aufgebaut werden. Diese Aufgabe umfasst unter anderem die Erstellung der Stücklisten zur Komponentenbeschaffung, die Erstellung der Aufbaupläne, Stromlauf und Kabelführungsplan (siehe Abbildung 4). Die Maßzeichnungen für die Werkstattarbeiten wurden gemeinsam mit den Konstrukteuren erstellt. Alle Bauteile sind vorhanden, sodass die abschließende Montage und der Aufbau an der JUMBO-Anlage in der nun bevorstehenden Praxisphase beginnen können.

Im Rahmen des LIQHYSMES-Projekts wurden einem Auszubildenden der Fachrichtung Technischer Produktdesigner unter anderem die Arbeiten zum Einbau der  $MgB_2$ -Solenoidspule in die Magnettestanlage MTA I sowie die Konstruktion der Stromzuführungen der Spule für den Endkryostaten übertragen. Die Fertigungszeichnungen der Stromzuführungen wurden an die Verbundwerkstatt übergeben. Abbildung 5 zeigt die 3D-Konzeptzeichnung des  $MgB_2$ -Spuleneinbaus in MTA I; in Abbildung 7 ist der reale Einbau zu sehen. Außerdem konstruierte der Auszubildende eine neue Stromzuführung für das Magnetsystem der JUMBO-Anlage und stellte sie in einer Arbeitsprobe der Abteilung Personalentwicklung und Berufliche Ausbildung vor.

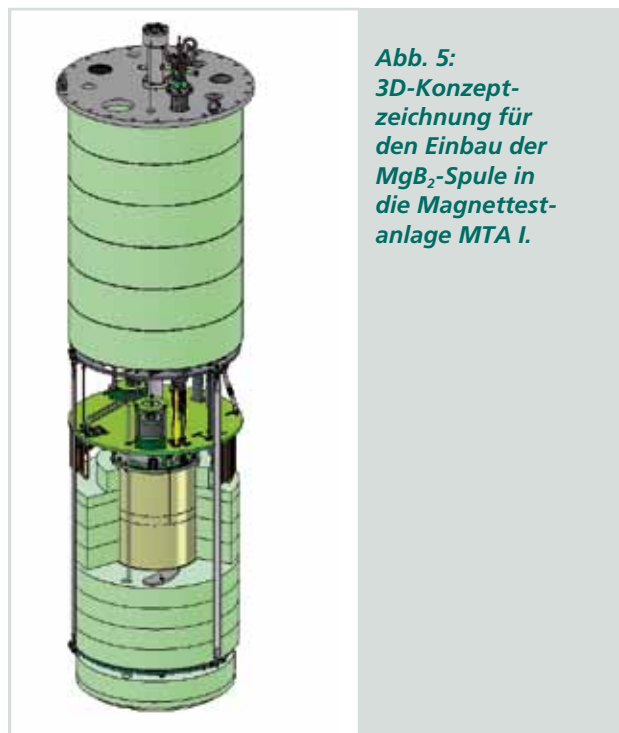


Abb. 5: 3D-Konzeptzeichnung für den Einbau der  $MgB_2$ -Spule in die Magnettestanlage MTA I.

## Highlight LIQHYSMES-Projekt: MgB<sub>2</sub>-Solenoïd – Fertigung und Test

Im Gedenken an Dr. Michael Sander  
(† 01.05.2014)

Das Projekt LIQHYSMES (LIQuid HYdrogen & SMES) bietet einen Lösungsansatz zum Ausgleichen von Einspeise- und Lastschwankungen im Stromnetz, die durch fluktuierende regenerative Energiequellen bedingt sind. Bei LIQHYSMES handelt es sich um ein Hybridspeicherkonzept, das eine Langzeitspeicherung der Energie in flüssigem Wasserstoff und eine Kurzzeitspeicherung mithilfe eines supraleitenden Energiespeichers SMES kombiniert. Der flüssige Wasserstoff dient zusätzlich als Kühlmittel für den SMES. Die supraleitenden Spulen des SMES werden mit MgB<sub>2</sub>-Supraleitern gefertigt.

Ein Ziel des von der Wasserstoffinitiative EWI geförderten Projekts ist, das Funktionsprinzip an einem Demonstrator zu zeigen. Der Bereich Kryotechnik des ITEP ist mit den Arbeiten zum Wärmeübertrager und zum Kryostaten betraut, die Wasserstoffgruppe des IKET mit allen Aspekten des Umgangs mit flüssigem Wasserstoff, der Bereich HFM des ITEP mit der Magnetspulentechnik und der Magnetstromsteuerung.

Die Spule des Demonstrators wurde mit einem kommerziellen MgB<sub>2</sub>-Leiter der Firma Columbus Superconductors (Italien) im Technikum des Bereichs HFM (siehe Abbildung 6) gefertigt. Dazu stand ein 1 km langes MgB<sub>2</sub>-Leiterstück zur Verfügung, das mehrlagig als So-

lenoid verwickelt wurde. Die Spule hat einen Außendurchmesser von ca. 390 mm und eine Gesamthöhe von 490 mm. Die Wicklung wird durch eine Bandage und einen Doppelverguss geschützt. Zur Quenchedetektion wurde eine zusätzliche Kompensationswicklung angebracht. Da der Endkryostat und die Wärmetauscher für den Wasserstoffbetrieb noch nicht fertiggestellt sind, wurde für den MgB<sub>2</sub>-Spulentest die Magnettestanlage MTA I des Hochfeldlabors in Betrieb genommen. Die MTA I-Anlage ist für Magnetsysteme bis zu einem Durchmesser von etwa 800 mm konzipiert und wird bei 4.2 K und 2.2 K betrieben.

Um aus Gründen der Wirtschaftlichkeit das Heliumvolumen beim Test der MgB<sub>2</sub>-Spule zu reduzieren, wurden spezielle Verdrängungskörper aus Styrodur angepasst. Abbildung 7 zeigt die Montage der Spule am Magnetflansch der MTA I-Anlage mit den unteren Verdrängungskörpern (vergleiche auch Abbildung 5).

Durch die Einspeisefluktuationen werden die SMES-Spulen im Betrieb variablen Lade- und Entladezyklen mit unterschiedlichen Frequenzen unterworfen sein. Zur Simulation dieser Betriebsart wurde ein Vierquadranten-Netzgerät mit einem maximalen Strom von  $\pm 250$  A und  $\pm 20$  V bestellt, das im Frühjahr 2015 geliefert werden wird.

In einem ersten Funktionstest in der MTA I führten die Wissenschaftler den Spulenabgleich zur Quenchedetektion durch. Die MgB<sub>2</sub>-Spule wurde mit einem vorhandenen Netzgerät bis zu einem Magnetstrom von etwa 30 % des späteren Betriebsstroms variabler Frequenzen (Abbildung 8) getestet.



Abb. 6: Fertigung der MgB<sub>2</sub>-Solenoïdspule im Technikum des Bereichs HFM.



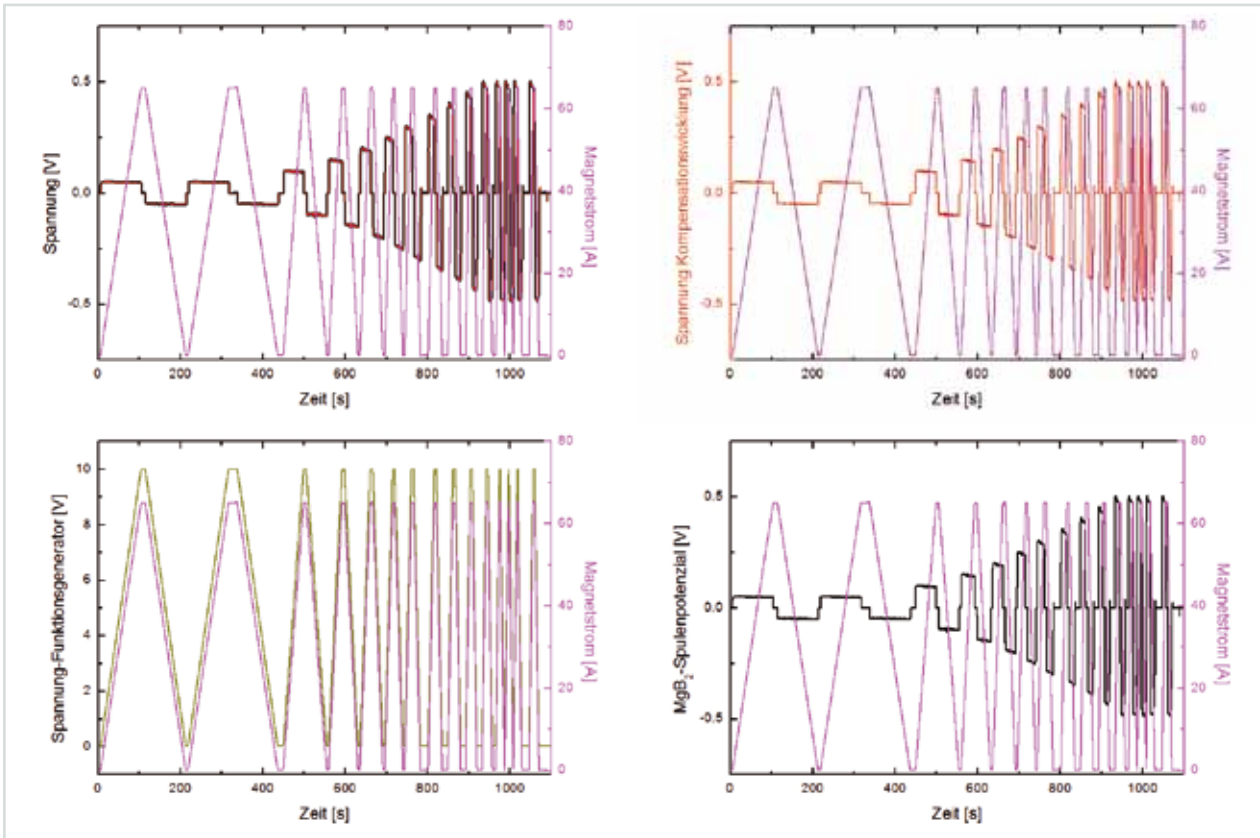


Abb. 8: Verhalten der MgB<sub>2</sub>-EWI-Solenoidspule unter dreiecksförmiger Strombelastung ansteigender Frequenz im Bereich von 0 A bis 65 A.

Um die Grenzen für den Endtest der Spule in der Magnettestanlage MTA I auszuloten, untersuchte das HFM-Team parallel zur Fertigung der großvolumigen MgB<sub>2</sub>-Solenoidspule die  $I_c(B, T)$ -Charakteristik des MgB<sub>2</sub>-Supraleiters. Messungen mit dem Dreifach-Spulensatz in HOMER I zeigten eindeutig die Degradation des MgB<sub>2</sub>-Leiters bei Unterschreiten eines kritischen Wickeldurchmessers. Mit weiteren Messungen unterhalb 4.2 K wurde die Temperaturabhängigkeit für spätere Extrapolationen und Vergleiche mit Literaturangaben untersucht. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse.

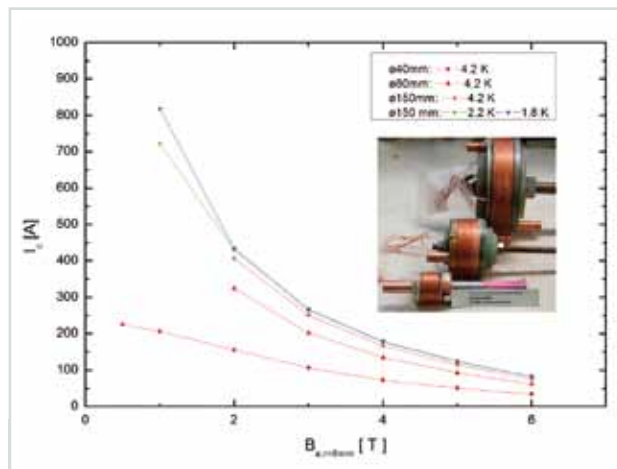
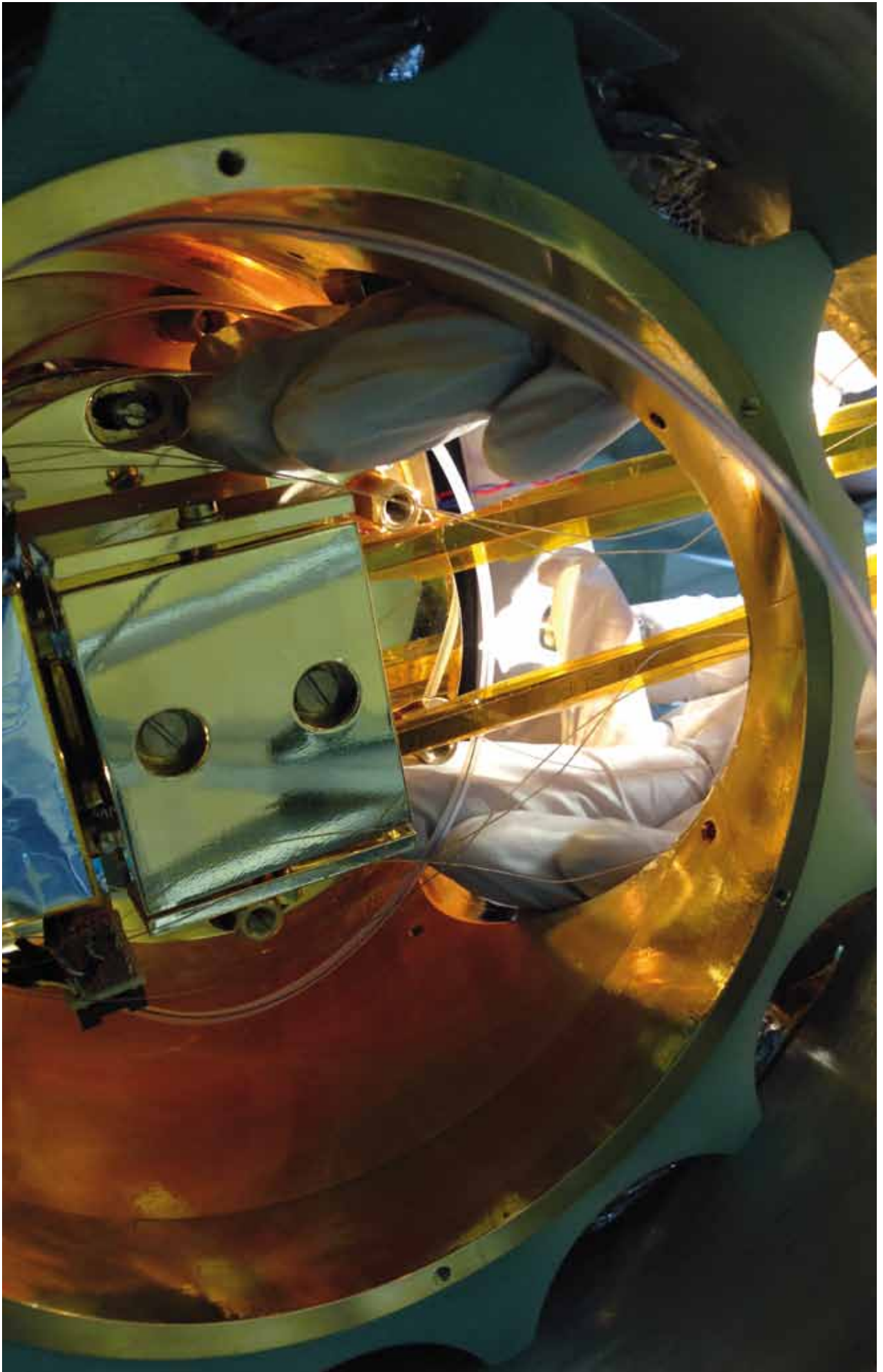


Abb. 9:  $I_c(B)$ -Charakteristik des MgB<sub>2</sub>-Supraleiters in Abhängigkeit von Wickeldurchmesser und Temperatur.



Blick in den COMBIT-HTS-Magneten

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleitende Materialien und Energieanwendungen

Leitung: Dr. Wilfried Goldacker

Die Supraleiterentwicklung am ITEP konzentrierte sich im Jahr 2014 auf die Fortentwicklung wechselstromverlustarmer Kabel aus REBCO-Bandleitern. Dabei verfolgten die Forscher verschiedene Ziele. Bandleiter mit einer Filamentstruktur in der Supraleiterschicht stellen eine Variante dar, die bei geeigneten Kabelstrukturen zu einer Reduktion der Wechselstromverluste führt. Die mithilfe eines Lasers angebrachte Filamentierung wurde nun auf Roebel-Kabel und den sogenannten CORC-Kabeln angebracht; die Effekte auf die Verluste wurden vermessen. Das HTS-Roebel-Kabel, eine Innovation des ITEP, wurde als Beitrag zum EU-Projekt EUcard2 weiterentwickelt, und zwar speziell ausgerichtet auf die Anwendung als Einsatzspule für die LHC-Dipole im Beschleunigerring des CERN. Das Konzept eines Rutherford-Kabels mit Strands aus Roebel-Leitern zur Anwendung in zukünftigen Fusionsmagneten wurde revidiert. Dazu wurde ein erstes supraleitendes Kabel mit nun rundem Querschnitt und 1.4 m Länge erfolgreich realisiert und vermessen. Rutherford-Kabel sind ein allgemeines Konzept für sehr große Magnete, wie sie beispielsweise in Fusionsanlagen eingesetzt werden.

Zu den Arbeiten des ITEP für Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung (HTS) gehörten die abschließenden Forschungsarbeiten an einem Modell zum HTS-Energiekabel des Projekts AMPACITY in Essen. Was HTS-Strombegrenzer betrifft, wurde die Entwicklung eines induktiv angekoppelten Strombegrenzers mit dem fertigen Demonstrator und den Messungen zur strombegrenzenden Funktion abgeschlossen. Ein thematisch daran anschließendes Projekt mit der Industrie wurde vorbereitet und begonnen. Ein leitungsgekühlter HTS-Magnet aus YBCO-Bandleitern der Fünf-Tesla-Klasse wurde durch ausführliche Tests im Testfeld für seinen Einsatz in einem Plasmakanal qualifiziert. Der Magnet wurde an seinen Einsatzort bei der DLR in Porz gebracht, in den Plasmakanal implementiert und erfolgreich für erste Experimente in Betrieb genommen.

### Strukturierte REBCO-Bandleiter

Die Anbringung einer Filamentstruktur an REBCO-Leitern ist für eine weitere beträchtliche Reduktion der AC-Verluste in geeigneten Leiteranordnungen entscheidend. Das ITEP setzt bereits seit einiger Zeit ein Strukturierungsverfahren mit einem Piko-Sekunden-YAG-Laser ein; dies hat sich als am besten geeignetes Verfahren erwiesen. Allerdings schlägt sich das verdampfte Material zu einem geringen Anteil zwischen den Filamenten nieder und verursacht eine unerwünschte schwache elektrische Kopplung. Um eine vollständige Entkopplung der Filamente zu erreichen, behandelte das Team die Leiter mit einer Glühbehandlung in Sauerstoff erfolgreich nach. Bis zu 120 Filamente von ca. 80 µm Breite wurden in eine Leiterbreite von 12 mm gebrannt (Abbildung 1); die damit verbun-

dene erfolgreiche Reduktion der Wechselstromverluste wurde nachgewiesen (Abbildung 2).



Abb. 1: Lasergebrannte Filamentstrukturen in REBCO-Leitern mit zehn bis 120 Filamenten auf 12 mm Bandbreite.

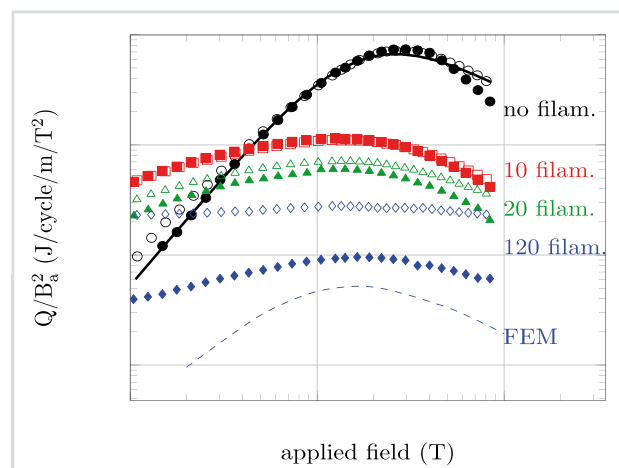
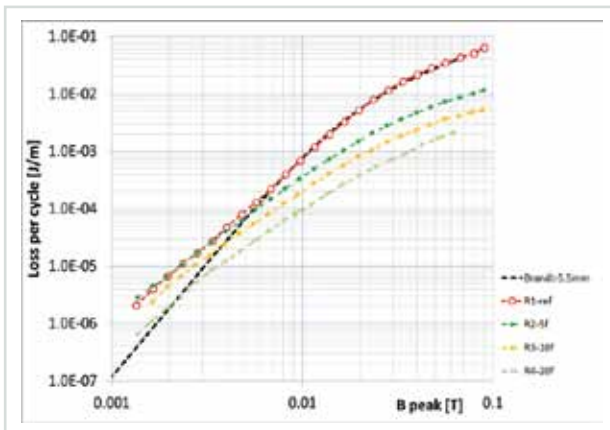


Abb. 2: Reduktion der Wechselstromverluste mit der Anzahl der Filamente in REBCO-Bandleitern.

Eine Strukturierung der Strands von Roebel-Kabeln mit fünf bis 20 Filamenten wurde ebenfalls realisiert (Abbildung 3). Die Skalierung der Reduktion der Wechselstromverluste mit der Zahl der Filamente der Strands ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Strands wurden anschließend zu Kabeln verseilt und für künftige Verlustmessungen konditioniert. Die Verluste werden mit angelegten Wechselmagnetfeldern, Transportwechselstromverlustmessungen und einer kalorimetrischen Variante gemessen.



Abb. 3: Strand eines Roebel-Leiters mit Filamentstruktur. Breite des Bands 5,5 mm.



**Abb. 4: Reduktion der Wechselstromverluste von Roebel-Strands mit der Anzahl der Filamente.**

Zur Entwicklung eines Mikro-Undulatorsystems auf der Basis von HTS-Bändern werden Leiter so strukturiert, dass die supraleitende Schicht periodisch von beiden Seiten entlang des Leiters eingeschlitzt wird. Das durch einen Transportstrom erzeugte Feld entlang des Leiters hat einen sinusähnlichen Verlauf. Um das Magnetfeld zu erhöhen, soll als nächster Schritt eine Stack-Anordnung mehrerer Leiter mit identischer Struktur eingesetzt werden. Eine Herausforderung besteht in der Herstellung eines Leiters mit mehrfacher Wiederholung der eingebrannten Struktur und im exakten Aufeinanderlegen der Leiterstücke zu einer Stack-Anordnung, um den Strom zu erhöhen. Wie in Abbildung 5 zu sehen, wurden



**Abb. 5: Stahlbandprobe mit Laserstruktur eines Mikro-Undulators für Stapelanordnung zur Stromerhöhung. Die Löcher dienen zur Justage.**

die entsprechenden Strukturen an einem Dummy mit einer Länge von 14 m angebracht. Zur exakten Ausrichtung der einzelnen Segmente übereinander dienen die ebenfalls mit dem Laser gebrannten Justagelöcher für die Aufnahme des Bands in Montagestiften.

### HTS-Wechselstromleiter und Kabel für Windungen/Magnete

Roebel-Kabel aus REBCO-Bandleitern, eine Innovation des ITEP, sind unter den wenigen verfügbaren technischen Konzepten der aussichtsreichste Kandidat für verlustarme AC-Hochstromkabel zur Anwendung in Wicklungen. Dies ist folgenden Eigenschaften zu verdanken:

- Volle Transposition der Strands für geringe Wechselstromverluste
- Hervorragendes Biegeverhalten bei sehr kleinen Radien im Bereich von wenigen Zentimetern
- Flexible Kabelkonfiguration für eine breite Anwendungsvielfalt in Bezug auf Geometrie, Stromtragvermögen, Stabilisierung und Verluste

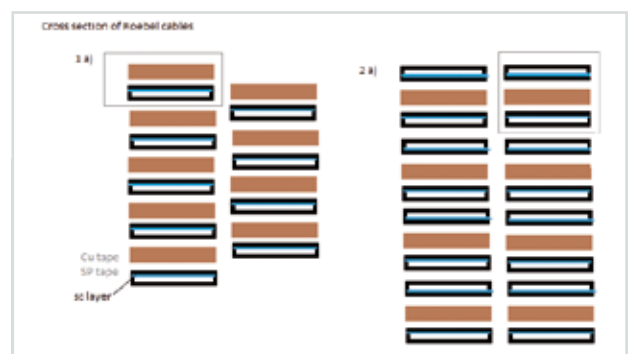
Ein lebhaftes Interesse an diesen Kabeln besteht für Anwendungen bei Temperaturen zwischen 4 K (flüssiges Helium) und 77 K (flüssiger Stickstoff) und zum Teil hohen Hintergrundfeldern (bis zu 20 T in Dipolmagneten für Upgrade des LHC im CERN, bei moderaten Feldern in Transformatoren und rotierenden Maschinen). Forscher am ITEP fertigen derzeit zu Entwicklungs- und Testzwecken 2 bis 6 m lange Roebel-Kabel und bis zu 20 m lange Dummy-Kabel aus Edelstahlband für Wicklungsversuche an, um einerseits das Verhalten bei tiefen



**Abb. 6: Edelstahl-Roebel-Leiter als Dummy mit Originalabmessungen für Wickelversuche mit Einsatzspulen der LHC-Dipolmagnete des CERN.**

Temperaturen im Hintergrundfeld zu messen (FRESCA-Anlage im CERN, 4.2 K, 0 T bis 10 T), andererseits Eigenschaften der Kabel bei der Anwendung in Racetrack-Wicklungen (Wickelverhalten) systematisch zu untersuchen (siehe Abbildung 6). Wichtig sind dabei die bisherigen Erfahrungswerte bei Pancake- und Lagenwicklung (siehe Abschnitt Modellierung und Jahresbericht 2013).

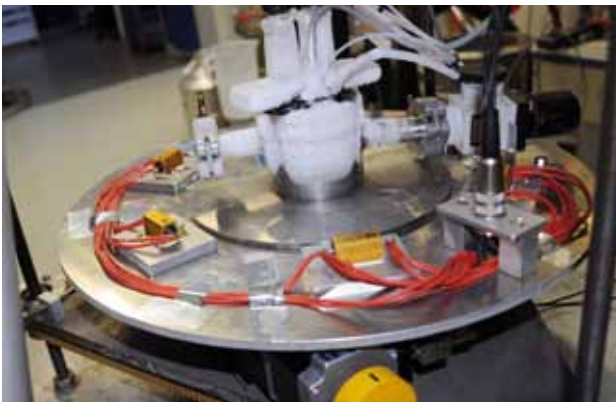
Roebel-Kabel, die bei einer Temperatur von 4.2 K eingesetzt wurden, zeigten einen gegenüber der Temperatur von 77 K um den Faktor elf bis zwölf erhöhten Transportstrom von bis zu 14 000 A (Messungen an ITEP-Kabeln am CERN). Daher ist eine verbesserte thermische Stabilisierung des Kabels unerlässlich. Standardkabel des ITEP mit zehn Strands von 5,5 mm Breite wurden dazu in



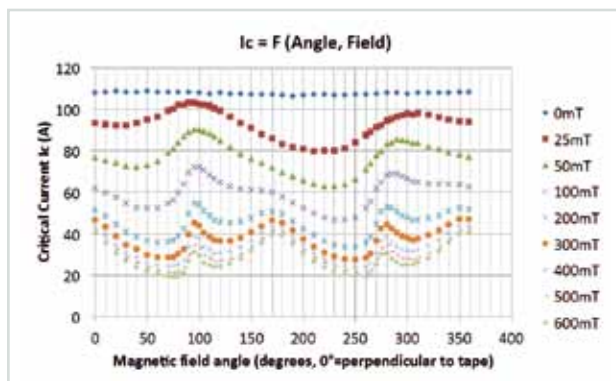
**Abb. 7: Externe Stabilisierung von Roebel-Strands im Kabel durch zusätzliche Kupferstrands. Realisiert wurden zwei Anordnungen mit einem Kupferstrand bzw. zwei Kupferstrands in Kontakt zu den supraleitenden Strands.**

zwei Varianten durch Kupferstrands ergänzt: in der ersten Variante mit einem Kupferstrand je Strand, in der zweiten Variante mit zwei Kupferstrands von unten und oben als Sandwich mit dem Supraleiterband (Abbildung 7). Diese Kabelmodifikationen verbesserten das Verhalten der Supraleiterströme deutlich: Höhere Stromdichten wurden erreicht, und die Leiter verhielten sich signifikant stabiler.

Zur Messung der Stromanisotropie im äußeren Magnetfeld bauten die Wissenschaftler des ITEP eine vollautomatische Messvorrichtung auf. Diese steuert das Feld bis zu Werten von 600 mT, rotiert die Probe in wählbaren Winkelschritten und bestimmt den Transportstrom. Abbildung 8 zeigt die Apparatur, Abbildung 9 eine Serie von Messkurven. Die starke Änderung des Kurvenverlaufs für verschiedene Hintergründfelder belegt die Wichtigkeit dieser Information: Diese geht direkt in den Datensatz von Modellrechnungen ein und bestimmt das erreichbare Feld von Wicklungen.



**Abb. 8:** Automatisiertes Testfeld für orientierungsabhängige Messungen des kritischen Stroms im Magnetfeld < 600 mT.



**Abb. 9:** Kritischer Strom als Funktion der Orientierung in einem Magnetfeld für verschiedene Felder. Die Messung erfolgte vollautomatisch in der Anlage von Abbildung 8.

### HTS-Kabel für Fusionsmagnete

Das revidierte Konzept eines Rutherford-Kabels mit HTS-Roebel-Strands, ein Kandidat für zukünftige Fusionsmagnete, funktionierte erfolgreich. Dazu wurde ein 1,4 m

langes Kabelstück in dem neuen Design mit rundem Querschnitt mit 2.6 kA Transportstrom realisiert (siehe Highlight). Das Rutherford-Konzept bietet zusätzlich eine verstärkende Außenhülle und einen zentralen Kühlkanal. Auch eine Stromerhöhung ist flexibel über eine Änderung der Zusammensetzung der Strands möglich.

### Supraleitende Fehlerstrombegrenzer (SSB)

Die Arbeiten zu Fehlerstrombegrenzern konzentrierten sich auf die Entwicklung eines induktiv angekoppelten supraleitenden Strombegrenzers (siehe Abbildung 10). Sie wurde 2014 mit Power-in-the-Loop-Untersuchungen abgeschlossen. Zur Anwendung und Entwicklung dieses Konzepts startete eine Industriekooperation.



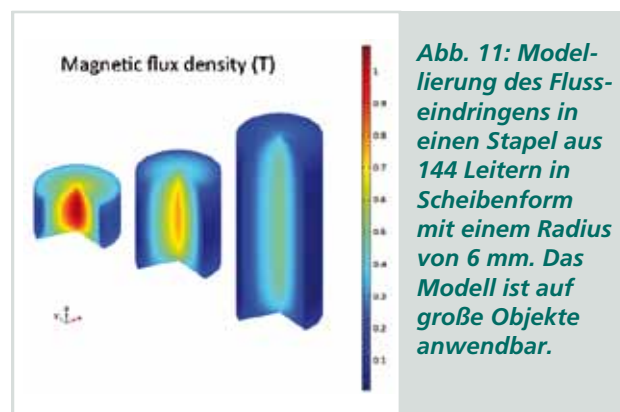
**Abb. 10:** Funktionsmodell eines induktiv gekoppelten supraleitenden Strombegrenzers.

### Numerische Modellierung von HTS-Kabeln und -Komponenten

Das Team am ITEP erstellte ein fortgeschrittenes 2D-3D-Hybridmodell zur Simulation von AC- und DC-Eigenschaften von Kabeln und Wicklungen, das die Daten der Strom-anisotropie der Roebel-Wicklung berücksichtigt. Insbesondere wurden Pancake-Wicklungen aus Roebel-Kabeln für den DC-Fall modelliert, wobei theoretische und experimentelle Daten ausgezeichnet übereinstimmen. Im Besonderen wurde eine 3D-Modellierung der Kontakte entwickelt und in das Modell integriert (Abbildung 11).

### Supraleiter in der Weltraumforschung

Für ein Experiment im Plasmakanal des DLR realisierte das ITEP innerhalb eines HGF-Vorhabens (COMBIT) einen HTS-Magneten, um die Wechselwirkung zwischen Plasma und dem Magnetfeld zu untersuchen. Das Magnetensystem besteht aus fünf Doppelpancake-Spulen aus 4 mm breiten REBCO-Bandleitern, die mit einer speziellen niederohmigen Kontaktierungsmethode seriell verbunden sind. Der Magnet wurde getestet und am DLR in Betrieb genommen. Dort erreichte er das vorgesehene Feld von 2 T in der Plasmaflamme (siehe Highlight).



**Abb. 11:** Modellierung des Flusseindringens in einen Stapel aus 144 Leitern in Scheibenform mit einem Radius von 6 mm. Das Modell ist auf große Objekte anwendbar.

### Highlight 1 Roebel-Kabel für Dipolmagnete im EU-Projekt EUCard2

Mit der Entwicklung der Roebel-Kabel für das Projekt EUCard2 verfolgt das KIT mehrere Ziele:

- Untersuchung der industriellen Leiter auf ihre Eignung zur Roebel-Anfertigung
- Erhöhung der Stromdichten im Kabel für ein möglichst großes Magnetfeld in der angestrebten Magnetwicklung durch Designoptimierung und Materialänderung
- Optimierung des Kabeldesigns in Bezug auf die Transpositionslänge und die Möglichkeit, das Kabel in einer Racetrack-Anordnung zu wickeln
- Umsetzung des Prozesses auf Längen bis zu 50 m
- Herstellung von Dummy-Kabelvarianten für Wicklungsversuche zur Verifizierung des Magnetdesigns von CERN und CEA
- Entwicklung einer Imprägnierung für das Kabel, um transversale Druckspannungen der Lorentzkräfte abzufangen

Roebel-Kabel stellen hohe Anforderungen an die Qualität der Bandleiter: Sie verlangen eine gleichmäßige und homogene Stromtragfähigkeit und die Vermeidung von Defekten im Supraleiter. Der Stanzvorgang in die meanderförmige Roebel-Struktur erfordert zusätzlich einen mechanisch stabilen Schichtaufbau des Leiters, um eine Delamination der Beschichtung zu vermeiden. Zudem muss der Leiterproduzent Stücklängen von 50 m anbieten können.

Das Team am ITEP führte die Eignungstests auf der Basis von zwei verschiedenen Industrieleitern durch, nämlich Bandleitern von SuperPower und SuperOX. Die Leiter sind nach verschiedenen Verfahren hergestellt und unterscheiden sich im Wesentlichen im Schichtaufbau und in der Banddicke (ca. 94  $\mu\text{m}$  und 140  $\mu\text{m}$ ). Beide Leiter ließen sich in der Stanzanlage ohne Delaminationerscheinungen bearbeiten und qualifizierten sich damit für den Stanzprozess.

Für den Eignungstest in einem Roebel-Kabel wurden von beiden Materialien je drei verschiedene Transpositions-längen gestanzt, 226 mm, 326 mm und 426 mm (Abbildung 12). Die entsprechenden Probenlängen orientierten sich daran und lagen zwischen ca. 0,5 und 1 m. Für ein dicht verseiltes Roebel-Kabel ergaben sich respektive zehn, 17 und 31 Strands.

Generell ergab das Material von SuperOx etwas höhere Stromdichten (Abbildung 13). Die Probe mit der längsten Transpositionslänge und 31 Strands zeigte bei 77 K



Abb. 12: Sechs Roebel-Leiter mit Transpositions-längen von 126 mm, 226 mm und 426 mm aus Bandleitern von SuperPower und SuperOX.

im Eigenfeld einen Transportstrom von 2.75 kA. Dies ist der bis jetzt höchste in einem HTS-Roebel-Kabel gemessene Strom. Das Ergebnis beweist, dass der Parameter Transpositions-länge ein potenter Faktor ist, um die Stromtragfähigkeit des Roebel-Kabels auf die Anwendungen abzustimmen. Die Kabel des KIT sind dicht gepackte Strukturen, wie Abbildung 14 zeigt.

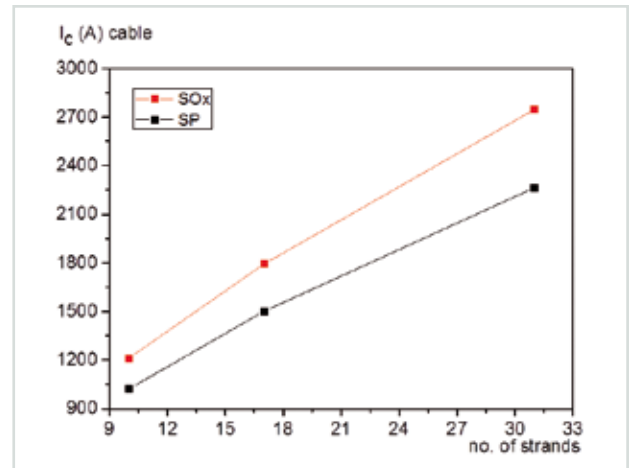


Abb. 13: Transportströme der Roebel-Leiter der Abbildung 12.



Abb. 14: Verseilbild der Roebel-Kabel.

Für die Wicklungsversuche bei den Projektpartnern CERN und CEA-Saclay wurden aus Stahlbändern bis zu 20 m lange Roebel-Kabel für zwei konkurrierende Magnetdesigns hergestellt. Wicklungsversuche sind notwendig, um auftretende Spannungen zu verifizieren und das Kabel und den Herstellungsprozess entsprechend zu modifizieren.

Als experimenteller Beitrag zum Biegeverhalten des supraleitenden Roebel-Kabels wurde der Einfluss verschiedener Biegeradien auf den Transportstrom untersucht. Die Messungen zeigten keine Degradationen des Stroms. Je nach Anforderung lässt sich der Transportstrom des Kabels durch Mehrfachstrands und verlängerte Transposition um ein Mehrfaches erhöhen.

### Highlight 2 HTS-Magnet für Hochenthalpie-Windkanal L2K des DLR

Im Rahmen des HGF-Projekts COMBIT (Communication Blackout Mitigation for Spacecrafts) mit dem DLR und dem IOFFE-Institut in St. Petersburg (Russland) war ein möglichst hohes Magnetfeld gefordert mit einem kompakten Magnetdesign, wie es nur mit supraleitender Technik zu erreichen ist. Als besondere Randbedingung sollte das System kompakt und mit ca. 100 mm Durchmesser an die Dimensionen der Plasmaflamme angepasst sein. Es sollte die Außentemperaturen einer Plasmaflamme aushalten (bis ca. 150  $^{\circ}\text{C}$ ) und im Grobvakuum des Hochenthalpie-Windkanals L2K der DLR betreibbar sein. Um am Ort der Flamme ein möglichst hohes Magnetfeld zu erreichen, galt es, die Wandstärke des Kryostaten auf der Stirnseite des Magneten zu mi-

nimieren. Letztendlich wurden 7 mm Distanz zwischen dem Magnetwickelpaket und der Kryostat-Außenwand realisiert, gleichbedeutend mit einem Temperaturunterschied bis zu ca. 450 K über diese Distanz. Das Gehäuse wurde aktiv über Kühlkanäle geschützt. Das Magnetdesign ergab ein sicher erreichbares Streufeld an der Kryostat-Außenwand von 2 T, äquivalent zu 4.8 T an der Magnetwicklung.

Der Magnet wurde auf der Basis von kommerziellen REBCO-Hochtemperatur-Supraleitern der Firma SuperPower mit fünf seriell geschalteten Doppelpancake-Wicklungen hergestellt. Die Wicklungen wurden auf einem vergoldeten Spulenkörper angebracht, der den Strahlungsverlust reduziert, und zur Stabilisierung mit Bienenwachs vergossen. Die Kühlung wurde mit einem speziell modifizierten Kryokühler des Herstellers Cryomak als Wärmeleitungskühlung realisiert. Um einen aufrechten Betrieb des Kühlers und einen waagerechten Betrieb des Magneten zu ermöglichen, war eine Winkelkonstruktion erforderlich (siehe Abbildung 15). Zur weiteren Reduktion des Wärmeeintrags wurden Stromzuführungen aus Hochtemperatur-Supraleitern eingesetzt und thermisch an die Magnetaufhängung angekoppelt. Abbildung 16 zeigt den geöffneten Kryostaten mit Blick auf den Magneten im Hintergrund. In Abbildung 17 ist der Magnet vor dem Einbau komplett montiert auf der Wärmetrans-

ferplatte zu sehen. Die Erregung des Magneten bis zu seinem Endfeld ist im Spannungs- und Stromverlauf in Abbildung 18 dargestellt.

Der erfolgreiche Einbau und die Inbetriebnahme erlaubte erste Experimente im Plasma. Die geplante Feldstärke von 2 T wurde auch im Experimentierbetrieb erreicht.

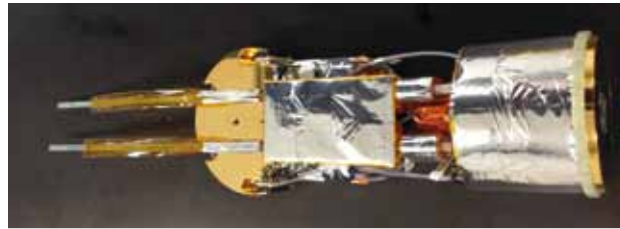


Abb. 17: COMBIT-Magnet in Superisulationsfolie (rechts) mit Kupfer-Montageplatte (Kaltfingerflansch) und supraleitenden Stromzuführungen (links).

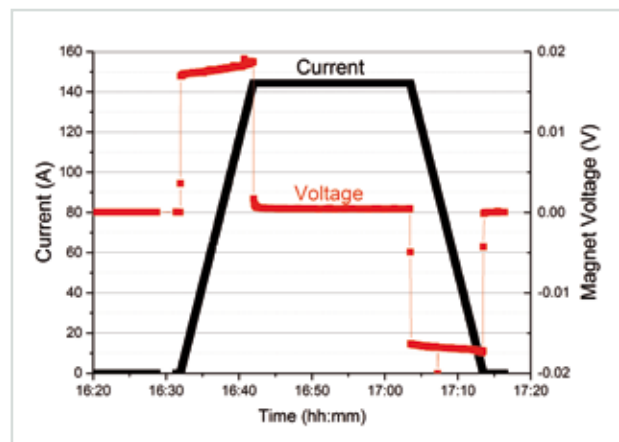


Abb. 18: Spannung/Strom-Protokoll der Magneterregung auf das Feld von 2 T über die Zeit.



Abb. 15: Supraleitender Magnet des Projekts COMBIT unter Felderregung. Eine auf 77 K abgekühlte supraleitende YBCO-Scheibe levitiert im Magnetfeld.

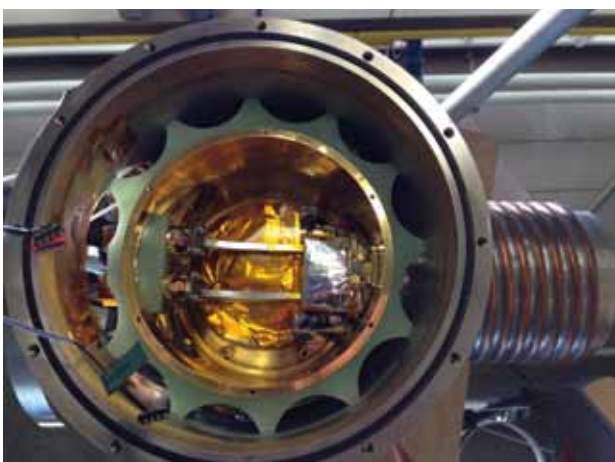


Abb. 16: Blick in den geöffneten Kryostaten des COMBIT-Magneten. Der Magnet ist im Hintergrund sichtbar, im Vordergrund sind die Stromzuführungen zur erkennen.

### Highlight 3 Supraleitendes Rutherford-Kabel mit Roebel-Strands

Das Rutherford-Kabel mit Roebel-Strands aus REBCO-Leitern wurde in einem Kabeldesign mit rundem Querschnitt fortentwickelt. Dieses Design birgt keine Gefahr einer irreversiblen Schädigung des Strands bei der Kabelherstellung, wie in Biegeversuchen nachgewiesen wurde. Das Kabel besteht aus einem Kupfer-Zentralrohr mit sechs Längsnuten zur Aufnahme der Roebel-Strands. Durch Vertwistung des Rohrs wurde eine Transposition der Nuten des Kabels erzeugt. Erreicht wurde eine Transpositionslänge von 0,7 m bei einer Kabellänge von 1,4 m. Sechs Roebel-Strands aus je zehn Supraleiterbändern wurden sukzessive verseilt, und das Transportstromverhalten wurde gemessen. Das vollständig mit Roebel-Strands bestückte Kabel, weltweit das erste in diesem Design, trug einen Transportstrom von 2.6 kA im Eigenfeld bei 77 K. Abbildung 19 zeigt das Kabel.



Abb. 19: Rutherford-Kabel, bestückt mit sechs Roebel-Strands.



Digitale Peripheriebaugruppe



# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)

*Leitung: Dr. Beate Bornschein*

Das Tritiumlabor Karlsruhe ist ein in Europa und Amerika einzigartiges Halbtechnikum 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 Experimentierfläche von mehr als 1 000 m<sup>2</sup> stehen mehr als 15 Handschuhkastensysteme mit einem Volumen von insgesamt rund 125 m<sup>3</sup> als Einschluss für die tritiumführenden Versuchsanordnungen zur Verfügung. Gründungsaufgabe und Arbeitsschwerpunkt des TLK ist die Entwicklung von Technologien für den Brennstoffkreislauf von Fusionsreaktoren. Der zweite umfangreiche Arbeitsschwerpunkt liegt auf dem Aufbau wesentlicher Systeme des Karlsruhe Tritium Neutrino Experiments (KATRIN) zur Messung der Ruhemasse des Elektronantineutrinos. Demgemäß werden die Arbeiten zu gleichen Teilen innerhalb der Programme „Fusion“ (FUSION) und „Matter and Universe“ (MU) gefördert.

Wissenschaftlicher Nachwuchs ist für die Zukunft des TLK äußerst wichtig. In den vergangenen Jahren hat das TLK daher in Zusammenarbeit mit IEKP, IFRT, ITTK und ITVT durch Vergabe interessanter Forschungsarbeiten vermehrt Studierende und Doktoranden an sich gebunden (siehe Tabelle 1). Dem TLK liegt viel daran, den jungen Menschen eine hervorragende und ausgewogene Ausbildung zukommen zu lassen, die neben den fachwissenschaftlichen Inhalten auch die heute vermehrt fragten Soft Skills umfasst.

	2010	2011	2012	2013	2014
Bachelor		6	12	9	13
Diplom/Master	9	9	6	7	8
Promotion	8	10	10	11	10

*Tabelle 1: Abgeschlossene und laufende Arbeiten im TLK.*

Dieses Kapitel stellt die Arbeiten und Ergebnisse in den Bereichen Betrieb und Infrastruktur des TLK sowie Forschung und Entwicklung zur Fusion vor. Dem Bereich KATRIN ist ein eigenes Kapitel gewidmet.

### Betrieb und Infrastruktur des TLK

Im Jahr 2014 waren die konventionelle Infrastruktur sowie die Tritiuminfrastruktur im Tritiumlabor für die Forschungsvorhaben der Programme FUSION und MU bis auf wenige Stunden uneingeschränkt verfügbar. Aus dem Tritiumlager wurde vor allem die Experimentieranlage CAPER, die sowohl betriebliche Aufgaben, wie die Detritierung von Abfallgasen, als auch Forschungs- und Entwicklungsaufgaben erfüllt, sowie die Experimente

TriToP und TriReX (siehe Kapitel KATRIN) mit reinem Tritium versorgt. Die CAPER-Gruppe stellte zusätzlich spezielle Tritiumgasmischungen für andere Experimente her, die sie damit erst ermöglichte. Die behördlichen Auflagen der Betriebsgenehmigung wurden jederzeit erfüllt. Meldepflichtige Ereignisse kamen nicht vor.

Der Schwerpunkt der Arbeiten des Betriebsbüros, der Mess- und Automatisierungstechnik und der Tritiumverfahrenstechnik lag auch 2014 auf der Gewährleistung des sicheren Betriebs des TLK und auf der Bereithaltung der Infrastruktur für die F&E-Arbeiten der beiden beteiligten Programme MU und FUSION. Eine wichtige Aufgabe in diesem Zusammenhang war wieder die Wissensweitergabe an die Studierenden, die ihre Forschungsarbeiten im TLK durchführen und naturgemäß anfangs keine Erfahrung im Umgang mit Tritium haben. Von betrieblicher Seite her erfolgt dabei eine intensive Beratung bei der Planung der Experimente und – gemäß unserer Betriebsanweisung – eine sorgfältige Prüfung der sicherheitsrelevanten Dokumente (z. B. Sicherheitstechnische Beschreibung).

Die Tritiumverfahrenstechnikgruppe hatte neben den üblichen Schwerpunktaufgaben wie Betrieb, Wartung und wiederkehrende Prüfungen aller Infrastrukturwerke (Zweite Hüllen, Tritiumlager, Tritiumtransfersysteme etc.) sowie der Abfallentsorgung im Jahr 2014 auch die Aufgabe, die für den zukünftigen KATRIN-Tritiumbetrieb notwendige Ersatzteilbeschaffung neu zu organisieren. Aus Platzgründen werden die Aufgaben der Gruppe Tritiumverfahrenstechnik und des Betriebsbüros erst im nächsten Jahresbericht etwas ausführlicher dargestellt. In diesem Bericht werden die Arbeiten der Mess- und Automatisierungsgruppe (MAT) näher erläutert.

Die Mess- und Automatisierungsgruppe schloss die über vier Jahre laufende Ersetzung des Prozessleitsystems



*Abb. 1: Inbetriebnahme des Automatisierungssystems AS6 im Tritiumlabor Karlsruhe.*

(PLS) der Infrastruktur des Tritiumlabors erfolgreich ab. 2014 wurde das Automatisierungssystem AS6 des Zentralen Tritiumrückhaltesystems (ZTS) in Betrieb genommen; das alte System mit dem zugehörigen Bussystem wurde vollständig zurückgebaut. Das ZTS ist verantwortlich für das Prozessieren der potenziell kontaminierten TLK-Abgase zur Erhöhung der Tritiumrückhaltung vor Abgabe in den Kamin. Es ist daher eine der wichtigsten Infrastruktureinrichtungen des TLK; das dazugehörige Automatisierungssystem ist das wichtigste und komplizierteste des gesamten Prozessleitsystems des TLK.

Neben der Inbetriebnahme der mit dem AS6 realisierten verschiedenen Reinigungsstufen wurde auch die Kopplung zu dem neuen Datenerfassungssystem des Strahlenschutzes in Betrieb genommen und vollständig in die Überwachung und Steuerung der Tritiuminfrastruktur integriert.

Des Weiteren waren 2014 insgesamt 28 komplexe, ineinander verschachtelte automatische Ablaufsteuerungen für das ZTS zu testen und in Betrieb zu nehmen. Bereits 2013 hatte die Gruppe MAT die Ablaufsteuerungen entwickelt. Sie überwachen die Funktion des ZTS, indem sie beispielsweise bei Störungen und erhöhten Tritiumaktivitäten Unterprogramme starten, die dann diese Störungen bearbeiten oder auch durch Einstellen höherer Katalysatortemperaturen eine größere Gasreinigung erreichen. Bei einer Störung oder gar dem Ausfall der Kühlung werden entsprechende Notkühlprogramme gestartet, die eine gezielte Kühlung gewährleisten. Primärabgase werden über eine Ablaufsteuerung in Behältern gesammelt und können über untergeordnete automatische Programme prozessiert, entleert, homogenisiert und regeneriert werden.

Diese Ablaufsteuerungen beinhalten zahlreiche Alternativpfade und Verzweigungen, deren Bedingungen alle parallel oder sequentiell simuliert werden mussten. Eine umfangreiche Simulation war nötig, da das ZTS außer Betrieb war und daher die Anlagenzustände nicht real hergestellt werden konnten. Der finale Test bedingte ein komplexes und detailliertes Funktionsprüfprogramm, das mehrere Mitarbeiter der Gruppe MAT über vier Wochen zeit- und konzentrationsintensiv erfolgreich abarbeiteten. Schon während dieser Tests konnte der Tritiumbetrieb des TLK in großen Teilen wieder aufgenommen werden.

Auch für die nunmehr 25 Jahre alte Energieversorgung des Prozessleitsystems der Tritiuminfrastruktur und der übergeordneten Sicherheitsschaltung wurde ein Konzept erarbeitet und verwirklicht. Die vorhandenen Schaltschränke wurden durch neue Schränke mit modernen Netzteilen sowie Überwachungs- und Anzeigeelementen ersetzt; die neuen Schränke wurden angeschlossen und in Betrieb genommen. Im TLK erfüllen die Energieversorgung des Prozessleitsystems und die Sicherheitsschaltung die wichtigsten sicherheitsgerichteten Aufgaben. Daher war es unverzichtbar, ein detailliertes Funktionsprüfprogramm zu erstellen und abzuarbeiten. Der Tritiumbetrieb musste für die Dauer des Umbaus vollständig eingestellt werden.

Um die beim Umbau des Prozessleitsystems ersetzte Prozessleittechnik auch für zukünftige Erweiterungen und Ersetzungen zu ertüchtigen, wurde für jedes der sechs beteiligten Automatisierungssysteme (AS) eine



Abb. 2: TRENTA-Leitstand

Profibus-Leitung über Lichtwellenleiter mit Optischen Link-Modulen (OLM) vom AS-Raum zu einer zentralen Stelle im TLK und dort über Patch Panel flexibel anschließbar gemacht. Dadurch kann zukünftig I/O-Peripherie erweitert bzw. ersetzt werden, ohne für jedes einzelne dieser Signale eine neue Leitung von den Experimentier- und Infrastrukturräumen durch mehrere Brandschottungen hindurch zum AS-Raum zu verlegen und dort über den Rangierverteiler an die Signalbaugruppen des AS anzuschließen.

Neben dem Prozessleitsystem der Tritiuminfrastruktur des TLK erneuerte die Gruppe MAT auch das dezentrale Prozessleitsystem der Isotopentrennanlage (ISS-DGC). Damit ist die Verfügbarkeit, wie sie gerade auch bei KATRIN gefordert ist, für viele weitere Jahre gesichert. Die Prozessleitsoftware Siemens PCS7 wurde von der Version V6 auf die Version V8.0 hochgerüstet. Dabei programmierte die Gruppe MAT das gesamte PCS7-Anwenderprogramm mit der im TLK entwickelten PCS7-Automatisierungs- und PCS7-Visualisierungsbibliothek neu. Sie musste dazu zunächst die vorhandene Anwendersoftware vollständig auslegen und interpretieren und dann anhand der eigenen Bibliotheken und zugehöriger PCS7-Messstellentypen (Typicals) neu programmieren. Schon während der Software-Entwicklung wurde die neue Software durch Simulationsbaugruppen und eigene Labview-Prüfroutinen zur Simulation von Anlagen und Anlagenzuständen getestet. Die laufende Anlage wurde dabei zu keinem Zeitpunkt beeinflusst. Während eines nur wenige Stunden dauernden ISS-DGC-Anlagenstillstands wurden schließlich der Umbau und die Inbetriebnahme des neuen dezentralen Prozessleitsystems erfolgreich abgeschlossen.

### Analytik im TLK

Die Beherrschung der qualitativen und quantitativen Analyse der sechs Wasserstoffisotope  $H_2$ , HD,  $D_2$ , HT, DT und  $T_2$  sowie anderer tritierter Verbindungen (z. B. HTO) ist eine notwendige Voraussetzung für den Umgang mit Tritium und stellt hohe Ansprüche an Experimentatoren und Ausrüstung. Wegen der großen Bedeutung der Analytik für das TLK werden die F&E-Arbeiten programm- und gruppenübergreifend koordiniert und vor allem im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten durchgeführt. 2014 konzentrierten sich die F&E-Arbeiten auf folgende Gebiete:

- Laser-Raman-Spektroskopie an gasförmigen tritiierten Wasserstoffisotopologen (siehe Kapitel KATRIN)
- Beta-Induzierte Röntgenspektroskopie (BIXS) an gasförmigen Wasserstoffisotopologen und flüssigem tritiiertem Wasser

- Infrarot-Spektroskopie an flüssigen Wasserstoffisotopologen (nächster Abschnitt)
- Betrieb des TriADe-Experiments (Kapitel KATRIN).

Parallel zu den reinen F&E-Arbeiten wurden Kalorimeter, Ionisationskammern und Gaschromatographen sowie bestehende Kalibrierverfahren weiter optimiert. Die genannten Instrumente werden standardmäßig genutzt. Sie bilden das Rückgrat der Analytik im TLK und sollten stets einsatzbereit sein. Ein Arbeitsschwerpunkt lag 2014 auf der weiteren Inbetriebnahme (ohne Tritium) eines zur Messung von Wasserstoffisotopologen geeigneten Gaschromatographen für die Tritiummesstechnik. Das Gerät soll ein ca. 20 Jahre altes Gerät ersetzen. Nach der unvermeidlichen Fehlersuche und geräte-technischen Optimierungen wurden im Sommer 2014 die ersten zufriedenstellenden Messungen mit dem Gerät durchgeführt. Trotzdem musste das Gerät noch einmal zum Hersteller zurückgeschickt werden, um zur weiteren Optimierung erforderliche notwendige Hardwareänderungen vornehmen zu lassen. 2015 soll das Gerät in die betreffende Handschuhbox eingebaut werden. Die dafür notwendigen verfahrenstechnischen Planungen wurden 2014 weitergeführt.

### Infrarot-Spektroskopie an flüssigen Wasserstoffisotopologen mit TApIR

Das TApIR-Experiment (Tritium-Absorptions-Infrarot-Spektroskopie-Experiment) untersucht die Infrarotabsorptionsspektren flüssiger Wasserstoffisotopologe unter Bedingungen ähnlich denen der kryogenen Isotopentrennung bei ITER. Ziel ist, den Zusammenhang zwischen Parametern der Infrarotspektren und der Stoffkonzentrationen zu ermitteln und damit eine genaue Kalibrierung des Analysesystems zu ermöglichen.

Bei der Analyse der 2013 während mehrerer Monate aufgenommenen Messdaten mit inaktiven Wasserstoffisotopologen ( $H_2$ , HD,  $D_2$ ) wurde dieser Zusammenhang untersucht. Als Ergebnis wurde eine Kalibrierung mit einer Unsicherheit von  $\pm 5\%$  ermittelt, was einen großen Schritt auf dem Weg zur Entwicklung eines Analytiksystems für flüssige Wasserstoffisotopologe darstellt.

Zum Verständnis und zur Beschreibung der molekularen Prozesse in der flüssigen und mit 20 K tiefkalten Probe wurden zahlreiche Spektrallinien, sogenannte Dimer, einer kurzzeitigen schwachen Van-der-Waals-Bindung zweier Wasserstoffisotopologe ( $H_2$ , HD,  $D_2$ , HT, DT,  $T_2$ ), zugeordnet. Da solche Linien mit der Konzentration beider Wechselwirkungspartner skalieren, lassen sich durch diesen Effekt die beobachteten nichtlinearen Kalibrierkurven erklären.

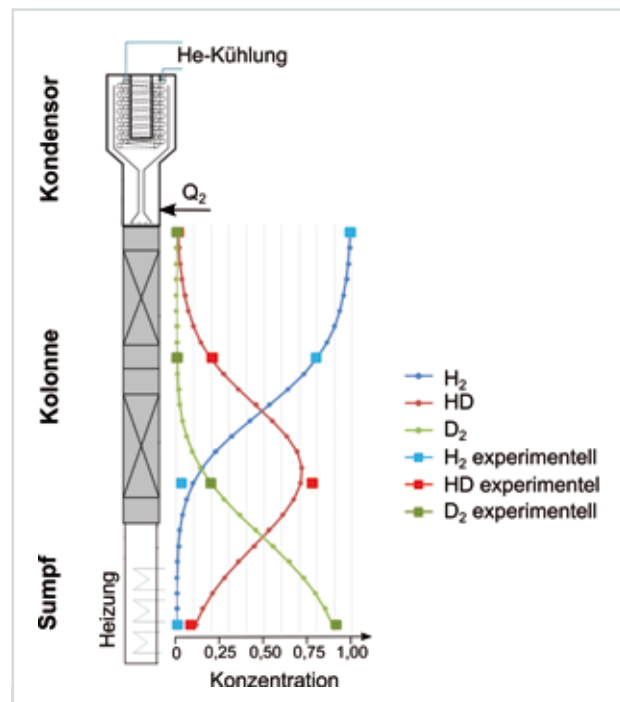
### F&E für ITER

Die aktuellen Arbeiten für den Tritiumbrennstoffkreislauf von ITER konzentrieren sich auf den europäischen Beitrag „Wasserdetriitierung und Isotopentrennung (WDS-ISS)“. Dafür entwickelt und untersucht das TLK im Rahmen des Programms FUSION Prozesse zur Wasserdetriitierung und zur Wasserstoffisotopentrennung mithilfe der TRENTA-Anlage. TRENTA besteht aus den zwei Teilsystemen WDS und ISS, die im Vergleich zu den ITER-Systemen kleiner skaliert sind. Ziel der Arbeiten mit der TRENTA-Anlage ist, wichtige Daten für die ITER-Systeme WDS und ISS zu erhalten und somit entscheidend zum ITER-Design beizutragen. Neben diesen spezifischen F&E-Arbeiten zur WDS/ISS von ITER führt das TLK For-

schungsarbeiten im Rahmen der Entwicklung der europäischen ITER-Testblanketmodule (TBM) durch. Diese Arbeiten fokussieren auf den Bereich „Tritiumextraktion aus Blankets“ und die dazugehörige Analytik.

Die Isotopentrennung (ISS) mithilfe kryogener Destillation in einer Kolonne hat bei ITER die Aufgabe, ein Gemisch aller sechs Wasserstoffisotopologe ( $H_2$ , HD,  $D_2$ , HT, DT,  $T_2$ ) so zu trennen, dass die notwendigen Gasmischungen zur Reaktoreinspeisung oder Lagerung des Tritiums und Deuteriums bereitgestellt werden können.

In Rahmen der Entwicklung dieses Verfahrens der kryogenen Destillation wurde am TLK 2014 der ITER-Grant 440 bearbeitet. Der Grant hatte die Aufgabe, das Trennverhalten verschiedener Kolonnengeometrien und Packungen an  $H_2$ , HD und  $D_2$  zu untersuchen. In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau der CD-Kolonne zusammen mit einem typischen Konzentrationsprofil während der Isotopentrennung zu sehen. Zur Vorbereitung der entsprechenden Messungen wurden aufwendige Umbaumaßnahmen an der TRENTA-Anlage durchgeführt, beispielsweise die Anpassung der Verrohrungen und des Prozessleitsystems, die Fertigung von Kondensator, Sumpf und zwei neuen CD-Kolonnen, sowie der Aufbau eines mobilen Quadrupol-Massenspektrometers zur Gasanalyse. Grant 440 wurde im Oktober 2014 nach mehr als einem halben Jahr Messzeit erfolgreich abgeschlossen.



**Abb. 3: Schematische Darstellung der Destillationskolonne.** Die Kolonne besteht aus einem Kondensator, welcher mit Helium bei einer Temperatur von 16 K gekühlt wird. Hier kondensieren die Wasserstoffisotopologe und gelangen auf die Kolonnenpackung, welche eine große Oberfläche bietet und so Kondensation und Verdampfung fördert. Am Boden befindet sich ein beheizbarer Sumpf, in dem ein gewisser Flüssigkeitspegel gehalten wird, der über die Heizleistung geregelt werden kann. In der Grafik ist das Konzentrationsprofil von  $H_2$ ,  $D_2$  und HD zu sehen. Durch die Destillation sammelt sich  $H_2$  am Kopf der Kolonne, HD in der Mitte und  $D_2$  im Sumpf.

## Highlight Zeolithmembranen zur Tritiumprozessierung in Brutblankets von Fusionsreaktoren

In zukünftigen Fusionskraftwerken dient eine Brennstoffmischung aus Deuterium (D) und Tritium (T) als Kernbrennstoff. Die Erzeugung des Tritiums erfolgt im sogenannten Brutblanket des Fusionsreaktors durch eine Kernreaktion aus Lithium. Dazu werden Neutronen aus dem eigentlichen Fusionsprozess verwendet. Das erbrütete Tritium wird aus dem Blanket mithilfe eines Prozessgasstroms, beispielsweise Helium, ausgeschleust.

In DEMO, dem zukünftigen Demonstrationsfusionskraftwerk, sind höchst effiziente verfahrenstechnische Prozesse zur Gewinnung des Tritiums aus dem Brutblanket gefordert. Diese Prozesse müssen schnell, zuverlässig und ökonomisch ablaufen und gleichzeitig das Tritiuminventar minimieren. Die aktuell für die ITER Testblanketmodule (TBM) verfolgten Konzepte entsprechen diesen Anforderungen offensichtlich nicht. Denn die verfahrenstechnischen Prozesse zur Gewinnung des Tritiums sind diskontinuierlich, behandeln molekulare und oxidierte Formen des Tritiums separat und basieren für tritiiertes Wasser auf der Adsorption in Molekularsieben und für  $T_2$  auf der Absorption in Metallgittern. Die Verwendung solcher Vorrichtungen führt zu einer Immobilisierung von Tritium und damit zu einem unnötigen Aufbau von Tritiuminventaren in der Anlage. Ein weiterer Nachteil ist der Zwang zu einem zyklischen Arbeiten (Absorption, Desorption) mit unterschiedlichen Temperaturen und unter Verwendung von Spülgas, was wiederum zu einer Verdünnung des Prozessgases führt. Außerdem sind die Gasdurchsätze im ITER Testblanketmodul um mehr als einen Faktor 1 000 geringer als in einem künftigen DEMO Blanketmodul. Das TLK hat daher vor einiger Zeit mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten begonnen, um fortschrittliche Konzepte zum Gewinn des Tritiums aus dem Brutblanket unter den für DEMO relevanten Bedingungen zu erarbeiten und später im Labormaßstab technisch zu verwirklichen.

Aktuell verfolgt das TLK das Konzept einer verfahrenstechnischen Kombination von Membranen und dem PERMCAT (katalytischer Membranreaktor, siehe Abbildung 4). Eine solche Kombination zeigt viele Vorteile:

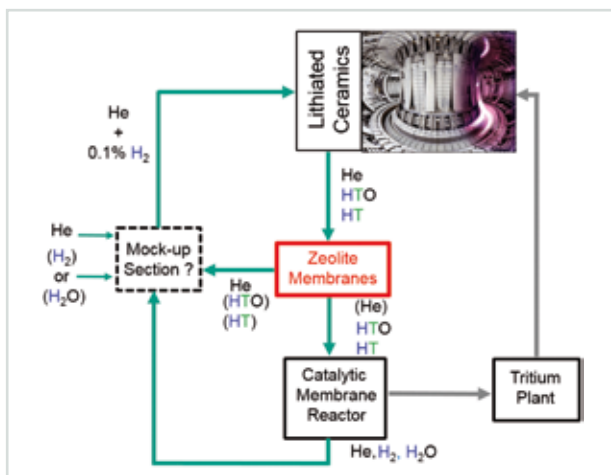


Abb. 4: Konzept für die Tritiumextraktion aus einem Festkörper-Brutblanket, bestehend aus zwei

konstante Temperaturen und Drücke, kontinuierliche Prozessierung und minimale Tritiuminventare. Der PERMCAT-Prozess, den das TLK seit mehr als 15 Jahren erfolgreich einsetzt, kann Tritium aus den verschiedenen chemischen Formen, wie sie in einem Brutblanket auftreten, abtrennen. Der Prozess gewinnt das Tritium höchst effizient in reiner molekularer Form als  $T_2$ , DT oder HT und kann es damit direkt dem inneren Brennstoffkreislauf eines Reaktors zur Verfügung stellen. Da die Konzentration des Tritiums im Spülgas äußerst gering sein wird – im ppm-Bereich –, wird ein zweistufiger Prozess diskutiert, bei dem der Tritiumgehalt der Gas Mischung vor Eintritt in den PERMCAT noch mithilfe einer Membran erhöht wird. Als geeignete Kandidaten für solche Membranen gelten Zeolithmembranen, die tritiumkompatibel sind und vielversprechende Eigenschaften besitzen. Nach einem ausführlichen Literaturstudium, einer Marktrecherche und einer Studienarbeit in Zusammenarbeit mit Professor Matthias Kind vom Institut für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) des KIT begann die Blanketgruppe des TLK vor rund zwei Jahren mit dem Test solcher Membranen. Die dazu erforderlichen Testapparaturen wurden und werden im Rahmen von Doktor- und Masterarbeiten im TLK aufgebaut und betrieben.

Die folgenden Abschnitte stellen den Stand der Arbeiten bei den Membrantests und am PERMCAT-Prozess dar.

## Forschung und Entwicklung mit Zeolithmembranen

Am TLK werden im Rahmen eines speziellen experimentellen Programms der Blanketgruppe die Permeationseigenschaften von Zeolithmembranen für die Extraktkomponenten Wasserstoff (anstelle des radioaktiven Tritiums) und Helium ermittelt, um die Verwendbarkeit der Zeolithmembranen für die Fusionsanwendung nachzuweisen. Dafür wurde in den vergangenen Jahren die Experimentieranlage ZIMT (Zeolite and Inorganic Membranes for Tritium) aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Anlage erlaubt Tests sowohl für Einzelgase als auch für Gasgemische, darunter mit Wasser-

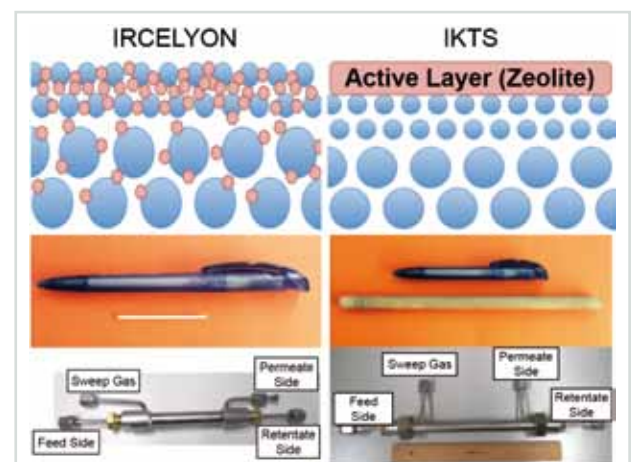


Abb. 5 links: MFI Zeolithkristalle, eingebaut in ein poröses Substrat (oben), Hohlfasermembran (Mitte), Membranmodul-Konfiguration für die Testmessungen (unten).

Abb. 5 rechts: MFI Zeolithschicht, aufgetragen auf ein poröses Substrat (oben), rohrförmige Membran (Mitte), Membranmodul-Konfiguration für die Testmessungen (unten).

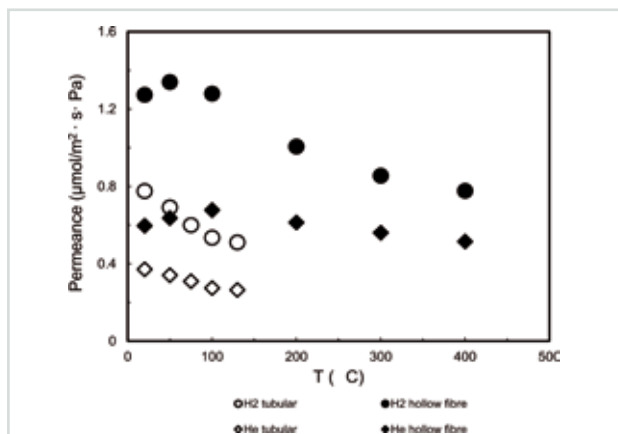
dampf im flexiblen Konzentrationsbereich. Parallel zum experimentellen Programm entwickelt das TLK ein numerisches Werkzeug, das einen Mehrstufenpermeationsprozess simulieren soll. Es dient dazu, optimierte Eingabeparameter (Anzahl der Stufen, Drücke, Membranfläche, Tritiumabtrennung und Tritiumanreicherung) für einen Mehrstufenprozess vorzugeben.

Die erste im TLK getestete Zeolithmembran ist eine Nanokompositmembran vom Typ MFI, hergestellt von IRCELYON in Frankreich (Abbildung 5 links). Die Herstellung geschieht durch Pore-Plugging einer Hohlfaserfaser aus  $\alpha$ -Aluminium (Länge 150 mm, Außendurchmesser 1,65 mm, Innendurchmesser 1,44 mm), die den nanokompositen Support darstellt. Die Technik des Pore-Plugging erlaubt die Herstellung von sehr dünnen ( $< 1 \mu\text{m}$ ), defektfreien und mechanisch stabilen (Membran-)Lagen, von denen eine hohe Selektivität und Permeabilität zu erwarten ist.

Die zweite getestete MFI Zeolithmembran, hergestellt vom Fraunhofer IKTS Hermsdorf, ist rohrförmig, mit einer dünnen (ca.  $30 \mu\text{m}$ ) auf die innere Fläche des porösen Supports aus Titandioxid aufgetragenen Zeolithschicht, 250 mm lang, mit einem Außendurchmesser von 10 mm und einem Innendurchmesser von 7 mm (Abbildung 5 rechts).

In der ersten Experimentierphase wurde die Einzelgaspermeance mit Helium (He) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) bei beiden Membranen im sogenannten Dead-End-Mode, das heißt mit geschlossenem Retentatausgang, überprüft. Die Ergebnisse (Abbildung 6) zeigen, dass die Permeance von Wasserstoff bei der IRCELYON-Membran um einen Faktor 1,6 größer ist als bei der IKTS-Membran. Diese Differenz erklärt sich durch die unterschiedlich dicken Zeolithschichten der beiden Membranen. Dabei stimmt die ideale Selektivität  $\text{H}_2/\text{He}$ , die ein Verhältnis der Permeances der Einzelgase ist, bei der IRCELYON- und der IKTS-Membran überein.

Bei den Experimenten mit Gasmischungen  $\text{H}_2$ -He unterschiedlicher Feedgaszusammensetzung war der Retentatausgang offen, was das Einstellen des Cuts, das heißt



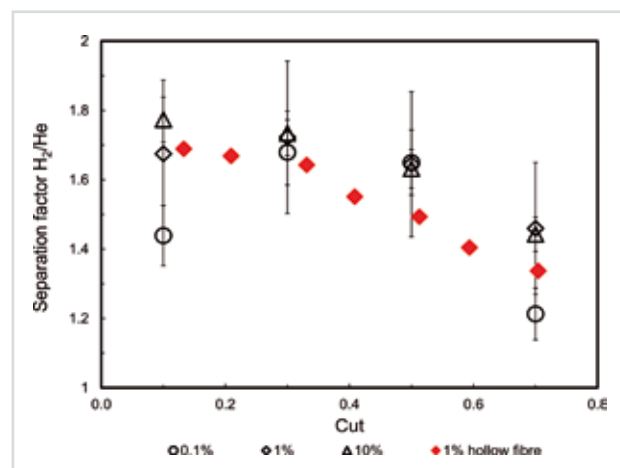
**Abb. 6: Einzelgasexperimente mit MFI Membranen.** Dargestellt ist die Permeance durch die Membran als Funktion der Temperatur für  $\text{H}_2$  und He.

des Verhältnisses zwischen Permeatfluss und Feedfluss, der einen wichtigen Prozessparameter darstellt, ermöglichte. Die Permeat- und die Retentatkomposition wurden mithilfe eines Quadrupol-Massenspektrometers analysiert. Abbildung 7 zeigt den Trennfaktor, der im Fall einer Gasmischung als Verhältnis der Konzentrationen von Komponenten im Permeat zu denen im Feed bestimmt ist, als Funktion des Cuts. Die wichtigste Erkenntnis aus dem binären  $\text{H}_2$ -He-Experiment ist, dass der Trennfaktor  $\text{H}_2/\text{He}$  von der Zusammensetzung des Feeds unabhängig ist, was das Simulieren des Prozesses erleichtert. Dabei wurde der optimale Cutbereich ermittelt, in dem der Separationsprozess am effektivsten ist, nämlich bei einem Cutwert von 0,3 bis 0,4.

Als Nächstes wurden die Messungen mit dem für die Blanketfrage relevanten Wasserdampf-Helium-Gemisch (1 % Wasserdampf) im Temperaturbereich 30 bis  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt. Der Trennfaktor  $\text{H}_2\text{O}/\text{He}$  erreicht den maximalen Wert von sechs bei der niedrigsten Betriebstemperatur ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und nimmt mit der steigenden Temperatur etwas ab. Dies kann die Prozessgröße (Membranfläche und Stufenzahl) reduzieren, falls das Blanketextraktgas mit Wasserdampf anstelle des Wasserstoffs, wie es für ITER Brutblanket konzipiert ist, angereichert wird.

Die beschriebenen Ergebnisse ermutigen zur Fortsetzung der Arbeiten. Als nächste Schritte sollen weitere Membrantypen auf ihre Brauchbarkeit untersucht werden, darunter von IKTS hergestellte Zeolithmembranen vom Typ NaA, die als extrem hydrophil gelten, sodass der Trennfaktor für „feuchte“ Gemische weiter verbessert werden kann, sowie Kohlenstoffmembranen, von denen eine bessere Trennung des Wasserstoffs von Helium zu erwarten ist.

Die gemessenen Permeationseigenschaften wie Permeance und Trennfaktor werden in das Modell der Membrankaskade implementiert, um eine technische Anlage für den Betrieb in DEMO auszulegen.



**Abb. 7: Trennfaktor der IKTS-Membran als Cut-Funktion für Gasmische  $\text{H}_2$ -He mit Wasserstoffanteil 0,1 %, 1 % und 10 %.** Die Ergebnisse werden mit den in der IRCELYON-Membran für das 1 %-Gemisch gemessenen Daten verglichen.



Maßarbeit beim Einbau des neuen Testeinbaus in TIMO-2.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Vakuumtechnik

Leitung: Dr. Christian Day

Das Jahr 2014 war für den Bereich Vakuumtechnik vor allem dadurch geprägt, dass das neu strukturierte Europäische Fusionsprogramm, aus dem die überwiegende Mehrzahl der Forschungsaufträge des Bereichs stammen, mit einem festgelegten Fünf-Jahres-Plan eingebettet in das „Horizon 2020“ Rahmenprogramm der EU endlich gestartet werden konnte. Das erlaubt zum ersten Mal eine strategische Planung mit mittelfristigen statt kurzfristigen Zielen. Allerdings wurden die ersten Monate des Jahres zunächst benötigt, um die Organisation des Fusionskonsortiums EUROFUSION zu konsolidieren und die Planung der einzelnen Aktivitäten aufeinander abzustimmen. So wurden auf europäischer Ebene mehr als 30 Arbeitspakete definiert, zur einen Hälfte im Bereich Plasmaphysik, zur anderen im Bereich Technologie (Demonstrations-Fusionskraftwerk DEMO). Auf der anderen Seite konnte in dieser Phase auch Einfluss genommen werden, insbesondere weil der Bereichsleiter gleichzeitig das Arbeitspaket Tritium-Materiezufuhr-Vakuum im DEMO-Programm leitet. Der Bereich Vakuumtechnik am Institut ist dadurch fest und in einer führenden und sichtbaren Rolle im Europäischen Fusionsprogramm verankert. Damit legt der Bereichsleiter als einer von 10 Projektleitern direkt das Design des zukünftigen europäischen Fusionskraftwerks fest. Die europäischen Partner des Bereichs sind dabei insbesondere das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching (Betreiber der Fusionsanlage ASDEX-Upgrade), das Culham Science Centre in Culham, England (Betreiber der Fusionsanlage JET) sowie ENEA-RFX in Padua, Italien (Betreiber des Neutralteilchen-Injektor-Testbetts MITICA), ENEA Frascati (Tritiumtechnik), und natürlich das Tritiumlabor in Karlsruhe selbst. Dabei konnten die bereits im 'alten' Fusionsprogramm gestarteten vakuumtechnischen Aktivitäten direkt weitergeführt werden.

Als besonderes Highlight wurde der Europäische Fusions-Innovationspreis an Dr. Christian Day und Thomas Giegerich vergeben, in Würdigung des erfinderischen Potentials des neuen, für DEMO entwickelten Vakuumprozesses KALPUREX. Diesem Thema ist am Ende des Kapitels ein eigener Abschnitt gewidmet.

### Vakuumtechnologie für DEMO

Das für DEMO in den letzten Jahren entwickelte neue Konzept arbeitet im Gegensatz zu den kryogenen Vakuumpumpen an ITER kontinuierlich und ohne Kryogen. Durch eine fest eingebaute Separation des Divertorabgases kann zudem ein Großteil des unverbrannten Brennstoffs direkt recycelt werden, wodurch sich die aufgebauten Tritiuminventare und Prozessierzeiten deutlich verringern lassen. Dieses sogenannte DIR-Konzept (Direkte Interne Rezyklierung) besteht aus drei Pumpstufen. Zur Separation werden Metallfolien verwendet, die nur für atomaren Wasserstoff durchlässig

sind und so auch eine gewisse Kompression erzielen. Als Hochvakuumpumpe wird eine Diffusionspumpe eingesetzt, die, um tritiumverträglich zu sein, mit Flüssigmetall (Quecksilber) betrieben wird. Als mechanische Pumpe zur Kompression bis Umgebungsdruck wird schließlich eine Flüssigkeitsringpumpe verwendet, die ebenfalls mit Quecksilber als Arbeitsmittel betrieben wird.

Der Arbeitsschwerpunkt wurde 2014 auf die Weiterentwicklung der Quecksilber-Flüssigkeitsringpumpe gelegt. Bereits in 2013 konnte ein Prinzipnachweis erfolgen; dafür wurde eine erste Ringpumpe verwendet, für die im wesentlichen das Design einer Wasserringpumpe übernommen wurde, allerdings mit abgesenkter Drehzahl, um die höheren Kräfte des um mehr als eine Größenordnung schwereren Quecksilbers zu berücksichtigen. Als Folge dieser schönen Erfolge wurde damals entschieden, dass eine vollkommen tritiumkompatible Version der Pumpe in der für JET geplanten Tritium-Kampagne 2017 verwendet werden soll. Bedingt durch den Einbau in den aktiven Bereich der Tritiumanlage bei JET (AGHS) verlangt dies die (inaktive) Inbetriebnahme am Institut spätestens im ersten Quartal 2016. Der Bereich arbeitete daher unter Hochdruck an dem Design des Teststandes in Übereinstimmung mit den Technischen Liefer- und Abnahmebedingungen des AGHS. Abb. 1 zeigt die Oberfläche für die Sicherheitssteuerung. Dies ist auf einem guten Weg. Mit der Firma Hermetic-Pumpen, Gundelfingen konnte ein sehr kompetenter Industriepartner gefunden werden, der interessiert ist, dieses exotische Projekt gemeinsam mit uns durchzuführen.

Um bei JET die Grenzen des Betriebsbereichs einer solchen Ringpumpe austesten zu können, wird der Teststand zusammen mit einer Boosterpumpe nach JET ausgeliefert werden, die in 2014 bereits beschafft wurde. Der Booster, siehe Abb. 2, wird nun tritiumkompatibel umgebaut und mit der Ringpumpe in einen gemeinsa-

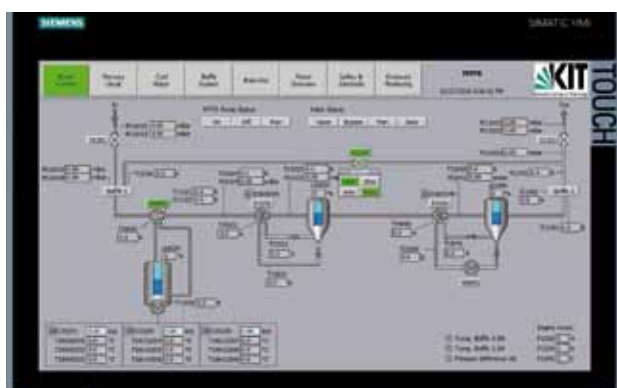


Abb. 1: Programmierung des Teststandes für JET.



**Abb. 2:** Blick auf die Boosterstufe des JET-Pumpstandes (vor der Modifikation auf Tritiumverträglichkeit).

men Pumpstand integriert. Mit dieser Erweiterung wird es möglich, die Ringpumpe direkt als Vorpumpe für die bei JET eingesetzten Turbomolekularpumpen zu verwenden.

Trotz aller bisherigen Erfolge ist dieses neue Konzept natürlich hoch risikoreich, weil noch nie dagewesen. Als potentielle Alternative für die neuen DEMO-Pumptechnologien sieht das Programm daher wieder Kryopumpen vor, für die aus dem ITER-Programm viel Erfahrung vorliegt. Allerdings sollen auch diese einen selektiven Pumpbetrieb ermöglichen, so dass das DIR-Prinzip auch im Alternativszenario umgesetzt werden kann. Dies wiederum erfordert ein selektives Pumpen und ein anschließendes selektives Freisetzen der gepumpten Gase während der Regeneration. Dazu wurde in einer Studie ein Konzept erarbeitet, das die Temperaturabhängigkeit der Kryosorption ausnutzt: Die Sorption von Wasserstoff gelingt bei höheren Temperaturen als die Sorption von Helium. Für eine belastbare Auslegung einer solchen Kryopumpe muss allerdings die Temperaturabhängigkeit genau bekannt sein. Da diese Daten nicht vorliegen, wurde in 2014 ein Experiment aufgebaut, an dem solche Messungen durchgeführt werden können. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Kryopanel in relevanter Größe (450x350 mm<sup>2</sup>), das mit einer typischen Aktivkohle für die Sorption beschichtet wurde. Für die Gehäuse- und Schildkomponenten wurden weitgehend Teile der alten, inzwischen demontierten Modell-Kryopumpe verwendet, mit der das Testprogramm für ITER durchgeführt wurde. Abb. 3 zeigt Photos des Versuchsaufbaus.

Für dieses Experiment wurde die Anlage TIMO-2, die viele Jahre stillgelegt war, wieder in Betrieb genommen. Dies bedeutete eine gewaltige Kraftanstrengung des ge-



**Abb. 3:** Blick auf das zu untersuchende Test-Kryopanel (oben) und Einbau des Testeinbaus in die Versuchsanlage TIMO-2 (unten).

samten Bereichs. Die Anlage soll jetzt solange für DEMO-relevante Tests verwendet werden, bis die Abnahmetests der ITER-Prototyppumpe anstehen (voraussichtlich 2016), wofür dann weitere Umbauten nötig werden.

Schließlich werden im Rahmen des DEMO-Entwicklungsprogramms auch noch Pumpen für Neutralteilcheninjektoren (NBI) entwickelt. Hierfür könnten auch die neuen Diffusionspumpen eingesetzt werden, aber alternativ dazu wird die Verwendung von neuen Gettermaterialien diskutiert. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine deutlich höhere Pumpkapazität aufweisen, eine zwingende Voraussetzung bei den erwarteten relativ hohen Drücken und Gasdurchsätzen. Hierzu wird im Bereich Vakuumtechnik derzeit eine neue Testanlage gebaut, mit der solche Materialien im nächsten Jahr charakterisiert werden können. Dies geschieht in Zusammenarbeit mit dem Gettermaterialhersteller SAES Getters aus Mailand, Italien.

### DEMO Physikprogramm

Das Plasmaszenario für DEMO wird sich wesentlich von dem von ITER unterscheiden. So ist es nötig, ein Divertorplasma 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, denn durch ein 'richtiges' Einstellen der Teilchendichten auf der Unterseite des Divertors kann dieser Modus stark beeinflusst werden. Zu diesem Thema wurde in 2014 eine Studie durchgeführt, die dies klar aufzeigt.



Aus diesem Grund haben wir uns in diesem Jahr stark darauf konzentriert, unsere Fähigkeiten zur Simulation der Neutralteilchen im Sub-Divertorbereich zu erweitern und weiter zu etablieren. Dies ist eine sehr komplexe Angelegenheit, da man bei der vorliegenden

Strömungsform die Teilchen-Teilchen-Wechselwirkungen nicht mehr vernachlässigen kann. Der Divertor ist eine nach allen Seiten (auch zum Plasma hin) offene Struktur. Somit tritt das Problem auf, dass das Saugvermögen der angeschlossenen Vakuumpumpen im Wettbewerb steht mit dem Plasma, das ebenfalls eine Saugwirkung zeigt. Die resultierende Neutralteilchendichte im Divertor ist daher eine sehr sensitive Größe.

Der neu entwickelte Code, der das Konzept der DSMC-Simulation (Direct Simulation Monte Carlo) zur Beschreibung der Boltzmann-Gleichung verwendet, wurde mit den benötigten Randbedingungen auf der open-source Plattform openfoam implementiert. Danach wurde der Code (in 2D) mit experimentellen Daten von JET und ASDEX-Upgrade validiert. Die Ergebnisse waren überzeugend. Abb. 4 zeigt am Beispiel der Dichteverteilung des ASDEX Voll-Wolfram Divertors den Weg von der Realität zum Simulationsergebnis.

### Arbeiten für ITER

Die Arbeiten für ITER fokussierten sich in 2014 auf die 1:1 Prototypen der Torus-Kryopumpe und der NBI-Kryopumpe. Für die prototypische Torus-Kryopumpe wurden die Beschichtungen der Aktivkohlepanels nach Spezifikation von F4E (die europäische Fusionsagentur 'Fusion For Energy') zum Abschluss gebracht.

Des Weiteren wurden die bereits aus früheren Studien (2007) bekannten Leitwertberechnungen des ITER-Divertorpumpensystems an das aktuelle Design der Divertorkassetten angepasst und aktualisiert.

Für die NBI-Vakuumanlage agiert der Bereich als Unterauftragnehmer der italienischen Fusionsassoziation Consorzio RFX. Hier wurden ausführliche seismische Analysen des Restionenfängers durchgeführt sowie systematische CFD Studien zum Detaildesign von Turbulenz-Promotoren im Kühlsystem. Die sehr erfolgreiche Zusammenarbeit mit RFX wird vertraglich bis 2019 weitergeführt; im nächsten Jahr wird sich die Gruppe mit den restlichen Komponenten des NBI Strahlsystems auseinandersetzen.

### Gasabgabe und Vakuumdruckmesstechnik

Der Exzellenz-Grant innerhalb des Europäischen Metrologieprogramms lief 2014 ebenso aus wie das Europäische Netzwerk VACU-TEC für vakuumtechnische Entwicklungen auf dem Gebiet der Fusion. Mit der Ausgasanlage OMA wurden in 2014 systematische Untersuchungen an Wolfram-Proben als typische Materialklasse für die erste Wand eines DEMO-Reaktors durchgeführt, die überraschende Ergebnisse zeigten. Skaliert man die Versuchsergebnisse auf die Verhältnisse bei DEMO hoch (was allerdings mit einer beträchtlichen Unsicherheit verbunden ist), so findet man, dass die Gasabgaberate ein massives Problem darstellen könnte, insbesondere kann der Ausgaseffekt die Abpumpzeit zwischen zwei Plasmaentladungen sehr stark verlängern. Erste Abschätzungen zeigen hier Abpumpzeiten von 1000s oder mehr, was angesichts von Pulszeiten in der Größenordnung 2 h nicht akzeptabel wäre. Diese alarmierenden Ergebnisse wurden auf der SOFT-Konferenz 2014 vorgestellt, es wird jetzt innerhalb EUROFUSION eine entsprechende Arbeitsgruppe eingerichtet, die sich diesem Problem aus verschiedenen Blickwinkeln widmen soll.

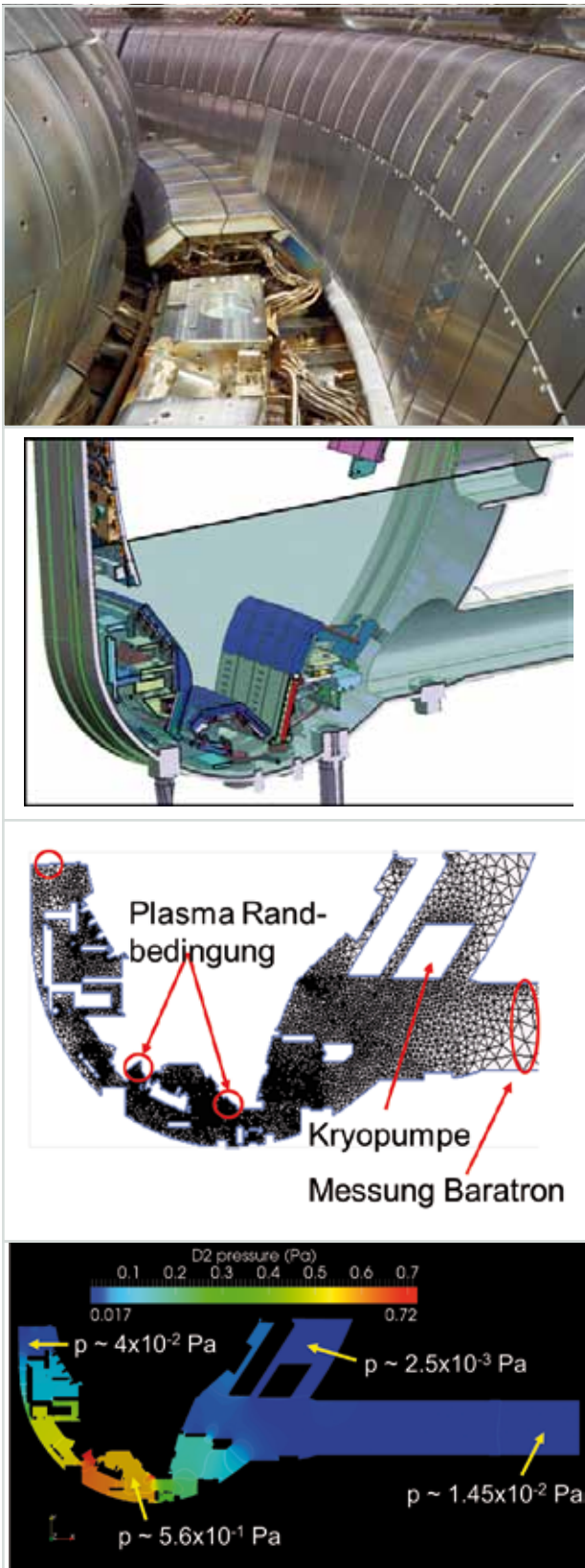


Abb. 4: Entwicklungspfad von der Realität (Photo des ASDEX-Divertors, oben) über die CAD-Erstellung und Vernetzung bis zum Simulationsergebnis (2D-Druckverteilung für eine gewählte Randbedingung, unten).

### Highlight 2014 Vakuumtechnik: Dr. Christian Day und Thomas Giegerich gewinnen den Europäischen Innovationspreis.

Die vielversprechenden Arbeiten des Bereichs für DEMO und die Entwicklung des KALPUREX-Prozesses wurden mit dem ‚European Prize for Innovation in Fusion Research‘ ausgezeichnet, der am 30. September 2014 auf einer Feierstunde im Rahmen der SOFT-Konferenz verliehen wurde.

Der neue Prozess vereinfacht die gegenwärtig verwendeten Verfahren zur Brennstoffaufreinigung und –rückgewinnung durch Einführen einer zusätzlichen Trennstufe, die einen reinen Brennstoffstrom erzeugt und diesen direkt in die Maschine rückführt. Darüber hinaus verwendet der Prozess Vakuumpumpen, die Flüssigmetalle als Arbeitsmittel verwenden. Daher kommt auch der Name: KALPUREX-Prozess, ein Akronym für ‚Karlsruhe liquid metal based pumping process for fusion reactor exhaust gases‘.

#### Wie vereinfacht der KALPUREX-Prozess die gegenwärtig verwendeten Verfahren zum Abpumpen der Plasmakammer?

In praktisch allen derzeit laufenden größeren Fusionsanlagen werden als Hochvakuumpumpen Kryopumpen verwendet, die Vakuumerzeugung erfolgt also nach dem thermischen Prinzip. Da die zu pumpenden Gasströme und damit die abtransportierenden Wärmelasten sehr groß sind (etwa 100 mal höher als in kommerziellen Pumpen), müssen speziell für diesen Zweck entwickelte Pumpenvarianten verwendet werden. Dies war eine der Hauptaufgaben unserer Abteilung in den letzten 20 Jahren. So wurden spezielle Designs für Kryopumpen verschiedener Größen entwickelt, bis hin zu einem Saugvermögen von mehreren 1000 m<sup>3</sup>/s für Wasserstoff.

Bei den bisherigen Fusionsanlagen können die bekannten Nachteile der Kryopumpen, nämlich der diskontinuierliche Betrieb, der bei hohen Durchsätzen zu relativ kurzen Pumpzeiten und häufigen (und damit teuren) Regenerationszyklen führt sowie die für den Betrieb äußerst komplexe und teure Kryo-Infrastruktur akzeptiert werden. Grund hierfür ist der Umstand dass sich bei diesen experimentellen Anlagen die Zeiten typischer Plasmaentladungen in der Größenordnung von Sekunden bewegen, so dass keine Regeneration während der Entladung nötig ist; auch die Kryo-Infrastruktur ist ohnehin schon vorhanden, da tiefkalte, supraleitende Magnete verwendet werden, um das Magnetfeld für den Plasmaeinschluss zu erzeugen.

Die Kryopumpentechnik kommt schnell an ihre Grenzen wenn man an ein Fusionskraftwerk denkt, wofür Plasmaentladungsdauern von mehreren Stunden angestrebt werden und Hochtemperatur-Supraleiter eingesetzt werden sollen, die keine Tieftemperaturanlage mehr benötigen. Dies war für uns der Anlass, die Vakuumtechnik für ein Fusionskraftwerk noch einmal komplett zu überdenken. Wir kamen schließlich auf einen Pump-Prozess, der kontinuierlich arbeitet, der keinerlei kryogene Infrastruktur benötigt und zudem eine neue Funktionalität in die Vakuumpumpen einbaut, nämlich die Trennung von Wasserstoff und Helium bereits in der ersten Pumpstufe. Dadurch wird der nachfolgende Aufbereitungsprozess für die abgepumpten Gase wesentlich vereinfacht und auch das für den Betrieb notwen-

dige Gesamtinventar an Gasen erheblich reduziert, was aus wirtschaftlicher und sicherheitstechnischer Sicht essentiell für ein kommerzielles Kraftwerk ist.

#### Welche Pumpen setzen wir für den Prozess ein?

Der KALPUREX Prozess basiert auf Diffusionspumpen und nachgeschalteten Flüssigkeitsringpumpen hermetischer Bauart, für die Separation werden Metallfolien verwendet. Die Diffusionspumpen müssen dabei während der Plasmaentladung in einem für Vakuumpumpen untypisch hohen Druckbereich arbeiten. Daher werden am Pumpenausstritt Jet-Stufen vorgesehen, die die nötige Kompression liefern, um in einen Druckbereich zu gelangen, bei dem die Ringpumpe gut arbeitet. Hierbei wird bereits ausgenutzt, dass bedingt durch die Verwendung von Flüssigmetall als Arbeitsmittel in der Ringpumpe der mögliche Einlassdruck – in der Regel begrenzt durch den Dampfdruck des Arbeitsmittels – um Größenordnungen herabgesetzt werden kann. Die Metallfolien schließlich werden im Bereich der sog. Superpermeabilität betrieben. Dafür wird der Wasserstoff im zu pumpenden Gas zunächst ionisiert und dann neutralisiert. Die Atome erhalten dabei eine gewisse Energie, die dazu führt, dass sie die heiße Folie durchdringen können und schließlich auf der Rückseite zu molekularem Wasserstoff rekombinieren. Damit ist auch eine, wenn auch nur moderate Kompression des Wasserstoffs möglich. Dieser Effekt ist für Helium nicht vorhanden, so dass das durchtretende Gas reiner Wasserstoff ist, während das zurückbleibende Gas an Helium angereichert wird.

#### Welchen Anforderungen müssen die Pumpen standhalten? Was bedeutet das für Konstruktion und Auslegung?

Nun, die Anforderungen sind durchaus anspruchsvoll. Zunächst herrschen am Aufstellungsort der Pumpen hohe Magnetfelder und eine starke Neutronenstrahlung, die die Pumpen während des Betriebs aushalten müssen. Darüber hinaus kommt das größte Problem durch das Tritium selbst: Tritium hat die Eigenschaft in einer Isotopenaustauschreaktion den normalen Wasserstoff (der in allen organischen Substanzen vorhanden ist) zu ersetzen, also beispielsweise in allen organischen Werkstoffen, die mit Tritium in Kontakt stehen (wie z.B. Elastomerdichtungen). Bedingt durch den anschließenden Zerfall von Tritium entsteht dann Helium, wodurch die Werkstoffe degradieren. Dies ist das Hauptproblem in der Auswahl geeigneter Pumptechnologien und erfordert mindestens eine Modifikation kommerzieller Vakuumpumpen, oft ist dies sogar überhaupt nicht möglich, ohne die Leistung der Pumpen zu sehr zu verschlechtern.

Ein klassisches Problem insbesondere für die Vorpumpentechnologie ist die erforderliche hermetische Dichtheit zwischen Prozessgas- und Getrieberaum, da eine Kontamination des Öls mit Tritium bzw. des Tritiums mit Öl nicht akzeptiert werden kann. Bei heutigen Anlagen nimmt man daher die üblicherweise kürzeren Standzeiten von trockenlaufenden Maschinen in Kauf oder man verwendet konventionelle Vorpumpen und ersetzt sie in regelmäßigen Abständen durch neue. Dies ist natürlich für ein Fusionskraftwerk, das auf maximale Verfügbarkeiten der nötigen technischen Systeme angewiesen ist, keine Option. Unsere einfache Idee war es, anorganische tritiumkompatible Arbeitsmittel zu verwenden und damit das Öl in der Diffusionspumpe bzw. das Wasser in der Ringpumpe zu ersetzen, nämlich durch Flüssigmetalle.

Was nun die Auslegung solcher neuartiger Pumpen für die Kernfusion angeht, so müssen auch hier neue Wege gegangen werden. Bedingt durch die Tatsache, dass die Diffusionspumpen nicht nur im klassischen Ultrahochvakuum-Bereich betrieben werden, sondern vor allem im Bereich höherer Drücke, können vorhandene Designs nicht einfach weiterverwendet werden. Wir haben daher begonnen ein modernes Auslegungswerkzeug zu entwickeln. Hier kommt uns unsere langjährige Expertise im Bereich der Vakuumgasdynamik und der Simulation verdünnter Gasströmungen sehr zu gute. Die Erfahrung mit alten Quecksilberdiffusionspumpen wäre von hohem Wert für uns, leider wurden diese Pumpen bis heute komplett durch Öldiffusionspumpen ersetzt, so dass kaum noch Erfahrungsträger zu finden sind. Bei den Flüssigkeitsringpumpen haben wir eine Zusammenarbeit mit der Fa. HERMETIC-Pumpen GmbH, Gundelfingen gestartet und gehen den Weg der Modifikation einer bekannt funktionierenden Pumpe. Insbesondere die mechanische Auslegung für ein Arbeitsmittel mit Dichten, die um Größenordnungen höher sind als die von Wasser, ist eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Wir sind froh, dass wir hier von Anfang an auf industrielle Erfahrung zurückgreifen können.

### Was war nötig, damit die Pumpen Flüssigmetalle als Arbeitsmittel verwenden?

Dies betrifft insbesondere die richtige Materialauswahl. Für Quecksilber zum Beispiel kann man (bei moderaten Temperaturen) Edelstahl oder auch herkömmlichen Schwarzstahl verwenden. Bei höheren Temperaturen, wie sie beispielsweise im Verdampfer der Diffusionspumpen zu finden sind, mussten wir uns etwas anderes einfallen lassen: Hier kommt Edelstahl zum Einsatz, dessen Oberfläche mit einer Glasschicht überzogen wurde. Dadurch können wir eine hohe chemische Beständigkeit gegen das Flüssigmetall mit einer niedrigen Permeabilität für das Tritium kombinieren, was wiederum sicherheitstechnisch bedeutsam ist. Ferner kommen nur ganzmetallische, federbelastete Dichtungen mit Reineisen-überzug zum Einsatz sowie Keramiken.

### Wie lange hat der Entwicklungsprozess gedauert?

Derzeit haben wir erfolgreich die 'Proof-of-Principle'-Phase hinter uns gebracht. Das heißt, für alle drei Pumpentypen (Metallfolienpumpe, Diffusionspumpe, Flüssigkeitsringpumpe) wurde in provisorischen Laboraufbauten (wobei wir zunächst Quecksilber als Flüssigmetall wählten) nachgewiesen, dass sie funktionieren. Die zündende Idee kam uns im Jahr 2011, wo wir den konkreten Arbeitsauftrag, ein Vakuumsystem für ein europäisches Demonstrationsfusionskraftwerk zu entwickeln, angenommen haben. Im ersten Jahr machten wir eine ausführliche Studie, um die technische Reife existierender Konzepte zu bewerten und eventuelle Lücken im existierenden Technologieportfolio zu finden. Im Folgejahr waren wir weitestgehend damit beschäftigt, die notwendigen Fördermittel für Demonstrationsexperimente zu beantragen. Bis 2013 konnten wir die Diffusionspumpentechnologie qualifizieren, 2014 dann die Metallfolien- und Ringpumpentechnologie. Im Jahre 2014 wurde uns auch das Patent verliehen.

Wann soll das erste Demonstrationskraftwerk fertiggestellt und in Betrieb genommen werden?

Das erste Demonstrationskraftwerk ist auf der Forschungsagenda verschiedener Staaten auf der Welt, teilweise mit einem sehr herausfordernden Zeitplan. Ins-

besondere stark wachsende Nationen wie Indien oder China sehen die Kernfusion als alternativlos zur Sicherung des durch die Zunahme der Bevölkerung immer mehr wachsenden Energiehungerers. Die europäische Planung sieht die Erarbeitung des Konzeptdesigns eines europäischen Kraftwerks bis 2020 vor. Danach wird sich eine weitere Engineering-Phase von 10 Jahren anschließen, in der das detaillierte Design aller Komponenten entwickelt wird. Geht man dann noch von weiteren 10 Jahren für die Lizenzierung und den Bau aus, so könnte das Demonstrationskraftwerk in den 2040er Jahren Strom ins Netz einspeisen.

Was die Vakuumpumpen angeht, so möchten wir in den nächsten Jahren für alle drei Pumpentypen einen Prototyp in relevanter Größe entwerfen, bauen und charakterisieren (idealerweise unter Fusionsbedingungen an existierenden Maschinen). Parallel dazu entwickeln wir die Auslegungswerkzeuge, die wir dann an den experimentellen Daten unserer Prototypen validieren können. Dies erlaubt uns in Zukunft eine einfache und schnelle Anpassung unserer Pumpen an die wechselnden Erfordernisse von Fusionskraftwerken oder an andere Anwendungen ohne oder mit nur minimalem experimentellem Zusatzaufwand. Wir sehen insbesondere bei den Vorpumpen ein klares Potential, die existierenden Vorteile auch für andere Anwendungen außerhalb der Fusion zu realisieren.



Abb. 5: Eindrücke von der Preisverleihung in San Sebastian, Spanien.



Tiefe Einblicke in den Ölabscheider F1210 der 2 kW-Helium-Tieftemperaturanlage.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Kryotechnik

Leitung: Dr. Holger Neumann

### Kryoinfrastruktur

Im Jahr 2014 betrieb der Bereich Kryotechnik erfolgreich die ITEP Helium-Tiefteplantzenanlagen sowie die gesamten Rückgewinnungssysteme. Kleinere Ausfälle behob das Team umgehend durch fachgerechte Instandsetzungsmaßnahmen.

Die Arbeiten umfassten unter anderem:

- Erneuerung von Rohrleitungen mit Sicherheitsfunktion
- Abnahmetests und Upgrade von PCS 7 auf Version 8
- Kaltlecktests an Schweißverbindungen von Materialproben
- Wiederkehrende Prüfungen an Behältern und Anlagenteilen
- Reparatur eines Totschadens am Triebwerk des Rückverdichters V40
- 20 000 Stunden Service am Rückverdichter V20
- Revision des Rückverdichters V29
- Austausch defekter Hochdruckschläuche
- Instandsetzung von defekten Ventilen und Armaturen
- Umbau von Endlagenschaltern an Ventilen und Hochdruckreinigung
- Austausch von Messumformerschränken
- Modernisierung der Standard-Vakuumpumpensteuerung



Abb. 1: Instandsetzungsarbeiten am Hochdruckventil zwischen Helium-Reinigung und Reinspeichern.

Die 300 W-Helium-Tiefteplantzenanlage war im Betriebsjahr 2014 insgesamt 1 227 Stunden in Betrieb. Davon entfielen 400 Stunden auf den Verflüssigungsbetrieb und 77 Stunden auf den Spülbetrieb sowie das Kalt- und Warmfahren der Anlage, sodass diese insgesamt 750 Stunden reine Kälteleistung für Experimente im Hochfeldmagnetbereich und für das Magnetykrostsystem FBI erbrachte.



Abb. 2: Kaltlecktests an VA-Cu-Schweißverbindungen von Materialproben.

Die 2 kW-Helium-Tiefteplantzenanlage war 2014 für 1 825 Stunden in Betrieb. Davon entfielen 466 Stunden auf den Verflüssigungsbetrieb, 194 Stunden auf den Spülbetrieb und das Kalt- und Warmfahren der Anlage. Somit erbrachte diese 1 165 Stunden reine Kälteleistung für Experimente im Bereich Fusion.

Insgesamt wurden mit den Anlagen ca. 184 852 Liter Helium verflüssigt. Davon wurden 124 657 Liter für Experimente des ITEP verwendet. 60 195 Liter gingen an Fremdinstitute.

Die 500 W-Helium-Tiefteplantzenanlage für das KATRIN-Experiment wurde im Jahr 2014 zu Wartungszwecken betrieben und steht nun für Ihren Einsatz bereit. Notwendige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten wurden an allen Tiefteplantzenanlagen sowie den Reinigungs- und Speicheranlagen umgehend ausgeführt. Darüber hinaus nahm das Team auch wieder einige Modernisierungsmaßnahmen vor.

Weiterhin unterstützten die Mitarbeiter die Lecksuche und die Inbetriebnahme der Prozessleittechnik an CuLTka und wirkten federführend bei der Einbindung der Testanlage in die Kryoinfrastruktur.



Abb. 3: Reparatur eines Totschadens am Triebwerksgehäuse des V40.

## Kryotechnik für REUN

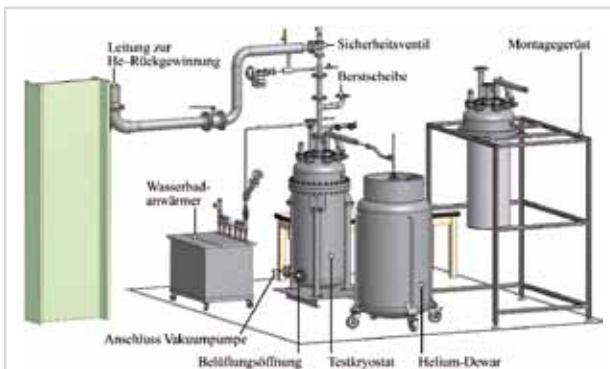
### Veröffentlichung des DIN SPEC 4683 zur Sicherheit von Flüssighelium-Kryostaten

Flüssighelium-Kryostaten sind in Anwendungen der Supraleitung weit verbreitet. Bei Normaldruck und einer Siedetemperatur von 4,2 K ist die Verdampfungsenthalpie des Heliums mit 2,6 kJ/l etwa um den Faktor 835 niedriger gegenüber Wasser bzw. um den Faktor 62 niedriger gegenüber dem bei 77 K siedenden Stickstoff. Gleichzeitig sind die in supraleitenden Magneten gespeicherte Energie und die Temperaturdifferenz zur Umgebung hoch, sodass es im Störfall zu einer nahezu schlagartigen Verdampfung des Heliums kommt. Die Folge ist ein sehr schneller Druckanstieg in den Druckbehältern, der durch geeignete Sicherheitseinrichtungen zu begrenzen ist.

Die zur Umsetzung der Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU etablierten Regelwerke, wie die AD 2000-Merkblätter oder die DIN EN 13445, bilden die besonderen Bedingungen in Flüssighelium-Kryostaten nicht ausreichend ab. Deshalb gründete sich im September 2010 auf Initiative und unter Leitung des ITEP der DIN Arbeitsausschuss NA 016-00-07 AA. In diesem fanden sich 17 Vertreter von Forschungszentren und Universitäten, Behälter- und Anlagenbauern sowie Herstellern von Sicherheitsarmaturen zusammen. In vierjähriger Arbeit mit acht koordinierenden Sitzungen erarbeitete der Ausschuss die Spezifikation DIN SPEC 4683 und veröffentlichte deren Entwurf im Sommer 2014. Das 74-seitige Dokument behandelt wesentliche Aspekte der Konzeption, der Auslegung, der Konstruktion und des Betriebs von Sicherheitseinrichtungen für Flüssighelium-Kryostaten. Damit bietet es Verfahreningenieuren, Herstellern von Sicherheitsarmaturen und Anlagenbetreibern erstmals eine umfassende und strukturierte Handlungsanleitung für die Druckabsicherung von Flüssighelium-Kryostaten.

### Konzeption und Bau des PICARD-Versuchsstands

Wesentliche Einflussgrößen zur Druckabsicherung von Flüssighelium-Kryostaten basieren auf wenigen experimentellen Daten. Deshalb konzipierte der Bereich Kryotechnik des ITEP den in Abbildung 4 dargestellten PICARD-Versuchsstand, mit dem sich der Betrag und die Zeitabhängigkeit des Wärmeeintrags bei verschiedenen Störfallszenarien untersuchen lassen. Außerdem sind Versuche zum Einfluss der Zweiphasenströmung und zur Bestimmung der Ausflussziffer von Sicherheitseinrichtungen bei tiefen Temperaturen möglich, für die



**Abb. 4: Aufstellungsplan des Experiments PICARD (Pressure Increase in Cryostats and Analysis of Relief Devices)**

bisher keine experimentellen Daten verfügbar sind. Der in seiner Art einzigartige Versuchsstand ermöglicht Tieftemperaturexperimente mit Helium und anderen Tiefsiedern bei Drücken bis zu 16 bar und abzuführenden Helium-Massenströmen bis zu 3,5 kg/s. Der Versuchsstand geht Anfang 2015 in Betrieb. Eine Kooperation mit dem CERN ist in Vorbereitung.

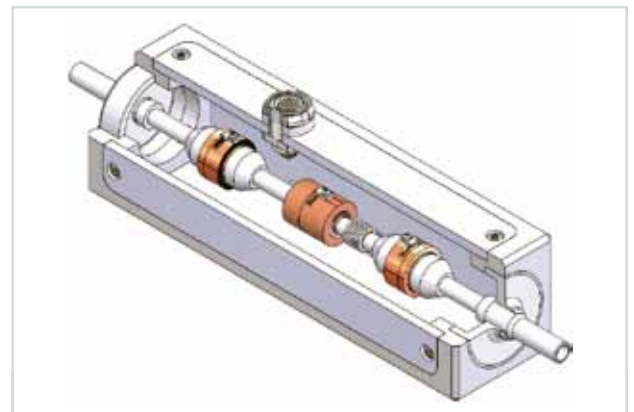
### Technologietransferprojekt zur Entwicklung kryogener Durchflusssensoren

Am KIT wurde in den vergangenen Jahren ein neues thermisches Messverfahren zur Durchflussmessung entwickelt, das sich grundlegend von etablierten Verfahren unterscheidet. Herausragendes Merkmal ist die Fähigkeit zur Eigenkalibrierung während des Betriebs, was beispielsweise bei Tieftemperaturanwendungen von großem Vorteil ist. Nun startete ein gemeinsames Technologietransferprojekt mit der Firma WEKA AG zur Entwicklung von Durchflusssensoren für Helium- und Wasserstoffanwendungen. Vom KIT sind neben dem ITEP das Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) sowie das Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) beteiligt. Das Transferprojekt erhielt im Frühjahr 2014 den ersten Preis im KIT-Innovationswettbewerb NEULAND. Experimente mit dem in Abbildung 5 dargestellten Prototyp sind für Frühjahr 2015 geplant.

### LIQHYSMES (LIQuid HYdrogen & SMES)

Beim Hybrid-Energiespeicher LIQHYSMES soll flüssiger Wasserstoff den weitaus größten Energieanteil speichern. Ein eingebundener supraleitender Magnet dient vor allem dazu, kurzzeitige Schwankungen aus dem Netz zu kompensieren und die Zeit zu überbrücken, welche die Aufwärmung und Verstromung des Wasserstoffs in einer Brennstoffzelle oder Gasturbine benötigen. Damit kann das Gesamtsystem sowohl kurzzeitige als auch längere Schwankungen der Einspeisung aus regenerativen Energiequellen kompensieren und damit Versorgungssicherheit und Netzstabilität gewährleisten.

Die Verflüssigung des Wasserstoffs dient vor allem dazu, eine hohe volumetrische Energiedichte zu erzeugen. In klassischen Verflüssigungsanlagen (Brayton, Claude etc.) erfordert die Verflüssigung von Kryogenen einen hohen Energieaufwand. Demgegenüber besitzt LIQHYSMES als zentrale Komponente eine neuartige Re-



**Abb. 5: Prototyp eines kryogenen Durchflusssensors für Helium-Massenströme von 0,5-12 g/s, Betriebstemperaturen von 4-300 K und Drücke bis 50 bar (Grafik: WEKA AG).**

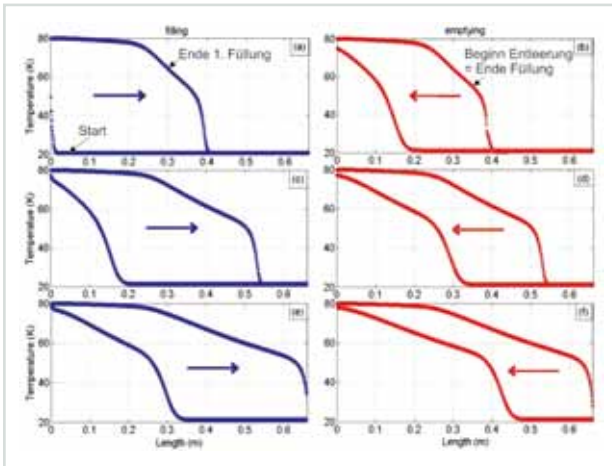


Abb. 6: Temperaturverlauf der Regeneratorschüttung für drei Zyklen.

generator/Rekuperator-Einheit. Bei der Verflüssigung entzieht das Regeneratormaterial – in diesem Fall eine Schüttung aus Bleikugeln – dem einströmenden warmen Wasserstoff Energie und kühlt ihn dadurch ab, sodass der Wasserstoff letztendlich mit einem Joule-Thompson-Ventil entspannt und verflüssigt wird. Da die Verflüssigung nicht hundertprozentig ist, durchströmt der kalte Gasstrom nach der Entspannung den Regenerator rückwärts durch ein beripptes Rohr (Rekuperator-Funktion) und nimmt dabei Energie auf, wird also aufgewärmt. Bei der Entleerung, das heißt der Energiebereitstellung durch Wasserstoff, wird der verflüssigte Wasserstoff über eine leichte Druckerhöhung rückwärts durch das Regeneratormaterial geleitet. Dabei nimmt der Wasserstoff die gespeicherte Energie des Regeneratormaterials auf, sodass sich dieses abkühlt und der Wasserstoff erwärmt wird.

Abbildung 6 zeigt drei Zyklen der Befüllung und Entleerung, wobei die Temperaturen über der Länge für Beginn und Ende des jeweiligen Zyklus dargestellt sind.

Die, auf die Irreversibilität des Wärmeüberganges zurückgehende allmähliche Erwärmung des Regeneratormaterials muss durch externe Kälteleistung kompensiert werden, welche ebenfalls in dieser Regenerator/Rekuperator-Einheit zu integrieren ist.

#### SUPRAPOWER (Superconducting, reliable, lightweight, and more powerful offshore wind turbine)

Für das Projekt SUPRAPOWER wurde der Isolationsaufbau eines modularen Kryostaten (Abb. 7a) ausgelegt und der resultierende Wärmeeinfall damit, gegenüber der Ursprungsversion, erheblich reduziert. Für die Validierung der Rechnungen wurde eine Dummy-Spule mit integrierten Heizern zur Simulation von Verlusten konstruiert und aufgebaut (Abb. 7 b u. c)

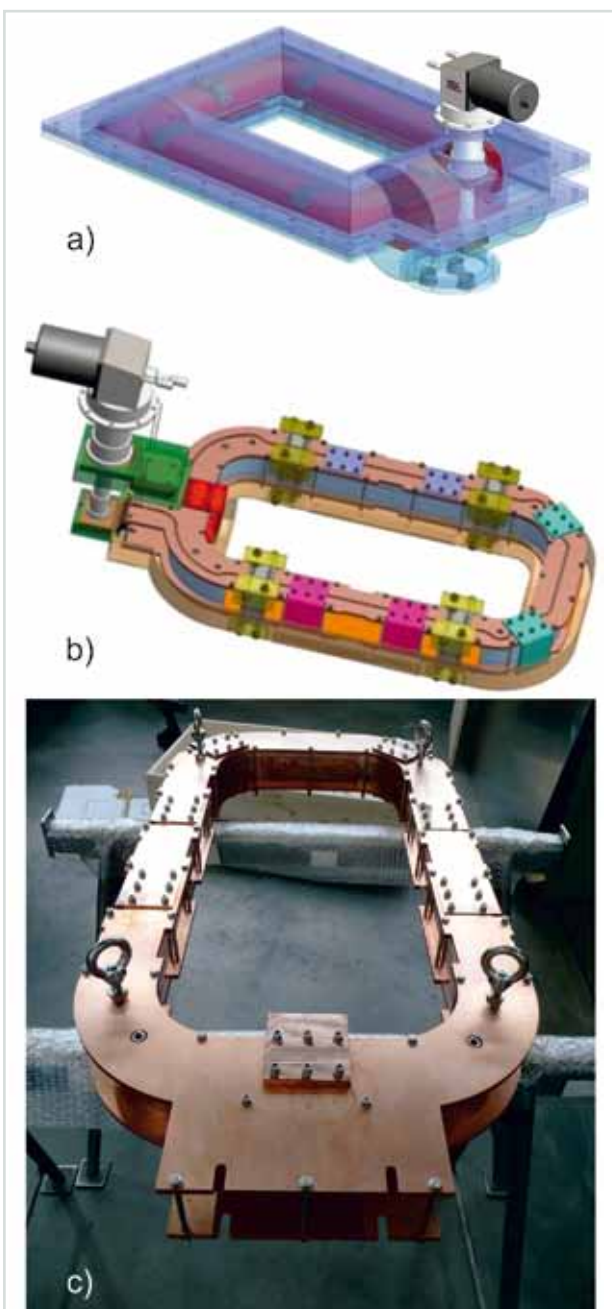


Abb. 7: Kryostat und Dummy-Spule für SUPRAPOWER.

### Highlight Aufbau, Inbetriebnahme und erfolgreicher erster Stromzuführungstest in CuLTKa

Innerhalb des Programms Fusion konzentrierte sich der Bereich Kryotechnik 2014 auf die Inbetriebnahme der CuLTKa-Anlage (Current Lead Test facility Karlsruhe) und den Test des ersten Stromzuführungspaares für das internationale Projekt JT-60SA.

Die Auslegung des Versuchsstands CuLTKa begann 2008 mit dem Ziel, Stromzuführungen ( $I > 20$  kA) möglichst effizient und kostengünstig in Serientests zu prüfen. Nach der verfahrenstechnischen Auslegung der Gesamtanlage, die in die bestehende Kryoinfrastruktur einzubinden war, erfolgte die Spezifikation der Komponenten, die industriell gefertigt wurden. Die Fertigung der Kryostaten und der Aufbau des gesamten Kryosystems erfolgten am KIT. Die Anlage besteht im Wesentlichen aus:

- Ventilbox zur Verteilung des kryogenen Massenstroms auf CuLTKa, TIMO, FBI und weitere optional anschließbare Einrichtungen
- Coldbox zur Verflüssigung von He und Bereitstellung der für die SZF benötigten Massenströme auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus. (4,5 K-Kreislauf zur Kühlung des Kurzschlussbügels; 50 K-Kreislauf zur Kühlung des HTS-Moduls)
- Ventilbox zur Verteilung der Heliummassenströme auf zwei Testkryostaten

- Zwei Testkryostaten zur wechselseitigen Nutzung, um die Testabläufe zu beschleunigen
- Transferleitungsabschnitte zur Verbindung der einzelnen Kryostaten
- LN<sub>2</sub>-System zur Versorgung der Kühlschilde in den Kryostaten
- Vakuumsystem für Transferleitungen und Kryostaten
- MSR-Infrastruktur, bestehend aus Messtechnik (Temperaturen, Füllstände, Massenströme, Drücke bzw. Differenzdrücke etc.), Schaltschränke mit PCS 7 zur Steuerung der Kryoanlage
- Wasserbadanwärmer, He-Analyse, Druckluft und Kühlwasser, eingebunden in die bestehende Infrastruktur

Die Inbetriebnahme erfolgte 2014 und stellt einen herausragenden Erfolg dar.

Die reibungslose Inbetriebnahme der Anlage ist Ergebnis sorgfältiger Auslegung und gewissenhafter Qualitätssicherung, in die umfangreiche Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten eingeflossen sind. Zu ihr gehörte die Prüfung aller Komponenten und Baugruppen vor dem Einbau in das Kryosystem. So wurde jede einzelne Schweißnaht und Verschraubung vorab einem Einzeleckttest unterzogen. Abschließend wurde ein integraler Leckttest der gesamten Baugruppe unter kalten Randbedingungen durchgeführt. Kritische Komponenten, wie Kryostaten, Transferleitungen, He-Kryostat und LN<sub>2</sub>-Schilde, wurden vor dem Einbau einem Kalttest unterzogen.



Abb. 8: Abnahmetest der Transferleitungen bei Cryotherm.





Abb. 9: Eingebaute JT-60SA Stromzuführungen.

Dank dieser Maßnahmen zeigten sich bei der Inbetriebnahme lediglich zwei kleinere Probleme: Während des ersten Abkühlens der Anlage traten in einem Leitungsabschnitt thermoakustische Oszillationen auf. Sie ließen sich durch Anpassung der Leitungsführung außerhalb der Kryostaten beheben. Ein zweites Problem war die nicht funktionierende Sicherheitsabschaltung bei Überfüllung des Heliumbads. Durch Anpassung der Sensoren ließ sich dieses Problem lösen.

Der Test des ersten Stromzuführungspaares für das internationale Projekt JT-60SA wurde im November 2014 bei vollem Strom von 26 kA durchgeführt. Dabei wurden alle Spezifikationswerte erreicht.

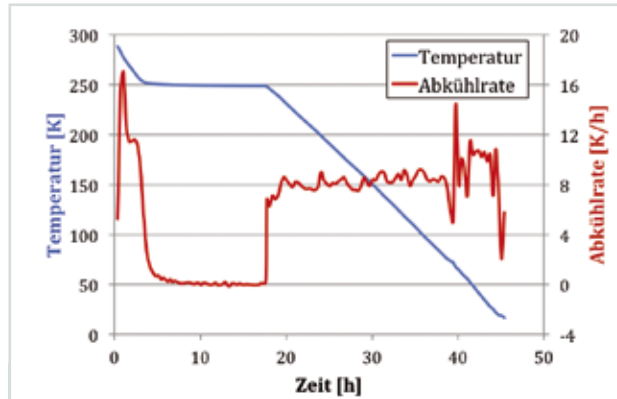


Abb. 10: Erste Abkühlung des Kryosystems.



Abb. 12: CAD-Modell der Testanlage für Stromzuführungen.



Abb. 11: CuLTKa (Current Lead Test facility Karlsruhe).

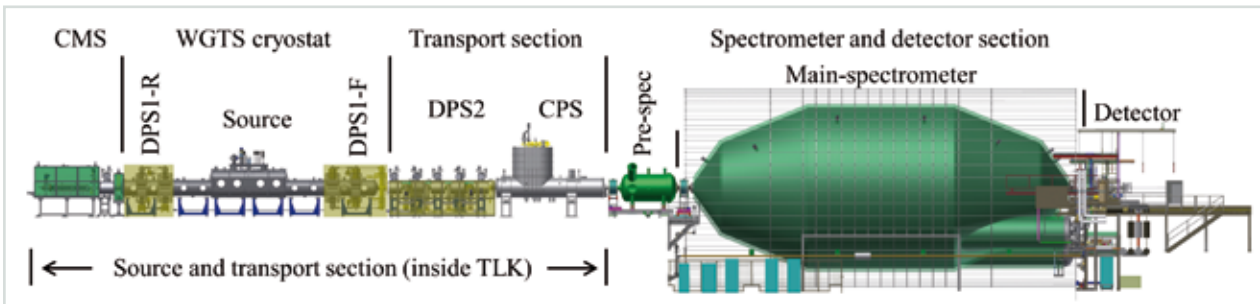


*Neue DPS-Magnetmodule in gekrümmter Anordnung (20°)*

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Karlsruher Tritium Neutrino Experiment KATRIN

Leitung: Dr. Beate Bornschein



**Abb. 1:** Schematische Darstellung des internationalen Großexperiments KATRIN. Die bei  $\beta$ -Zerfällen in einer hochintensiven fensterlosen molekularen Tritiumquelle (WGTS, [a]) entstehenden Elektronen werden über eine Tritiumpumpstrecke mit den aktiven und passiven Elementen DPS2-F und CPS (b) zu einem System (c) aus zwei elektrostatischen Spektrometern (Vor- und Hauptspektrometer) geführt. Die analysierten Elektronen werden in einem Halbleiterdetektor (d) nachgewiesen.

Ziel des Karlsruher 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: Zum einen spielen massebehaftete Neutrinos eine spezifische Rolle als heiße dunkle Materie bei der Evolution großräumiger Strukturen im Universum, zum anderen kommt der Neutrinomasse eine Schlüsselrolle beim offenen Problem der Entstehung von Masse zu.

Das experimentelle Prinzip von KATRIN basiert auf der präzisen Vermessung des Spektrums von Elektronen aus dem  $\beta$ -Zerfall molekularen Tritiums nahe dem kinematischen Endpunkt von  $18,6 \text{ keV}$  – das ist die maximale kinetische Energie der Elektronen. Dazu werden Elektronen aus einer fensterlosen, gasförmigen Tritiumquelle höchster Intensität ( $10^{11}$  Zerfälle/Sekunde) durch starke Magnetfelder von supraleitenden Magneten adiabatisch, das heißt, ohne deren Energie zu verändern, durch die  $70 \text{ m}$  lange Experimentiereinrichtung geführt. Ein System aus zwei elektrostatischen Retardierungsspektrometern ermöglicht, die Elektronenenergien mit einer Auflösung von  $0,93 \text{ eV}$  zu bestimmen (Abbildung 1).

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 (TLK) aufzubauen. Die ersten Daten werden  $2016$  erwartet. 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. Darüber hinaus bedarf es eines funktionierenden Projektmanagements, um die Einteilung der personellen und finanziellen Ressourcen mit

den zeitlichen und inhaltlichen Zielen von KATRIN zu vereinbaren.

Im Rahmen von KATRIN hat das ITEP die verantwortliche Leitung für die Tritiumprozesstechnik sowie für die Kryotechnik inne. Es stellt in diesem Bereich mehrere Teilprojektleiter (Taskleiter). Die Arbeit des ITEP ist zu mehr als  $95 \%$  im sogenannten Quell- und Transportsystem angesiedelt, das in Abbildung 2 als Blockbild dargestellt ist. Wegen der Handhabung großer Mengen an Tritium wird das System komplett im TLK aufgebaut.

Hauptbestandteil ist ein WGTS (Windowless Gaseous Tritium Source) genanntes, supraleitendes Magnetsystem von  $16 \text{ m}$  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 Aufgaben, die Tritiumzerfallselektronen ins Spektrometer zu leiten und gleichzeitig über Pumpen den Tritiumgasfluss ins Spektrometersystem um mehr als zwölf Größenordnungen zu reduzieren. Dies geschieht einerseits mithilfe einer differentiellen Pumpstrecke (DPS2) durch den Einsatz von Turbomolekularpumpen und andererseits – als letzte Stufe – mit einer kryogenen Pumpstrecke (CPS), die bei  $3,5$  bis  $4 \text{ K}$  betrieben wird. Sowohl DPS2 als auch CPS stellen supraleitende Magnetkryostatsysteme von  $7$  bzw.  $9 \text{ m}$  Länge dar. Sie werden bei externen Firmen gefertigt und fertigungsbegleitend von Teams aus IKP, IEKP, ITEP und PPQ betreut.

Zusätzlich dargestellt sind in Abbildung 2 die Tritiumkreisläufe (Inner Loop, Outer Loop), die für eine geregelte Tritiumgaseinspeisung sorgen und die Tritiumreinheit auf Werte von über  $95 \%$  halten. Das gleichzeitige stabile Einspeisen und Abpumpen des Tritiumgases

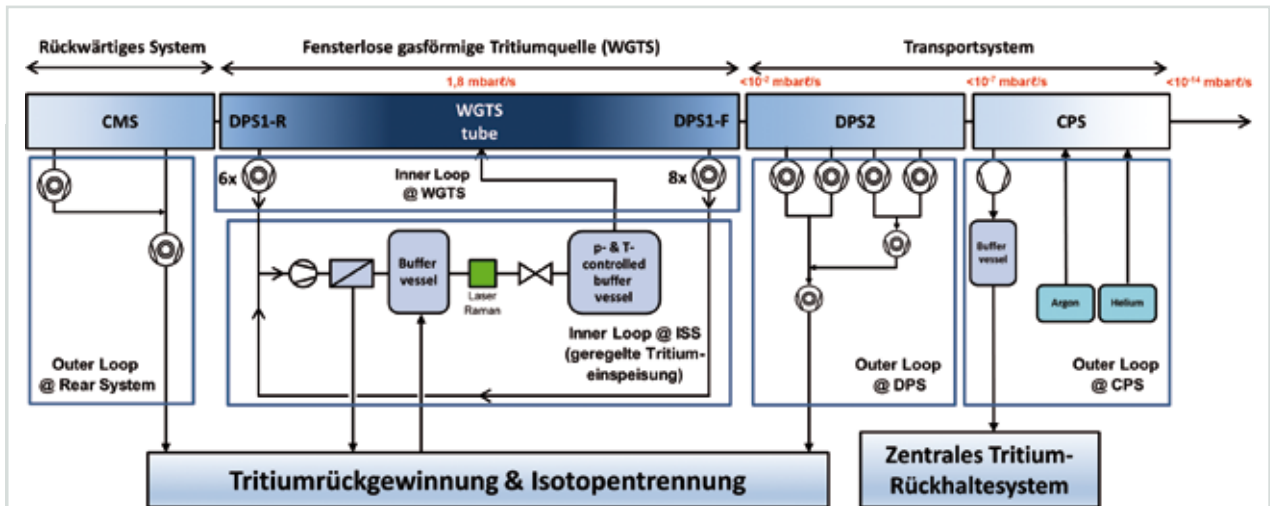


Abb. 2: Blockbild der KATRIN Tritiumquelle und ihrer Schnittstellen zur Infrastruktur des TLK

sorgt letztendlich für eine stationäre Gassäulendichte im Strahlrohr der Tritiumquelle WGTS.

### Die folgenden Abschnitte stellen den Stand der Arbeiten im Einzelnen dar.

#### WGTS

Im Jahr 2014 wurden im Quellbereich des KATRIN-Experiments ebenfalls große Fortschritte verzeichnet. Das 2013 erstellte Montagekonzept der Windowless Gaseous Tritium Source (WGTS) wird seit Januar 2014 konsequent und ohne nennenswerte Rückschläge unter starker Beteiligung und Führung des IKP/IEKP umgesetzt. Alle Unterbaugruppen sind mittlerweile fertiggestellt und bereits gut zur Hälfte montiert. Im September erfolgte die Übergabe der letzten Vorprüfunterlagen zur Montage – ein wichtiger Meilenstein der Endmontage wurde damit fristgerecht erreicht. Gemäß dem Zeitplan wird die Endmontage im Sommer 2015 abgeschlossen sein. Anschließend wird der fertige Magnetkryostat ins TLK gebracht werden.

Neben der Endmontage beim Industriepartner Research Instruments in Bergisch Gladbach liegt der Fokus auch auf der Fertigung und frühzeitigen Bereitstellung aller externen Hilfssysteme (MSR, Magnetsicherheit, Kälteversorgung, Bestromung, Infrastruktur etc.) im TLK, um direkt nach der Lieferung mit der Inbetriebnahme beginnen zu können.

#### DPS2

Nach einem Defekt der Schutzdioden der DPS2-F im Jahr 2011 war eine wirtschaftliche Reparatur der Anlage nicht



Abb. 3: Die Magnete für die neue DPS wurden 2014 angeliefert

mehr möglich. Daher wurde 2012 ein modularer Neubau der DPS mit Einzelmagnetsystemen und einem am KIT entwickelten und zu fertigenden Strahlrohrsystem beschlossen. Die Ausschreibung und Bestellung der Magnete erfolgte 2012. Im Jahr 2014 wurden die supraleitenden Magnete gefertigt und geliefert. Der Abnahmetest unter Leitung des IKP ist für Anfang 2015 geplant.

Das Untergestell und die Strahlrohrelemente wurden bei TID-DGT-TEC (ehemalige Hauptwerkstatt) gefertigt. Die Handschuhbox wurde spezifiziert und bestellt. Die Fertigstellung der Pumping-Ports, ebenfalls bei TID-DGT-TEC, sowie der Zusammenbau zur DPS2 werden Anfang 2015 erfolgen.

#### CPS

Die CPS wird von der Firma ASG in Genua gefertigt. Aufseiten von KATRIN begleitet auch dabei ein institutsübergreifendes Projektteam die Fertigung. Schwerpunkte der Qualitätssicherungsarbeiten im Jahr 2014 lagen auf der Beaufsichtigung des Zusammenbaus der Kaltmasse und auf der Kontrolle der einzelnen Fertigungsschritte mit Schweißinspektionen und Lecktests. Dazu wurde auch auf KIT-externes Personal zurückgegriffen. Nach dem Zusammenbau der gesamten Kaltmasse mit Strahlrohr, Pumping-Ports, Argonkapillaren und sieben Magnetmodulen wurden weitere elektrische Busbar-Verbindungen in der He-Rückleitung hergestellt. Anschließend an die weitere Instrumentierung wurde die Kaltmasse mit Superisolation umwickelt und anschließend mit dem LN<sub>2</sub>-Shield in den Vakuumbehälter eingebracht (Abbildung 4) – ein wichtiger Schritt zum vollständigen Zusammenbau.

Der Zusammenbau der CPS in Genua wird noch einige Monate in Anspruch nehmen. Nach dem aktuellen Zeitplan wird die CPS im April 2015 an das TLK geliefert werden.



Abb. 4: Einbau der Kaltmasse in den Vakuumbehälter

## Tritiumkreisläufe

Die Tritiumkreisläufe von KATRIN werden im TLK entwickelt und aufgebaut, unter anderem im Rahmen von Bachelor-, Diplom- und Doktorarbeiten. 2014 konzentrierten sich die experimentellen Arbeiten auf den Aufbau neuer Testexperimente und auf die Fortführung der Messungen mit TriToP (Tritium Test of Pumps). Das wichtige Testexperiment TriADE (Tritium Adsorption Desorption Experiment) wurde ebenfalls fortgesetzt.

Bei TriToP war 2012 eine magnetisch gelagerte Leybold MAG W2800 Turbomolekularpumpe (TMP) im Langzeitbetrieb erfolgreich mit einem integralen Tritiumdurchsatz von  $\approx 1$  kg getestet und anschließend zerlegt worden. 2014 wurde eine hybridgelagerte Pfeiffer Hi-Pace300 Turbomolekularpumpe erfolgreich getestet. Der Einsatz dieses Pumpentyps ist an der WGTS und der DPS vorgesehen, um den für die MAG W2800 Pumpen benötigten Vordruck bereitzustellen.

Die kontinuierliche Überwachung der Tritiumreinheit im KATRIN-Tritiumkreislauf soll mithilfe der Laser-Raman-Spektroskopie (LARA) erfolgen. Wie im vorangegangenen Jahr lagen die Schwerpunkte der Arbeiten 2014 auf der Kalibrierung des Systems, den Untersuchungen von optischen Fenstern und Beschichtungen für KATRIN sowie der Weiterentwicklung der automatisierten Analyse der Ramanspektren für KATRIN in Hinblick auf den späteren Langzeitbetrieb. Die Arbeiten am LARA-System für KATRIN werden als Highlight in einem eigenen Kapitel näher beleuchtet.

Ergänzend zum etablierten System wurden Methoden untersucht, um die Sensitivität Raman-spektroskopischer Messungen noch weiter zu erhöhen. Konkret wurden zwei Ansätze verfolgt: CERS (Cavity-Enhanced Raman Spectroscopy) und CLARA (Capillary Laser Raman Spectroscopy). Bei CERS wird die Laserleistung in einer optischen Kavität auf ein Vielfaches ihres ursprünglichen Wertes gesteigert. Ein entsprechender Aufbau wurde erfolgreich in Betrieb genommen und systematisch untersucht. Basierend auf den Ergebnissen soll 2015 ein optimiertes System aufgebaut werden.

Die zweite Methode, CLARA, verwendet anstelle der bewährten LARA-Messzelle eine innen verspiegelte Kapillare als Gaszelle, wodurch sich sowohl das Streuvolumen als auch der Anteil des detektierten Lichts erhöhen. Dazu wurden Maßnahmen zur Reduzierung von störendem Fluoreszenzlicht im System erfolgreich untersucht und implementiert. 2015 soll das so verbesserte System tritiumkompatibel ausgebaut werden, um das Potential von CLARA für die hochsensitive Analyse von Tritiumgasgemischen zu demonstrieren.

## TRIHUDE

Seit Anfang 2014 wird das Tritium-Hydrogen-Deuterium-Experiment (TRIHUDE) konzipiert und aufgebaut. TRIHUDE wird es ermöglichen, Kalibriergasmischungen aller sechs Wasserstoffisotope innerhalb eines weiten Druck- und Konzentrationsbereichs herzustellen. Anhand dieser Gasmischungen wird unter anderem die Kalibrierung von LARA verbessert, was die systematische Unsicherheit bei der Überwachung der Tritiumquelle bei KATRIN minimiert.

Neben der Herstellung von Kalibriergasmischungen wird es mit TRIHUDE möglich sein, viele wichtige Analytiksysteme in einem Kreislauf direkt miteinander zu vergleichen. So lässt sich unter anderem ein direkter Ver-



Abb. 5: Neue Handschuhbox für die Rear Section

gleichstest einer Ionisationskammer und einer neuentwickelten BIXS-Zelle durchführen, die der Überwachung der Tritiumkonzentration in Gasströmen dienen.

## Rear Section

Die Rear Section, auch Calibration and Monitoring System (CMS) genannt, erfüllt wichtige Kalibrier- und Monitoringaufgaben für KATRIN und wird teilweise in den USA entwickelt. Dazu wird derzeit beim Partner an der University of California, Santa Barbara (UCSB) eine Elektronenkanone aufgebaut. Die magnetische Führung der Elektronen wird durch drei große normalleitende Spulen sowie mehrere normalleitende Korrekturspulen realisiert. Der KIT-Beitrag zur Rear Section umfasst unter anderem die Entwicklung und den Aufbau des tritiumführenden Primärsystems sowie der zweiten Hüllen (Handschuhboxen) und deren Integration in die Infrastruktursysteme des Tritiumlabors. Das Design dafür wurde im Dezember 2013 von der KATRIN Kollaboration genehmigt.

Die beiden Handschuhboxen für die Rear Section (siehe auch Abbildung 5) wurden im Sommer 2014 bei einer externen Firma in Auftrag gegeben und im Dezember 2014 an das TLK ausgeliefert.

Ein weiterer Beitrag des KIT unter starker Beteiligung des TLK ist die Entwicklung der Rear Wall, welche die Tritiumquelle rückwärtig abschließt und das Referenzpotential zur Analysespannung im KATRIN Hauptspektrometer liefert. Durch den Aufbau einer Ultrahochvakuum-Kelvinprobe zur Charakterisierung des Oberflächenpotentials wird es möglich sein, systematisch und unter KATRIN-nahen Bedingungen mögliche Kandidaten für die KATRIN Rear Wall zu untersuchen und die bestmögliche Option für KATRIN zur Verfügung zu stellen.

## Danksagung

Die Aufgaben zu KATRIN liefen innerhalb des ITEP bereichsübergreifend mit großem Erfolg, wobei das TLK naturgemäß den größten Teil der Arbeiten übernahm. Alle Teilaufgaben profitierten von einer engen und fruchtbaren Zusammenarbeit mit Studierenden, Technikerinnen und Technikern, Ingenieuren und Wissenschaftlern des ITEP, des Instituts für Kernphysik (IKP), des Instituts für experimentelle Kernphysik (IEKP), der Hauptwerkstatt (TID-DGTTEC) und der KIT Projektmanagementgruppe (PPQ). Dafür herzlichen Dank!

### Highlight Ramanspektroskopie zur quantitativen Analyse von Tritiumgasgemischen

Eine quantitative Analyse von Gasgemischen der Wasserstoffisotopologe H<sub>2</sub>, HD, D<sub>2</sub>, HT, DT und T<sub>2</sub> ist sowohl für die Tritiumquelle des Experiments KATRIN als auch im Brennstoffkreislauf eines Fusionsreaktors unerlässlich. Die Ramanspektroskopie ist dafür besonders geeignet, da sie keine Probennahme erfordert und eine automatisierte Messung in weniger als einer Minute ermöglicht. Dazu wird Laserlicht inelastisch an den Gasmolekülen gestreut; diese werden zu Rotationen und Vibrationen angeregt. Aufgrund der Energieerhaltung erfährt das gestreute Licht eine charakteristische Verschiebung seiner Wellenlänge. Der daraus abgeleitete Raman Shift erlaubt einen Rückschluss auf die Molekülart. Ein beispielhaftes Ramanspektrum ist in Abbildung 6 zu sehen.

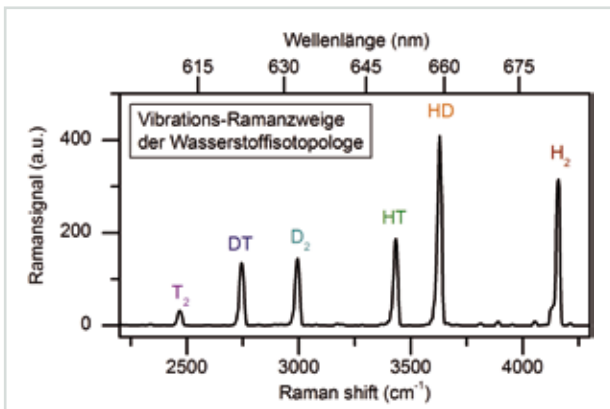


Abb. 6: amanspektrum mit den Vibrationsanregungen aller sechs Wasserstoffisotopologe

Eines der Hauptziele am TLK ist die Entwicklung eines Ramansystems für das KATRIN-Experiment. Dieses System wird über eine Betriebszeit von drei Jahren alle 30 bis 60 Sekunden hochpräzise und automatisiert die Zusammensetzung des in KATRIN zirkulierten Tritiumgasgemischs bestimmen. Dieser Parameter wird für die Messung der Neutrinomasse benötigt. Zusätzlich wird Ramanspektroskopie allgemein zur Tritiumanalytik am TLK verwendet.

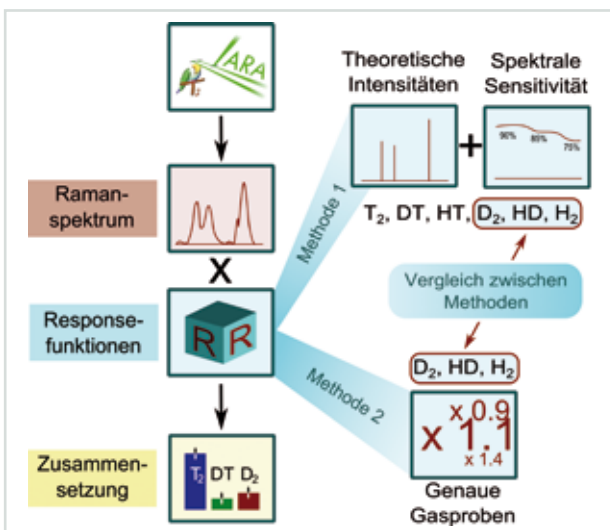


Abb. 7: Kalibrierung der Ramansysteme mittels zweier komplementärer Methoden

### Kalibrierung der Ramansysteme

Aus einem Ramanspektrum werden die Intensitäten der einzelnen Linien extrahiert. Um daraus die Konzentrationen der Gasbestandteile zu erhalten, bedarf es der sogenannten Responsefunktionen, die für jede charakteristische Linie des Ramanspektrums verschieden sind. Abbildung 7 visualisiert diesen Zusammenhang.

In der Regel wird eine Kalibrierung von analytischen Systemen anhand von Referenzproben bekannter Zusammensetzung durchgeführt. Bei Gemischen mit Tritium kommen allerdings dessen radio-chemische Eigenschaften zum Tragen – sie schränken die Genauigkeit der Gasproben ein. Dies liegt hauptsächlich an Prozessen, die zu Reaktionen der Gasmoleküle mit den Edelstahlwänden und zur Selbstequilibration der Gase führen können.

Eine alternative Möglichkeit der Kalibrierung nutzt die Berechenbarkeit der Intensitäten der Ramanlinien aus. Da es sich bei den Wasserstoffisotopologen um relativ einfache Moleküle handelt, lässt sich die sogenannte Polarisierbarkeit quantenmechanisch berechnen; daraus lassen sich dann die Linienintensitäten ableiten. Für diese Methode ist neben der theoretischen Linienintensität auch die wellenlängenabhängige spektrale Sensitivität zu bestimmen, die für jedes Ramansystem unterschiedlich ist. Dieser Parameter wird mithilfe eines zertifizierten Fluoreszenzstandards (NIST, Typ SRM 2242; siehe Abbildung 8) bestimmt, der Licht mit bekanntem Referenzspektrum emittiert.

Da der Fluoreszenzstandard in einer anderen Konfiguration verwendet wird als bei seiner Zertifizierung, wurde der Einfluss der abweichenden experimentellen Parameter auf das Referenzspektrum charakterisiert. Dabei wurden für Laserpolarisation, Position des Laserstrahls im Standard und Bearbeitung der Oberfläche des Standards die optimalen Einstellungen bestimmt, um trotz der abweichenden Verwendung des Standards ein reproduzierbares und korrektes Referenzspektrum zu erhalten. In einem Ringversuch am TLK wurden vier Ramansysteme mit dem Fluoreszenzstandard kalibriert und jeweils die Zusammensetzung einer bekannten Referenzgasmischung aus H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub> bestimmt. Die Übereinstimmung der resultierenden Konzentrationen innerhalb eines Prozentpunkts bestätigt die genaue Kalibrierung mit Hilfe des Fluoreszenzstandards. Somit kann für die Kalibrierung der Ramansysteme künftig auf Referenzgasproben verzichtet werden.

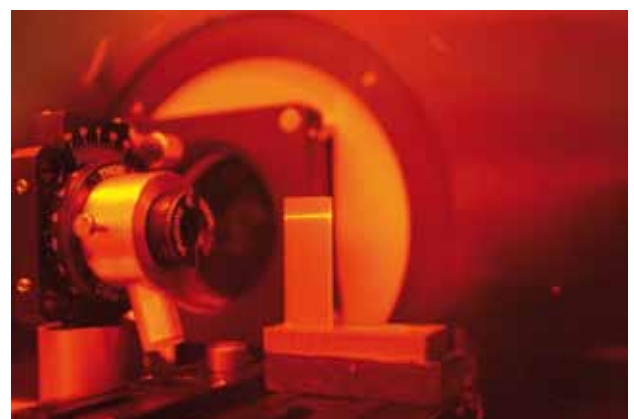


Abb. 8: Fluoreszenzstandard (rechts) durch eine Laserschutzbrille betrachtet. Das Fluoreszenzlicht wird im Standard entlang des Laserstrahls erzeugt, der aufgrund der Laserschutzbrille nicht sichtbar ist

## Beständigkeit und Reinigung von optischen Komponenten

Die Beständigkeit und Sauberkeit der optischen Einzelkomponenten ist eine essenzielle Voraussetzung, um ein Ramansystem im Dauerbetrieb einzusetzen. In einem Ramansystem ist als einzige Komponente die Probenzelle dem Kontakt mit Tritiumgas und somit einer radio-chemisch aggressiven Umgebung ausgesetzt. Dies ist besonders für die optischen Fenster der Probenzelle von Bedeutung, über die das Laserlicht in die Probenzelle eingebracht und das gestreute Licht herausgeleitet wird. Alle Fenster sind auf beiden Seiten mit dielektrischen Anti-Reflexions (AR) -Beschichtungen versehen, um Verluste durch Reflexion zu minimieren. In der Vergangenheit wurde eine massive Beschädigung der mit Tritiumgas in Kontakt stehenden AR-Beschichtungen nach nur drei Monaten Kontakt mit hochreinem Tritiumgas beobachtet, was zu einem Ausfall des Ramansystems führte.

Als Verursacher der Beschädigung wird korrosiver Fluorkohlenwasserstoff angesehen, der durch die Präsenz eines fluorhaltigen Polymers in einem Ventil des tritiumführenden Systems LOOPINO gebildet wurde. Das Ventil wurde durch ein vollmetallisches Ventil ersetzt.

Zusätzlich wurde in einem Testexperiment die Beständigkeit von AR-Beschichtungen unter Tritiumgas untersucht. Dabei zeigte sich, dass per Magnetron-Sputtering (MS) hergestellte Beschichtungen resistenter gegenüber Tritiumgas sind als die auf thermischem Verdampfen basierenden Beschichtungen. Optische Fenster der Probenzelle mit MS-Beschichtung (Abbildung 4) werden derzeit unter Realbedingungen im LOOPINO Aufbau mit Tritium und Laserbestrahlung getestet und zeigen nach über einem Monat Kontakt mit Tritiumgas weiterhin exzellente optische Leistungsdaten. Dieser Test läuft weiter.

Auch die Eignung von UV-Licht zur Reinigung von optischen Komponenten innerhalb und außerhalb von Handschuhboxen wird untersucht. Bei diesem Prozess werden die auf den Optiken vorhandenen organischen Verunreinigungen zu gasförmigen Verbindungen oxidiert und somit entfernt. Die Reinigungsmethode ist berührungslos, sodass der Strahlengang nicht verändert wird. Dies ist besonders für die Gewährleistung der Kalibrierung des Ramansystems während des Dauerbetriebs für das KATRIN-Experiment wichtig. Erste Versuche zur UV-Reinigung zeigen vielversprechende Ergebnisse. Derzeit laufen weitere Untersuchungen und Arbeiten zur Implementierung im Ramansystem.



Abb. 9: Optische Fenster der Probenzelle mit tritiumbeständiger Antireflexionsbeschichtung

## Analyse von Ramanspektren

Sowohl für das KATRIN-Experiment als auch zur Überwachung der Gaszusammensetzung im Brennstoffkreislauf eines Fusionskraftwerks ist eine automatisierte und genaue Analyse der Ramanspektren erforderlich. Die am TLK entwickelten Analyseroutinen umfassen mehrere Aufbereitungsschritte der Ramanspektren, die Bestimmung der Linienintensitäten sowie deren Umrechnung in Konzentrationen anhand der oben genannten Responsefunktionen. Der Messrechner führt alle Analyseschritte unmittelbar nach der Aufnahme des Ramanspektrums automatisiert aus. Die vollständige Analyse eines Ramanspektrums dauert weniger als fünf Sekunden und erlaubt eine nahezu Echtzeit-Überwachung der Gaszusammensetzung und damit die Prozessüberwachung mit Hilfe von Ramanspektroskopie. Durch die Verbindung von Datenaufnahme und -analyse in einem Programm kann auch Personal, das nicht auf Ramanspektroskopie spezialisiert ist, Ramananalysen vornehmen.

Im Jahr 2014 wurde die Software weiter ausgebaut. Sie berücksichtigt nun alle mit Unsicherheiten behafteten Eingangs- und Messgrößen. Mithin werden die systematischen und statistischen Unsicherheiten der Messergebnisse ebenfalls in nahezu Echtzeit berechnet und ausgegeben. Des Weiteren wurde die Anbindung des Ramansystems an das zentrale Messdaten-Erfassungssystem des KATRIN-Experiments erfolgreich getestet. Damit ist es nun möglich, das Ramansystem nicht nur als eigenständiges System, sondern auch im Verbund aller Messsysteme des KATRIN-Experiments zu betreiben.

## Erweiterung der Experimentierfläche für optische und laserbasierte Versuche

Im Jahr 2014 wurde ein Optiklabor außerhalb des Überwachungsbereichs des TLK aufgebaut und in Betrieb genommen (Abbildung 5). Das Labor ist räumlich abgetrennt, verfügt über ein Laser-Interlock-System und eine Zugangskontrolle. In diesem Raum kann also offen mit Lasern der höchsten Sicherheitsklasse gearbeitet werden. Dabei muss, im Gegensatz zu Arbeiten innerhalb des Überwachungsbereichs des TLK, keine Rücksicht auf angrenzende Experimente genommen werden. Das Labor wird schwerpunktmäßig für den Test von Ramansystemen vor ihrer Inbetriebnahme mit Tritium sowie für optische Vorversuche genutzt. Der Aufbau des Optiklabors hat die Bedingungen am TLK für Forschung an optischen Messmethoden deutlich verbessert.



Abb. 10: Laser-Experiment im neuen Optiklabor

# Auszeichnungen und Preise

## Sonderpreis Transferprojekte erstmals verliehen

Produktorientierte Idee: Professor Steffen Grohmann vom ITEP und vom Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) hat den zweiten Preis in der Kategorie „Ideenwettbewerb“ des KIT-Innovationswettbewerbs „NEULAND 2013“ erhalten. Im Rahmen seines Projekts „Massendurchflusssensor“ entwickelt Grohmann ein völlig neues Messprinzip zum Bestimmen des Massendurchflusses von Fluiden. Es beruht auf dem Prinzip der Energieerhaltung. Im Innovationswettbewerb NEULAND sind KIT-Beschäftigte aufgerufen, Projektideen einzureichen, die auf KIT-Know-how basieren und den Technologietransfer zum Ziel haben. Nach der ersten Runde wurden im März 2013 insgesamt sechs Ideen und Transferprojekte in zwei Kategorien ausgezeichnet. Eine unabhängige Unternehmensjury wählte die Gewinner unter anderem nach den Kriterien Kreativität und Innovationshöhe, Marktnähe und -größe sowie Nutzen für die Gesellschaft aus. Dieses Jahr erhielt Professor Grohmann den ersten Preis des Sonderpreises für Transferprojekte.



*Prof. Dr. Holger Hanselka, Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann, ITTK, ITEP; Andreas Janzen, Andreas Ebersoldt, IPE*

## Ideenwettbewerb EnergieCampus

Ausgezeichneter Forschungsnachwuchs: Florian Erb vom KIT hat für seine Arbeit „Supraleitende Gleichstromgeneratoren für kompakte und effiziente Windkraftanlagen“ den zweiten Platz bei dem Ideenwettbewerbs „EnergieCampus 2013“ erreicht.

Mit diesem Wettbewerb fördert die Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg Nachwuchswissenschaftler an Universitäten des Landes. Das Thema der Ausschreibung 2013 war "Versorgungssicherheit mit erneuerbaren Energien". Kriterien für die Beurteilung waren die Originalität der wissenschaftlichen Arbeit,

herausragende Ergebnisse, Forschungs- und Transferleistung und auch die Qualität der Darstellung.

Bei einem Debatten-Abend im Juli 2014 der Stiftung Energie & Klimaschutz fand die Urkundenverleihung statt.



*Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß, Leiter des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, mit den drei Gewinnern Florian Erb vom Institut für Technische Physik (ITEP) des KIT, Martin Henßler, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, und Karin Menberg vom Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) des KIT, Foto: W. List*

## Beispielhaftes Bauen im Landkreis Karlsruhe

Vorbildliches Forschungsumfeld: Das neue Gebäude des ITEP hat von der Architektenkammer Baden-Württemberg einen Preis für „Beispielhaftes Bauen im Landkreis Karlsruhe 2006-13“ erhalten. Das Gebäude am KIT Cam-



*Vorderansicht und Blick in den Innenhof des ITEP-Gebäudes.*





pus Nord (Bau 410) wurde vom Architekturbüro Behnisch Architekten entworfen und im Juli 2011 nach 15 Monaten Bauzeit eingeweiht. Als Eingangsbereich dient ein großzügiger Lichthof; an diesen grenzen Büros auf zwei Etagen. Das Untergeschoss bietet mehrere Laborräume, die sich auf einen begrünten Innenhof öffnen. Vor allem die helle, offene Atmosphäre des Gebäudes überzeugte die Jury. Mit der Auszeichnung für „Beispielhaftes Bauen“ will die Architektenkammer Baden-Württemberg das Bewusstsein für Baukultur im Alltag schärfen. Kriterien sind unter anderem äußere Gestaltung, Maß und Proportion des Baukörpers, innere Raumbildung sowie Einfügung und Umgang mit dem städtebaulichen Kontext und der Umwelt. Der Preis würdigt das gemeinsame Engagement von Architekten und Bauherren.

#### Fakultätslehrpreis 2014 für Physik

Frau Dr. Beate Bornschein erhielt den diesjährigen Fakultätslehrpreis für Physik. Professor Alexander Wanner, Vizepräsident für Lehre und akademische Angelegenheiten, zeichnete Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der KIT-Fakultäten für herausragende Lehre aus. Mit dem Fakultätslehrpreis wird ein sichtbares Zeichen gesetzt, um den hohen Stellenwert der Lehre am KIT zu betonen. Verliehen wurde der Preis bei der Akademischen Jahresfeier.

Der Preis kann an Einzelpersonen oder Arbeitsgruppen oder auch an für die Lehre verantwortliche Organisationseinheiten der Fakultät gehen, deren Lehrveranstaltungen sich insbesondere durch neue Formen des Lehrens und Lernens, Interdisziplinarität, hohe Aktualität des vermittelten Fachwissens oder forschungs- und anwendungsorientierte Lehrmodule auszeichnen. Auch die explizite Heranführung und Einbindung von Studierenden in (Groß-) Forschungsprojekte, ganz im Sinne des Leitsatzes "Lehre folgt Forschung", oder Beiträge, die besonderes Augenmerk auf die Vermittlung von Schlüsselqualifikationen zur ganzheitlichen Kompetenz- und Persönlichkeitsentwicklung der Studierenden legen, kommen für die Auszeichnung in Frage.

#### KIT-Wissenschaftler wurden mit dem ‚European Prize for Innovation in Fusion Research‘ ausgezeichnet

Die zwei KIT-Wissenschaftler Christian Day und Thomas Giegerich vom Institut für Technische Physik (ITEP) wurden mit dem ‚European Prize for Innovation in Fusion Research‘ für ihre Entwicklung eines neuen Vakuum-pumpprozesses für zukünftige Fusionskraftwerke ausgezeichnet.

Dieser Prozess, der sogenannte KALPUREX-Prozess, vereinfacht die gegenwärtig verwendeten Verfahren zur Vakuumherzeugung und macht diese wirtschaftlich interessanter. Gleichzeitig verbessert er den Brennstoffkreislauf, um damit ein sicheres Prozessieren des Fusionsbrennstoffs zu gewährleisten.

Mit diesem Preis, der am Dienstag, den 30. September in San Sebastian (Spanien) verliehen wurde, möchte die Europäische Kommission industrierelevante Arbeiten im Bereich Fusion hervorheben und belohnen.



*Thomas Giegerich und Dr. Christian Day mit dem „European Prize for Innovation in Fusion Research“.*

# Lehre und Bildung

## Vorlesungen, Seminare, Workshops und Sommerschulen

### Vorlesungen

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
**Supraleitende Systeme für Ingenieure** (Noe, Neumann, Siegel) WS 13/14

**Supraleitertechnologie** (Noe, Fietz, Holzapfel) SS 14  
**Superconducting Materials for Energy Applications** (Grilli) SS 14

**Energiespeicher und Netzintegration** (Noe) WS 14/15  
**Supraleitende Materialien** (Holzapfel) WS 14/15  
**Supraleitende Systeme der Energietechnik** (Holzapfel) WS 14/15

KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

**Vakuumtechnik** (Day) WS 13/14–14/15  
**Übung zu Vakuumtechnik** (Varoutis) WS 13/14–14/15  
**Kryotechnik B** (Neumann) WS 13/14  
**Kältetechnik A** (Grohmann) WS 13/14–14/15  
**Übung zu Kältetechnik A** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 13/14–14/15  
**Kryotechnik A** (Grohmann) SS 14  
**Übung Kryotechnik A** (Grohmann, Heidt) SS 14  
**Kältetechnik B** (Grohmann) SS 14  
**Übung zu Kältetechnik B** (Grohmann, Mitarbeiter) SS 14

KIT-Fakultät Maschinenbau

**Fusionstechnologie A\*** (Bornschein, Demange, Day, Fietz, Weiss) WS 13/14–14/15  
**Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren** (Fietz, Weiss) SS 14  
**Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf** (Bornschein, Day, Demange) SS 14

KIT-Fakultät Physik

**Messmethoden und Techniken in der Experimentalphysik** (Bornschein) SS 14  
**Hauptseminar Astroteilchenphysik: Neutrinos und dunkle Materie** (Bornschein) SS 14

House of Competence

**Blockseminar (4 Tage) Wissenschaftliches Schreiben und Präsentieren in der Physik I** (Bornschein) WS 14/15  
**Blockseminar (4 Tage) Wissenschaftliches Schreiben und Präsentieren in der Physik II** (Bornschein) WS 14/15  
**Blockseminar (4 Tage) „Erstellen wissenschaftlicher Publikationen in der Physik“** (Bornschein) WS 13/14  
**Hauptseminar Astroteilchenphysik: Neutrinos und dunkle Materie** (Bornschein) SS 14

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau

**Konstruktionslehre** (Bauer) WS 13/14–14/15  
**Arbeitsicherheit und Umweltschutz** (Bauer) SS 14  
**Thermodynamik 1 für Maschinenbauer** (Neumann) WS 13/14  
**Thermodynamik 2 für Maschinenbauer** (Neumann) SS 14

### Seminare / Sommerschulen / Workshops

**5<sup>th</sup> ITEP Young Scientists Seminar**  
 13.–16. Januar 2014, Kristberg, Österreich

**Seminar „Die Kunst sich selbst zu präsentieren“**  
 23.–24. Januar 2014, Karlsruhe

**VDI-Seminar Kryotechnik**  
 19.–21. März 2014, Karlsruhe

**Strategieworkshop ITEP**  
 13.–14. März 2014, Maulbronn

**CIGRE Working Group Meeting D1.38**  
 24.–25. April 2014, Hürth

**8. Karlsruhe-Dresden Doktorandenseminar zur Supraleitung**  
 25.–27. Juni 2014, Bad Liebenzell

**4<sup>th</sup> KIT Fusion PhD Student Seminar\***  
 03.–04. Juni 2014, St. Martin

**CIGRE Session 45 / CIGRE Working Group Meeting D1.38**  
 24.–29. August 2014, Paris, Frankreich

**8<sup>th</sup> International Summer School on Fusion Technologies\***  
 08.–19. September 2014, Karlsruhe

**Haus der Technik – Seminar Kryostatbau**  
 10.–12. September 2014, Karlsruhe

**DKV-Tagung 2014\***  
 19.–21. November 2014, Düsseldorf

**Strategieworkshop und FuE-Planung 2015 ITEP**  
 08.–10. Dezember 2014, St. Martin

\* Organisation mit ITEP Beteiligung

# Lehre und Bildung

## Doktorarbeiten – Master- und Diplomarbeiten – Bachelor- und Studienarbeiten

### Doktorarbeiten 2014 (\* abgeschlossen)

#### Martin Babutzka (TLK)

Entwicklung, Aufbau und Integration des Calibration und Monitoring Systems (CMS) am KATRIN-Experiment

#### Wescley Batista de Sousa (SUPRA)

Transient simulations of superconducting devices

#### Christoph Bayer (FUSION)

Characterization of high temperature superconductor (HTS) cable for large scale HTS magnet coil application

#### Olga Borisevich (TLK)

Simulation and experimental study of a multi-stage permeation process for tritium recovery in breeder blanket

#### Florian Erb (SUPRA)

Entwurf supraleitender Windkraftgeneratoren

#### Patthabi Vishnuvardhan Gade (FUSION)

Optimization of High Temperature Superconductor (HTS) cable concepts for high current capacity to be used in HTS coils for future fusion reactors

#### Thomas Giegerich (VAKUUM)

Entwicklung eines Vakuumpumpkonzepts für zukünftige Fusionsreaktoren

#### Cristian Gleason-González (VAKUUM)

Modelling of rarefied neutral gas flow

#### Aurélien Godfrin (SUPRA)

AC loss characterization of superconducting devices for power applications

#### Robin Gröble (TLK)

IR-Spektroskopie an flüssigen Wasserstoffisotopen und Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Tritiumkonzentration im Brennstoffkreislauf von ITER

#### Carolin Heidt (KRYO)

Experimentelle Untersuchungen und Modellierung von Störfällen in Flüssighelium-Kryostaten und die Auswirkungen auf das Schutzkonzept

#### Sebastian Hellmann (SUPRA)

Technologieentwicklung für supraleitende strombegrenzende Transformatoren

#### Zoltan Köllö (TLK)

Further Development of Tritium analytic devices

#### Marco Langer (SUPRA)

Pinningeigenschaften nanostrukturierter Fe-basierter Supraleiterschichten

#### Yinzhen Liu (SUPRA)

Design and test of a superconducting DC wind generator demonstrator

#### Robert Michling (TLK)

Performances Assessment of Water Detritiation and Hydrogen Isotope Separation

#### Sebastian Mirz (TLK)

Untersuchung der Molekularen Effekte in allen sechs flüssigen Wasserstoffisotopologen mithilfe Infrarot- und Ramanspektroskopischer Methoden

#### Oliver Näckel (SUPRA)

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung strombegrenzender Drosselspulen mit Hochtemperatur-Supraleitern

#### Simon Niemes (TLK)

The TRIHYDE-Experiment: calibration grade gas samples of all six hydrogen isotopes in thermal equilibrium

#### Simon Otten (SUPRA)

HTS Roebel cables with thermal and mechanical stabilizations

#### Benedikt Peters (VAKUUM)

Entwicklung einer Metallfolienpumpe

#### Marco Röllig (TLK)

Tritiumanalytik bei KATRIN

#### Simone Rupp (TLK)

Development and investigation of a tritium-compatible capillary Raman system and a mixing loop for all hydrogen isotopologues

#### Kerstin Schönung (TLK)

Aufbau Rear-System von KATRIN

#### Shengnan Zou (SUPRA)

Development of numerical models of the electromagnetic and thermal behaviour of superconductors for power applications

#### Philipp Krüger (SUPRA)\*

AC losses characterization of HTS devices for power applications

#### Sebastian Fischer (TLK)\*

Laser Raman Spectroscopy for the KATRIN experiment

## Betreute Master-/Diplomarbeiten 2014 (\* abgeschlossen)

### Rodrigo Antunes abgeschlossen in 2014

Experimental investigation of newly developed zeolite membrane for tritium process in the breeder blanket

### Sylvia Ebenhöch

Aufbau und Charakterisierung des TRIHYDE Experiments

### Enno Heits\*

Entwicklung eines Versuchsstandes zur Kraft/Wegmessung an einer supraleitenden Miniaturbahn

### Diana Kalteisen

Untersuchung von mechanischen Presskontakten zur Stromeinkopplung in supraleitende ReBCO-Dünnschichtbandleiter

### Manuel Klein

Investigation of Tritium Adsorption and desorption on the rear wall and close-by surfaces for the KATRIN experiment

### Bennet Krasch

Präzise Raman-spektroskopische Messung aller sechs Wasserstoffisotopologe zur Bestimmung des Vibrations- und Retraktionskonstante

### Sebastian Mirz\*

Untersuchung des Ir-Absorptionsverhaltens flüssiger Wasserstoffisotopologe von der Weglänge und der Ortho-Parabesezung

### Venkataram Narayanan Venkatesan

FBG cryogenic flow measurement system

### Andreas Off

Optimierung eines Kapillar-Raman-Systems zur hochsensitiven Analyse von Gasmischungen

### Simon Otten\*

Transverse pressure of IC in coated Conductor Roebel Cables.

### Manuel Pitsch\*

Auswertung von Netzzustandsdaten – Chancen und Optimierungspotentiale

### Alan Preuß

Untersuchungen zur Optimierung der Übergangswiderstände für Roebel Assembled Coated conductor Kabel

### Alexander Rein

Inbetriebnahme und erste Messungen des Mischungskreislaufs von TRIHYDE

### Hendrik Seitz\*

Entwicklung eines optimierten Kapillar-Raman-Systems für das KATRIN-Experiment zur Bestimmung von Gaszusammensetzungen mit hoher Sensitivität

### David Schneider

Elektromechanische Testeinrichtung zur Untersuchung von Supraleitern bei kryogenen Temperaturen im Magnetfeld

## Betreute Bachelorarbeiten 2014 (\* abgeschlossen)

### Max Aker

Weiterführende Untersuchungen von Glasfasern in einer Tritiumumgebung

### Woo-Jeong Baek

Charakterisierung einer Amptek DAQ mit einem KETEK Siliziumdetektor

### Stefanie Blust

Gas flow balancing for the DEMO inner fuel cycle

### Dominik Dorer

Untersuchung der Stabilität eines FTIR-Spektrometers Ann

### Anna Friedel

Erweiterung eines Simulationsmodells für Synchrogeneratoren in Windkraftanlagen

### David Gerstner

Bewertung verschiedener Verfahren zur Tritiumextraktion aus Brutblankets

### Martin Hajek

Analyse von potentiellen Einsatzbereichen von LIQHYS-MES im deutschen Stromnetz

### Roxana Helm\*

Simulation von Generatoren für Windkraftanlagen

### Clemens Herkommer\*

Construction and characterization of a laser wavelength monitor for the KATRIN Raman system

### Patrick Kabrhel\*

Experimentelle Untersuchungen des transienten Übergangs an Bandleiter in flüssigem Stickstoff

### Christian Linder

Theoretische Analyse des Wärmeübergangs durch Strahlung und Verdampfung von Stickstoff für verschiedene Behältergeometrien

### Oliver Linder

Untersuchung eines RF Plasmas in Metallfolienpumpen für den Brennstoffkreislauf von Fusionsanlagen

### Christoph Lusch

Qualifizierung von Elektronenstrahl-Schweißverbindungen zwischen Kupfer und Edelstahl für kryotechnische Anwendungen

### Marie Oehler

Aufbau und Charakterisierung eines SDDs in einer optimierten BIXS-Messzelle zur Überwachung der Tritiumkonzentration in Gasproben

### Pakari Oskari\*

Untersuchung des Intensitätsverhaltens der Beta-Radioaktivität in Tritium-Helium-Mischungen

### Moritz Rabe

Cavity enhanced Raman spectroscopy

**Pascal Reutter\***

Konzeptionierung eines Wissensmanagementsystems zu kryogenen Materialuntersuchungen

**Kevin-Davis Richler\***

Untersuchung der Ortho/Para-Konversion für Wasserstoff unter Verwendung von Palladium und Eisenoxid-Katalysatoren

**Hartmut Schmidt**

Untersuchung der Ortho/Para-Konversion für Wasserstoff unter Verwendung von Palladium und Eisenoxid-Katalysatoren

**Michael Schwarz\***

Verfahrensentwicklung zur Detritierung von verfahrenstechnischen Komponenten

**Sebastian Senst**

Untersuchung von Glasfasern auf ihre Tauglichkeit in einer Tritiumumgebung

**Eugen Shabagin\***

Untersuchungen zum Druck- und Temperaturverhalten supraleitender Kabel

**Simeon Siegele**

Potenzialanalyse eines Demand Response Managements in der Wasserversorgung

**Damian Sprawka**

Writing of LabView Software for multiplexed AC transport current loss measurements

**Kimo Toema**

Experimental investigation of superpermeable metal foils in the HERMES experiment

**Felix Wache**

Entwurf von Windkraftgeneratoren hoher Leistung

**David Walter\***

Charakterisierung eines BIXS-Detektors in dynamischen Messungen mit Tritium am TRACE-Experiment

**Matthias Wecker\***

Experimentelle Untersuchungen zur Entstehung und Reinigung laserinduzierter Kontaminationen im KATRIN-Ramansystem

**Leonard Weidemann**

Umsetzung einer Messroutine zur effizienten Bestimmung von kritischer Strömen in Hochtemperatursupra-leitern

**Sonja Wendel\***

Konzeptionierung eines Qualitätsmanagementsystems in einem wissenschaftlichen Labor

**Thomas Werner**

Inbetriebnahme einer UHV Kelvinsonde für das KATRIN Experiment

**Sebastian Wozniowski\***

Relative Kalibrierung der IR Absorptionsspektren gegen H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub> Konzentration

**Katelijne Vandemeulebroucke\***

Personaleinstellungsprozesse am ITEP – Analyse und Optimierung der dezentralen Prozesse

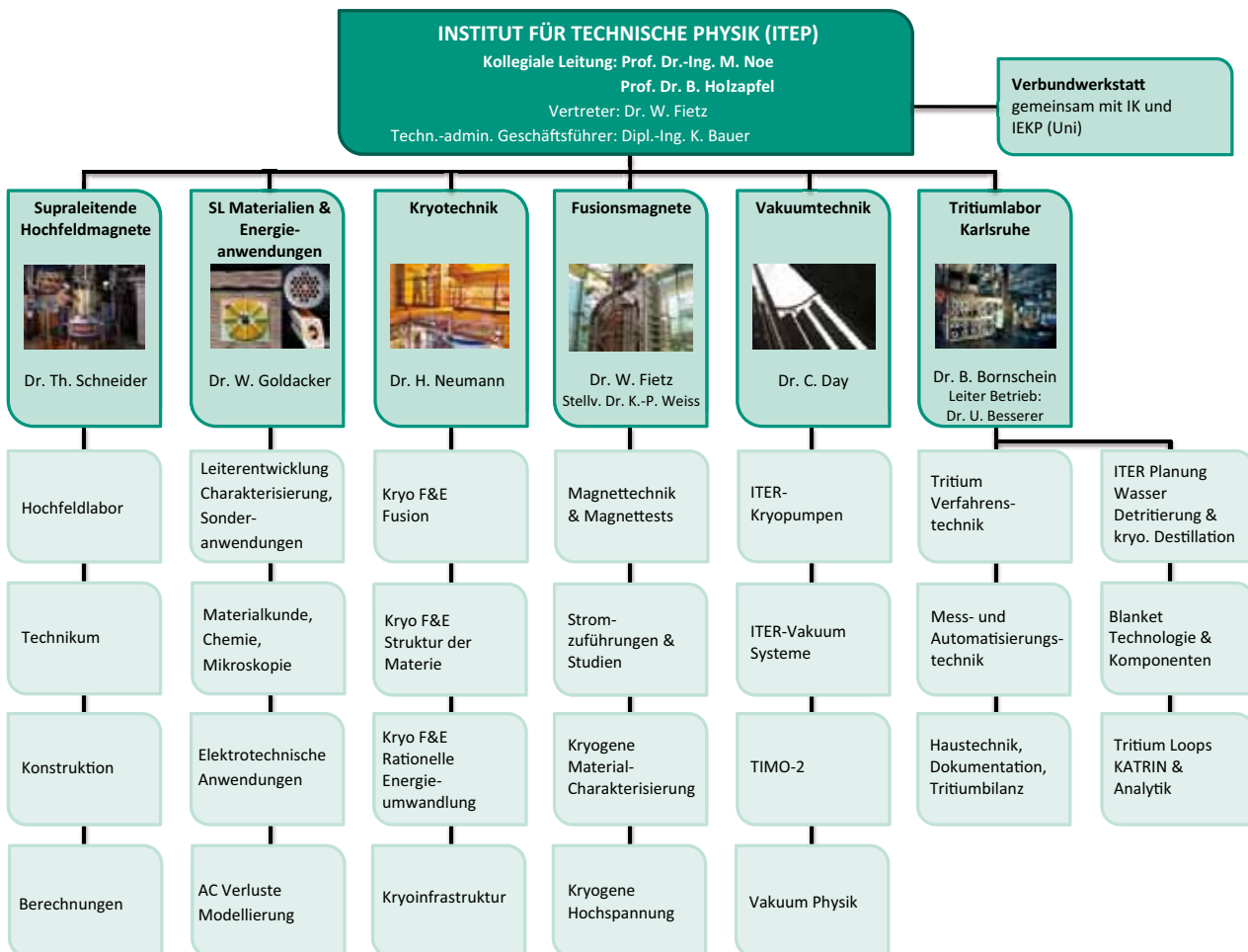
# Lehre und Bildung

## ITEP Kolloquien

13.02.14	Concept of current flow diverter for accelerating the normal zone propagation velocity (NZPV) in 2G HTS coated conductors Prof. F. Sirois; École Polytechnique de Montréal, Canada; Gastvortrag	15.07.14	Developments of miniature cryocoolers at Shanghai Institute of Technical Physics (SITP) Prof. Dr. Yinong WU; Chinese Academy of Science; Shanghai Institute of Technical Physics; Gastvortrag
25.02.14	Untersuchungen zu Alterung und Öffnungsverhalten von Berstscheiben Michael Schrank; KRYO	07.08.14	Quench tests of LHC magnets with beam: studies on beam loss development and determination of quench levels Dr. Agnieszka Priebe, CERN, the European Organization for Nuclear Research Gastvortrag
11.04.14	Chancen und Optimierungspotentiale für die Netzführung und Netzplanung des elektrischen Verteilnetzes Manuel Pitsch; Extern; Masterarbeit	05.09.14	Difference between Effects of Carbon and Ni-trogen on Martensitic Transformation Behavior in Metastable Austenitic Stainless Steel Dr. Nobuo Nakada; Kyushu University, Japan; Gastvortrag
16.04.14	Simulation von Generatoren für Windkraftanlagen Roxana Helm; SUPRA	21.10.14	Faser Bragg Gitter am IPHT Jena: von der Faserherstellung bis zum installierten Sensor-System Dr. Tobias Habisreuther; Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT); Gastvortrag
13.05.14	The Large Hadron Collider at CERN. Cooling and stability of the main superconducting magnets Pier Paolo Granieri; FUSION	28.11.14	Untersuchungen zum Druck- und Temperaturverhalten supraleitender Kabel Eugen Shabagin; KRYO
26.05.14	Entwicklungsmethoden und Trends bei großen Windenergieanlagen Prof. Dr. rer. nat. habil. Uwe Ritschel; Universität Rostock; Stiftungslehrstuhl für Windenergie-technik; Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik; Gastvortrag	02.12.14	Affordable Energy for Humanity Prof. Yatin; Univ. Waterloo; Gastvortrag
15.07.14	Cryogenics activities at Zhejiang University Prof. Dr. Zhihua GAN; Zhejiang University; Institute of Refrigeration and Cryogenics; Gastvortrag		

# Zahlen und Daten

## Organigramm ITEP (Januar 2014)



## Personalstand (30.11.2014)

<b>Gesamt</b>	<b>214</b>	Auszubildende	4
Akademiker	68	Trainees	2
Ingenieure und Techniker	62	<b>zusätzlich, während 2014:</b>	
Sonstige	27	Gäste	6
Doktoranden	26	Praktikanten	11
Diplomanden/Master	15	Studentische Hilfskräfte	29
DH-Studenten	10	Studien-, Bachelorarbeiten	34

# Zahlen und Daten

## Personalveränderungen

### Neu eingestellt (ohne Praktikanten, Gäste und studentische Hilfskräfte)

Max Aker

Rodrigo Antunes

Woo-Jeong Baek

Tamara Bauer

Jeremy Bens

Christian Bettin

Stefanie Blust

Dominik Dorer

Tobias Eicher

Manuela Erbe

Anna Friedel

David Gerstner

Pier Paolo Granieri

Jens Hänisch

Clemens Herkommer

Rica Jansen

Timothy James

Diana Kalteisen

Sandra Kauffmann-Weiss

Matthias Kluge

Bennet Krasch

Marco Langer

Christian Linder

Oliver Linder

Yingzhen Liu

Christoph Lusch

Sebastian Mirz

Yannick Nagel

Simon Niemes

Benedikt Peters

Anne-Kathrin Praßler

Alan Preuß

Moritz Rabe

Alexander Rein

Julian Sandrock

Janek Sas

Hartmut Schmidt

David Schneider

Eugen Shabagin

Damian Sprawka

Kimo Toema

Venkataram Narayanan Venkatesan

Felix Wache

David Walter

Matthias Wecker

Leonard Weidemann

Thomas Werner

Michael Wolf

Rafael Wramba

Zhihan Xu

Shengnan Zou



# Zahlen und Daten

## Personalveränderungen

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

Wescley Batista de Sousa

Helmut Dittrich

Pier Paolo Granieri

Erika Gorenflo

Marvyn Hellmann

Philipp Krüger

Robert Michling

Anne-Kathrin Praßler

Pascal Reutter

Enrico Rizzo

Michael Sander (verstorben)

Michael Schrank

Michael Schwarz

Manfred Süßer

Sonja Wendel

# Zahlen und Daten

## Trainee / Studentische Hilfskräfte

### Studentische Hilfskräfte in 2014

Jasmin Seeger

Tim Brunst

Florian Schleißinger

Felix Diel

Matthias Schaufelberger

Sascha Singer

Kern Johannes

David Schneider

Rafael Klenk

Yeppez Krochin

Manuel Klein

Lukas Munk

Sylvia Ebenhöch

Andreas Off

Vera Schäfer

Manuel Pitz

Alexander Kraus

Tamina Schneider

Pia Schulz

Tobias Gebel

Kyriaki Koutrouveli

Yanshu Li

Sebastian Wozniowski

Salman Quaiyum

Mert Gülcür

Anna Friedel

Sebastian Mirz

Marius Frank

Eugen Shabagin

Matthias Wecker

### Trainee 2014 (\* abgeschlossen)

Katharina Battes\*

Michael Schrank\*

# Zahlen und Daten

## Gastwissenschaftler

### Gastwissenschaftler

**Dr. Jiwen Cen**

23.09.–31.03.14 Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Peking, China

**Dr. Yoshinori Ono**

07.10.–31.03.15 National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

**Alina Niculescu**

10.03.–09.04.14 National Institute of R&D for Cryogenic and Isotopic Technologies, Institute ICIT, Valcea, Rumänien

05.05.–18.07.14 National Institute of R&D for Cryogenic and Isotopic Technologies, Institute ICIT, Valcea, Rumänien

**Dr. Loic Queval**

14.07.–18.07.14 University of Applied Sciences, 4. Dept. of Electrical Engineering, Düsseldorf

**Prof. Ángel González Ureña**

13.10.–17.10.14 Láseres y Haces Moleculares, Instituto Pluridisciplinar, Universidad Complutense, Madrid, Spanien

**Dr. Prof. Helmut Telle**

15.–19.12.2014 Universität Swansea, Wales, Großbritannien

**Prof. Kenzo Munakata**

13.–17.10.14 Department of Material Process Engineering & Applied Chemistry for Environments, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

**Dr. Fumito Okino**

17.11.–21.11.14 Kyoto University, Kyoto, Japan

# Zahlen und Daten

## Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

### Kai Bauer

- Mitglied der gemeinsamen Kommission „Max-Planck-Gesellschaft und Helmholtz-Gesellschaft HSE“
- Mitglied im Alumni-Netzwerk „Helmholtz & Friends“ der Helmholtz-Akademie für Führungskräfte
- Mitglied im Helmholtz-Arbeitskreis HSE „Health, Safety and Environment“
- Mitglied der Kommission für Lehrkultur an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe in der Fakultät Technik
- Mitglied der Prüfungsausschüsse der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe in der Fakultät in den Fachbereichen „Maschinenbau“ und „Wirtschaftsingenieurwesen“

### Beate Bornschein

- Mitglied im KIT-Lenkungskreis KATRIN
- Mitglied im Financial Technical Review Board von KATRIN
- Mitglied im KATRIN Executive Committee
- Mitglied im KATRIN Collaboration Board
- Mitglied im KATRIN Publication Committee
- Koordinatorin Quelle und Transportsystem von KATRIN
- Mitglied in der Wissenschaftlich-Technischen Versammlung von KCETA
- Mitglied im Executiv Board von KSETA
- Mitglied im Admission Board von KSETA
- Stellvertretendes Mitglied im CRY (Council for Research and Promotion of Young Scientists) des KIT
- Mitglied im KHYS-Lenkungsgremium

### Christian Day

- Mitglied des Vorstandsrates der Dt. Vakuumgesellschaft (DVG).
- Stellv. Vorsitzender des Fachverbandes Vakuumphysik und -technik der Dt. Physikalischen Gesellschaft (DPG).
- Projektleitung des Bereichs Tritium-Fuelling-Vacuum im Europäischen Fusionsprogramm EUROFUSION
- Co-ordinator des VACU-TEC Goal oriented Training Programme
- Sprecher Topic 'Vakuum und Tritium' der deutschen DEMO-Initiative
- Rarefied Gas Dynamics Conference Series, Mitglied im International Advisory Committee
- International Symposium of Fusion Nuclear Technology, Mitglied im International Programme Committee
- Associated Expert of the Indian Vacuum Society (IVS).
- Chartered Engineer of American Vacuum Society (AVS).

### Walter H. Fietz

- Member of International Organizing Committee of Symposium of Fusion Energy
- Head of Task Force Magnets in KIT Program Fusion
- Member of KIT Senat
- Member of Eurofusion Scientific Technical Advisory Committee

### Francesco Grilli

- Board member International HTS Modelling working group: <http://www.htsmodelling.com>
- International advisory board member of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, 11.–14.5.2014 Bratislava, <http://www.elu.sav.sk/htsmod2014/get.html>

### Wilfried Goldacker

- President of Board of Directors ICMC (International Cryogenics Materials Commission)
- Mitglied der Kommission Elektrotechnik, Elektronik- und Informationstechnik im DIN und VDE, DKE, Referat K184 „Supraleiter“
- Advisory Board CESUR Universität Ankara (Centre of Excellence for Superconductivity Research)
- Board member ICEC24-ICMC Conference, Twente 7–11. Juli 2014
- Program Committee Member ICSM-Conference Antalya 2014
- Member Executive Board of Eucard-II (EU-Projekt)
- Mitglied und KIT-Vertreter Windenergie-Netzwerk e. V. Rostock
- Mitglied im VAMAS Gremium für Normierung TWA 16
- IEC International Electrotechnical Commission/Technical Committee 90 „Superconductivity“ Mitglied

### Steffen Grohmann

- Stellvertretender Obmann im Normenausschuss NA 016-00-07 AA „Flüssighelium-Druckbehälter – Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung“
- Mitglied im Verein zur Förderung der Luft- und Kältetechnik e. V.
- Mitglied im KATRIN Executive Board und KATRIN Publications Committee
- Mitglied im International Institute of Refrigeration (IIF/IIR), Kommission A1: Cryophysics, cryoengineering

### Reinhard Heller

- Applied Superconductivity Conference, Member of International Program Committee
- Magnet Technology Conference, Member of International Program Committee
- Computation of Thermo-Hydraulic Transients in Superconductors (CHATS-AS), Board member

- DKE/DIN K 184 – Supraleiter
- International Electrotechnical Commission (IEC TC90) – Superconductivity – Member WG 12 – „Superconducting Power Devices-General Requirements for Characteristic Tests of Current Leads designed for Powering Superconducting Devices“

### Holger Neumann

- Mitglied des Vorstandes im DKV (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.)

### Bernhard Holzapfel

- European Society for Applied Superconductivity (ESAS), Board Member, Society
- International Energy Agency, Implementing Agreement for a co-operative programme for assessing the impacts of high-temperature superconductivity on the electric power sector, German representative
- Karlsruhe School of Elementary and Astroparticle Physics, Member of Executive Board
- Applied Superconductivity Conference, Board member
- European Conference on Applied Superconductivity, Member of International Program Committee
- Industrieverband Supraleitung, Gastmitglied
- Siemens Campus "Future Energy Systems", Steering Board Member

### Mathias Noe

- European Society for Applied Superconductivity (ESAS), President
- Engitech Scientific Committee Member of Science Europe
- Subprogramme Coordinator of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) of the European Energy Research Alliance (EERA) joint Program on Energy Storage
- International Council of Large Electric Systems (CIGRE) Convenor of Working Group D.1.38 „Emerging Test Techniques Common to High Temperature Superconducting (HTS) Power Applications“
- International Energy Agency, Implementing Agreement for a co-operative programme for assessing the impacts of high-temperature superconductivity on the electric power sector, German representative
- Fusion for Energy (F4E) – Member of Technical Advisory Panel
- Association Steering Committee Euratom-KIT, Member
- Karlsruhe School of Elementary and Astroparticle Physics, Member of Executive Board
- International Conference on Magnet Technology, Member of International Organizing and Scientific Program Committee
- Applied Superconductivity Conference, Board member
- European Conference on Applied Superconductivity, Member of International Program Committee
- Studiengang Energy Engineering and Management der Hector School, Programmdirektor
- Advisory Panel der Zeitschrift Physica C, Mitglied
- IEEE Transactions on Applied Superconductivity for Large Scale Applications, Editor
- Industrieverband Supraleitung, Gastmitglied
- Helmholtz Programm Rationelle Energieumwandlung und -nutzung, Topicsprecher Supraleitung
- Verwaltungsrat der Heinrich-Hertz-Gesellschaft, Mitglied

### Rajanikumar, Ramalingam

- Advisory Committee, 2<sup>nd</sup> International Conference on current Trends in Engineering and Management

### Sonja Schlachter

- Member of the „Executive Board of Superconductor Science and Technology“ (SUST) in the Institute of Physics (IOP) UK

### Manfred Süßer

- Obmann im Normenausschuss NA 016-00-07 AA „Flüssighelium-Druckbehälter – Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung“

### Anne-Kathrin Weber

- Mitglied des Konvent des Karlsruher Institut für Technologie
- Mitglied des Prüfungsausschusses der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe im Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen

### Klaus-Peter Weiss

- DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE Referat K 184 „Supraleiter“ Stellvertretender Obmann
- IEC International Electrotechnical Commission/Technical Committee 90 „Superconductivity“ Mitglied
- Sprecher der Arbeitsgruppe „Magnet Design“ innerhalb der deutschen Koordination der Fusionsforschung für DEMO

### Jürgen Wendel

- Gründungsmitglied und seit mehreren Jahren Vorstandsmitglied der Deutschen Gesellschaft für Flüssigszintillationschromatographie e. V. (DGfS), und Schatzmeister
- Referent am Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt (FTU) in den Bereichen Strahlenschutz und Radiochemie
- Duale Hochschule BW – Fachbereich Sicherheitswesen Umwelttechnik (Wendel) 6 Stunden im SS 14

# Veröffentlichungen

## Programm „Kernfusion“ (\* Thomson Reuters referiert)

Bagrets, N.; Augieri, A.; Celentano, G.; Weiss, K.P.; Della Corte, A.

Investigation of REBCO conductor tape joints for superconducting applications.

Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014

Bagrets, N.; Tschan, V.; Weiss, K.P.

Low temperature mechanical properties of soft solders for superconducting applications.

28<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014

\* Bagrets, N.; Goldacker, W.; Schlachter, S.I.; Barth, C.; Weiss, K.P.

Thermal properties of 2G coated conductor cable materials.

Cryogenics, 61(2014) pp. 8–14

DOI:10.1016/j.cryogenics.2014.01.015

Bagrets, N.; Augieri, A.; Celentano, G.; Muzzi, L.; Weiss, K.P.; Della Corte, A.

Thermal transport properties of ReBCO tapes and stacks for HTS cables.

International Conference 'Superconductivity for Energy', Paestum, I, May 15–19, 2014

Battes, K.; Day, C.; Rohde, V.

Basic considerations on the pump-down time in the dwell phase of a pulsed fusion DEMO.

28<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014

Battes, K.; Day, C.; Hauer, V.

Comparison of different mass spectrometers for fusion applications.

DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Vakuumphysik und Vakuumtechnik, Dresden, 30. März–4. April 2014

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), VA 2.2

Battes, K.; Day, C.; Hauer, V.

Comparison of different mass spectrometers for online analysis.

13<sup>th</sup> European Vacuum Conference, Aveiro, P, September 8–12, 2014

Battes, K.; Day, C.; Hauer, V.

Outgassing rate measurement according to a modified throughput method.

4<sup>th</sup> Workshop on the Operation of Large Vacuum Systems (OLAV 2014), Hsinchu, China, April 1–4, 2014

Battes, K.; Day, C.; Hauer, V.

The outgassing measurement apparatus at KIT.

Workshop on Vacuum Metrology for Industry, Berlin, June 25–27, 2014

\* Bayer, C.; Barth, C.; Gade, P.V.; Weiss, K.P.; Heller, R.

FBI – Measurement facility for high temperature superconducting cable designs.

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(2014) pp.9500604/1–4

DOI:10.1109/TASC.2013.2287710

Bayer, C.; Gade, P.V.; Weiss, K.P.; Kario, A.; Kling, A.; Goldacker, W.; Heller, R.; Fietz, W.H.

Mechanical stabilisation for Roebel assembled coated conductor cables.

Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N. C., August 10–15, 2014

Borisevich, O.; Antunes, R.; Demange, D.

Experimental study of permeation and selectivity of different inorganic membranes for tritium processes.

28<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014

Breschi, M.; Bevilacqua, A.; Bottura, L.; Granieri, P.P.

Quench energy analysis of LHC superconducting cables using a multi-strand, 1D model.

Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014

\* Cristescu, I.; Ana, G.; Demange, D.; Michling, R.; Niculescu, A.; Petrutiu, C.; Pinna, T.; Welte, S.

Design and R&D activities of TriPla-CA consortium in support of ITER tritium plant development.

Fusion Engineering and Design, 89(2014) pp.1524-1528

DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.03.067

\* Day, C.; Giegerich, T.

Development of advanced exhaust pumping technology for a DT fusion power plant.

IEEE Transactions on Plasma Science, 42(2014) pp.1058-1071

DOI:10.1109/TPS.2014.2307435

\* Day, C.; Gleason-Gonzalez, C.; Hauer, V.; Igitkhanov, J.; Kalupin, D.; Varoutis, S.

Towards a physics-integrated view on divertor pumping.

Fusion Engineering and Design, 89(2014) pp.1505-1509

DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.04.077

- Day, C.  
Vacuum technology.  
Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry  
Weinheim [u.a.] : Wiley-VCH ; Wiley Online Library, 2014  
ISBN 978-3-527-30673-2  
DOI:10.1002/14356007.b03\_21.pub2
- Day, Chr.  
Fusion exhaust pumping systems - evolution from experimental devices to DEMO. (eingeladen)  
21st Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE 2014), Anaheim, Calif., November 9–13, 2014
- Day, Chr.  
Fusion vacuum systems. From experimental devices to power plants.  
13<sup>th</sup> European Vacuum Conference, Aveiro, P, September 8–12, 2014
- Day, Chr.  
ITER and DEMO - current status of vacuum systems development. (eingeladen)  
Workshop 'From Large Scale Vacuum System to Vacuum Metrology', Uppsala, S, April 8–9, 2014
- Day, Chr.; Igitkhanov, Yu.; Hauer, V.  
The operational window for divertor detachment in a fusion reactor. A physics-technology integrated approach.  
25<sup>th</sup> Fusion Energy Conference (FEC 2014), St. Petersburg, Russia, October 13–18, 2014
- Demange, D.  
Advanced tritium extraction process for HCPB breeding blanket.  
Knitter, R. [Hrsg.]  
Proceedings of the 17th IEA International Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interactions (CBBI-17), Barcelona, E, September 12–14, 2013  
KIT Scientific Reports, KIT-SR 7654 (January 2014) pp.205–218
- Demange, D.; Gramlich, N.  
Experimental study at large flow rate of a technical scale catalytic membrane reactor for its potential use for tritium processing in the breeding blanket.  
28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014
- \* Demange, D.; Boccaccini, L.V.; Franza, F.; Santucci, A.; Tosti, S.; Wagner, R.  
Tritium management and anti-permeation strategies for three different breeding blanket options foreseen for the European power plant physics and technology demonstration reactor study.  
Fusion Engineering and Design, 89(2014) pp.1219–1222  
DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.04.028
- Drotziger, S.; Bagrets, N.; Fietz, W.H.; Heiduk, M.; Heller, R.; Hollik, M.; Lange, C.  
Investigation of REBCO conductor tapes with low thermal conductivity stabilizers for the application in HTS current leads.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- \* Dutta, P.; Rathi, M.; Yao, Y.; Gao, Y.; Majkic, G.; Iliev, M.; Martinez, J.; Holzappel, B.; Selvamamickam, V.  
Large grained single-crystalline-like germanium thin film on flexible Ni-W tape.  
RSC Advances, 4(2014) pp.21042–21048  
DOI:10.1039/C4RA02664K
- Ebenhöch, S.  
Tritium concentration monitoring of the purge gas stream of HCPB breeder blankets in future fusion reactors.  
DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Plasmaphysik, Berlin, 17.–21. März 2014  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), P 2.6
- Federici, G.; Porton, M.; Kalsey, M.; Stork, D.; Zinkle, S.; Romanelli, F.; Boccaccini, L.L.; Rieth, M.; Taylor, N.; You, J.H.; Zani, L.; Day, C.; Tran, M.Q.; Cipollini, E.; Loving, T.; Buckthorpe, D.; English, C.  
The path towards a DEMONstration fusion reactor.  
European Nuclear Conference (ENC 2014), Marseille, F, May 11–14, 2014
- Fietz, W.H.; Heiduk, M.; Heller, R.; Hollik, M.; Lange, C.; Lietzow, R.; Richter, T.; Rohr, P.  
Signal conditioning, data acquisition and power supply of the current lead test facility CuLTKa.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- \* Franza, F.; Boccaccini, L.V.; Demange, D.; Ciamichetti, A.; Zucchetti, M.  
Tritium transport issues for helium-cooled breeding blankets.  
IEEE Transactions on Plasma Science, 42(2014) pp.1951–1957  
DOI:10.1109/TPS.2014.2329573
- \* Gade, P.V.; Barth, C.; Bayer, C.; Fietz, W.H.; Franza, F.; Heller, R.; Hesch, K.; Weiss, K.P.  
Conceptual design of a toroidal field coil for a fusion power plant using high temperature superconductors.  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(2014) pp.4202705/1–5  
DOI:10.1109/TASC.2014.2299828
- Gade, P.V.; Bayer, C.; Fetz, W.H.; Heller, R.; Weiss, K.P.  
Electromagnetic and mechanical analysis of a toroidal field coil winding pack for EU DEMO.  
28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014
- Giegerich, T.; Bekris, N.; Butler, B.; Day, C.; Gethins, M.; Lesnoj, S.; Müller, R.; Ochoa, S.; Pfeil, P.; Smith, R.  
Conceptual design of the DEMO relevant liquid ring pump train for JET DTE2.  
21<sup>st</sup> Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE 2014), Anaheim, Calif., November 9–13, 2014
- Giegerich, T.; Day, C.  
Hydrogen ion driven permeation for vacuum pumping.  
12th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, Toyama, J, June 2–4, 2014
- Giegerich, T.; Day, C.; Luo, X.; Müller, R.; Ochoa, S.; Scannapiego, M.; Strobel, H.  
Revival of mercury diffusion pumps - A new, compact design for fusion applications. (eingeladen)  
DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Vakuumphysik und

- Vakuumtechnik, Dresden, 30. März–4. April 2014  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), VA 1.2
- \* Giegerich, T.; Day, C.  
The KALPUREX-Process – A new vacuum pumping process for exhaust gases in fusion power plants.  
Fusion Engineering and Design, 89(2014) pp.1476-1481  
DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.03.082
- \* Gleason-Gonzalez, C.; Varoutis, S.; Hauer, V.; Day, C.  
Simulation of neutral gas flow in a tokamak divertor using the direct simulation Monte Carlo method.  
Fusion Engineering and Design, 89(2014) pp.1042-1047  
DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.02.005
- Goldacker, W.; Kario, A.; Grilli, F.; Kling, A.; Vojenciak, M.  
High current low loss AC cables from HTS coated conductors, the Roebel and Rutherford approach. (eingeladen)  
International Conference 'Superconductivity for Energy', Paestum, I, May 15–19, 2014
- Granieri, P.P.; Santandrea, D.; Koettig, T.; van Weelden, R.  
Heat extraction and quench limits of the main dipole, main quadrupole and low-b superconducting magnets of the LHC.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Granieri, P.P.; Santandrea, D.; Koenig, T.; van Weelden, R.  
Heat extraction and quench limits of the main dipole, main quadrupole and low-b superconducting magnets of the LHC.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Granieri, P.P.  
Importanza della superconduttività e della criogenia per l'acceleratore di particelle LHC del CERN di Ginevra.  
Vortrag: Università Mediterranea di Reggio Calabria, I, 26. September 2014
- Granieri, P.P.  
Steady-state heat transfer in the LHC superconducting coils: status of experiments and modeling.  
Workshop on Beam-Induced Quenches, Geneva, CH, September 15–16, 2014
- Gröbke, R.; Kraus, A.; Mirz, S.  
Non linear effects in IR absorption spectroscopy of liquid hydrogen isotopologues.  
32nd European Congress on Molecular Spectroscopy (EUCMOS 2014), Düsseldorf, August 24–29, 2014
- Heller, R.; Fietz, W.H.; Heiduk, M.; Kientzler, A.; Lietzow, R.; Meyer, I.  
High temperature superconductor current leads for Tokamak JT-60SA.  
28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29 – October 3, 2014
- Kario, A.; Kling, A.; Jung, A.; Runtsch, B.; Goldacker, W.  
Round Rutherford cable concept with HTS Roebel coated conductors strands.  
25th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7–11, 2014
- Koide, Y.; Yoshida, K.; Wanner, M.; Barabaschi, P.; Cucchiari, A.; Davis, S.; Decool, P.; di Pietro, E.; Disset, G.; Genini, L.; Hajnal, N.; Heller, R.; Honda, A.; Ikeda, Y.; Kasaiwa, Y.; Kizu, K.; Kamiya, K.; Murakami, H.; Michel, F.; Marechal, J.L.; Phillips, G.; Polli, G.M.; Rossi, P.; Shibamura, K.; Tomarchio, V.; Tsuchiya, K.; Usui, K.; Verrecchia, M.; Zani, L.  
JT-60SA superconducting magnet system.  
25th Fusion Energy Conference (FEC 2014), St. Petersburg, Russia, October 13–18, 2014
- Kraus, A.; Grössle, R.; Mirz, S.  
Data analysis for the TAPiR experiment.  
DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Molekülphysik, Berlin, 17.–21. März 2014  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), MO 7.7
- Kraus, A.; Gröbke, R.; Mirz, S.  
Precise and accurate transmission spectra computed by a modified data analysis procedure in FTIR spectrometry.  
32nd European Congress on Molecular Spectroscopy (EUCMOS 2014), Düsseldorf, August 24–29, 2014
- Lang, P.T.; Day, Ch.; Fale, E.; Igitkhanov, Y.; Köchl, F.; Pegourie, B.; Plöckl, B.; Wenninger, R.; Zohm, H.  
Consideration on the DEMO pellet fuelling systems.  
28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29 – October 3, 2014
- Luo, X.; Wang, R.; Day, C.; Xu, K.  
Study of vacuum gas flows with the unified gas-kinetic scheme.  
29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Xian, China, July 13–18, 2014
- Mirz, S.; Gröbke, R.; Kraus, A.  
Investigation of the influence of ortho/para conversion on the infrared spectra of liquid hydrogen and deuterium.  
32nd European Congress on Molecular Spectroscopy (EUCMOS 2014), Düsseldorf, August 24–29, 2014
- Mirz, S.; Grössle, R.; Kraus, A.  
IR spectroscopy on liquid hydrogen isotopologues with the Tritium Absorption Infrared (TAPiR) Experiment.  
DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Molekülphysik, Berlin, 17.–21. März 2014  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), MO 7.8
- Ochoa, S.; Day, C.  
Vacuum engineering - Basics and Applications.  
Workshop on Formal and Informal Methods for Correctness and Performance (FIMCP 2014), Guayaquil, EC, June 6, 2014



Pakari, O.; Schlösser, M.

Investigation of the intensity behavior of beta radioluminescence in tritium helium mixtures.  
DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Quantenoptik und Photonik, Berlin, 17.–21. März 2014  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), Q 18.4

Plöckl, B.; Day, Chr.; Lamalle, P.; Lang, P.T.; Rohde, V.; ASDEX Upgrade Team

The enhanced pellet centrifuge launcher at ASDEX upgrade: advanced operation and application as technology test facility for ITER and DEMO.  
28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014

Richter, T.; Lietzow, R.; Bobien, S.; Fetz, W.H.; Heiduk, M.; Heller, R.; Hollik, M.; Lange, C.; Rohr, P.

Cryogenic commissioning of the new current lead test facility CuLTKa.  
25<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7–11, 2014

Röllig, M.

Tritium adsorption and desorption measurement on fusion relevant materials by beta induced spectrometry.  
DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Plasmaphysik, Berlin, 17.–21. März 2014  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), P 2.7

\* Rosendahl, S.; Bokeloh, K.; Brown, E.; Cristescu, I.; Fieguth, A.; Huhmann, C.; Lebeda, O.; Levy, C.; Murra, M.; Schneider, S.; V'enos, D.; Weinheimer, C.

A novel 83mKr tracer method for characterizing xenon gas and cryogenic distillation systems.  
Journal of Instrumentation, 9(2014) P10010  
DOI:10.1088/1748-0221/9/10/P10010

Rupp, S.; James, T.M.; Seitz-Moskaliuk, H.; Schlösser, M.; Telle, H.H.; Bornschein, B.

Capillary raman spectroscopy for high-sensitivity gas analysis.  
32<sup>nd</sup> European Congress on Molecular Spectroscopy (EUCMOS 2014), Düsseldorf, August 24–29, 2014

\* Santucci, A.; Ciampichetti, A.; Demange, D.; Franza, F.; Tosti, S.

Tritium migration in HCLL and WCLL blankets: impact of tritium solubility in liquid Pb-17Li.  
IEEE Transactions on Plasma Science, 42(2014) pp.1053-1057  
DOI:10.1109/TPS.2014.2305759

\* Scannapiego, M.; Day, C.; Hauer, V.

Consequences of plasma disruption mitigation by massive gas injection on the ITER torus cryopumping system.  
Fusion Engineering and Design, 89(2014) pp.2446-2450  
DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.03.089

\* Simplicio, M.; Afonso, M.D.; Borisevich, O.; Lefebvre, X.; Demange, D.

Permeation of single gases and binary mixtures of hydrogen and helium through a MFI zeolite hollow fibre membrane for application in nuclear fusion.  
Separation and Purification Technology, 122(2014) pp.199-205  
DOI:10.1016/j.seppur.2013.10.034

Toigo, V.; Boilson, D.; Bonicelli, T.; Piovan, R.; Hanada, M.; Chakraborty, A.; Agarici, G.; Antoni, V.; Baruah, U.; Bigi, M.; Chitarin, G.; Dal Bello, S.; Decamps, H.; Gracceffa, J.; Kashiwagi, M.; Hemsworth, R.; Luchetta, A.; Marcuzzi, D.; Masiello, A.; Paolucci, F.; Pasqualotto, R.; Patel, H.; Pomaro, N.; Rotti, C.; Serianni, G.; Simon, M.; Singh, M.; Singh, N.P.; Svensson, L.; Tobar, H.; Watanabe, K.; Zaccaria, P.; Agostinetti, P.; Agostini, M.; Andreani, R.; Aprile, D.; Bandyopadhyay, M.; Barbisan, M.; Battistella, M.; Bettini, P.; Blatchford, P.; Boldrin, M.; Bonomo, F.; Bragulat, E.; Brombin, M.; Cavenago, M.; Chuilon, B.; Coniglio, A.; Croci, G.; Dalla Palma, M.; D'Arienzo, M.; Dave, R.; De Esch, H.P.L.; De Lorenzi, A.; De Muri, M.; Delogu, R.; Dhola, H.; Fantz, U.; Fellin, F.; Fellin, L.; Ferro, A.; Fiorentin, A.; Fonnesu, N.; Franzen, P.; Fröschle, M.; Gaio, E.; Gambetta, G.; Gomez, G.; Gnesotto, F.; Gorini, G.; Grando, L.; Gupta, V.; Gutierrez, D.; Hanke, S.; Hardie, C.; Heinemann, B.; Kojima, A.; Kraus, W.; Maeshima, T.; Maistrello, A.; Manduchi, G.; Marconato, N.; Mico, G.; Moresco, M.; Muraro, A.; Muvvala, V.; Nocentini, R.; Ocello, E.; Ochoa, S.; Parmar, D.; Patel, A.; Pavei, M.; Peruzzo, S.; Pilan, N.; Pilard, V.; Recchia, M.; Riedl, R.; Rizzolo, A.; Roopesh, G.; Rostagni, G.; Sandri, S.; Sartori, E.; Sonato, P.; Sottocornola, A.; Spagnolo, S.; Spolaore, M.; Talierno, C.; Tardocchi, M.; Thakkar, A.; Umeda, N.; Valente, M.; Veltri, P.; Yadav, A.; Yamanaka, H.; Zamengo, A.; Zaniol, B.; Zanotto, L.; Zaupa, M.

Progress in the realization of the PRIMA neutral beam test facility.  
25<sup>th</sup> Fusion Energy Conference (FEC 2014), St. Petersburg, Russia, October 13–18, 2014

Varoutis, S.; Gleason-Gonzalez, M.; Kruezi, U.; Groth, M.; Day, C.; JET-EFDA Contributors

Simulation of neutral gas flow in the JET subdivertor and comparison with experimental results.  
25<sup>th</sup> Fusion Energy Conference (FEC 2014), St. Petersburg, Russia, October 13–18, 2014

Welte, S.; Cristescu, I.; Gröble, R.; Michling, R.; Lohr, N.

Experimental characterisation of random packing materials for cryogenic hydrogen isotope separation.  
28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, E, September 29–October 3, 2014

\* Yoshida, K.; Murakami, H.; Kizu, K.; Tsuchiya, K.; Kamiya, K.; Koide, Y.; Philips, G.; Zani, L.; Wanner, M.; Barabaschi, P.; Decool, P.; Cucchiari, A.; Heller, R.; Michel, F.; Genini, L.

Mass production of the superconducting magnet system for the JT-60SA.  
IEEE Transactions on Superconductivity, 24(2014) pp.4200806/1-6  
DOI:10.1109/TASC.2013.2283711

# Veröffentlichungen

## Programm „Rationelle Energieumwandlung“ (\* Thomson Reuters referiert)

Bharathwaj, V.; Markan, A.; Atrey, M.; Neumann, H.; Ramalingam, R.

Fiber Bragg gratings for distributed cryogenic temperature measurement in a tube in tube helically coiled heat exchanger.

IEEE Sensors 2014, Valencia, E, November 3–5, 2014

Bharathwaj, V.; Markan, A.; Atrey, M.; Neumann, H.; Ramalingam, R.

Fiber Bragg gratings for distributed cryogenic temperature measurement in a tube in tube helically coiled heat exchanger.

IEEE Sensors 2014, Valencia, E, November 3–5, 2014

Proceedings pp.1535-1538

Piscataway, N.J. : IEEE, 2014

ISBN 978-1-4799-0162-3

\* Brambilla, R.; Grilli, F.; Martini, L.

Critical state solution and alternating current loss computation of polygonally arranged thin superconducting tapes.

Applied Physics Letters, 103(2014) pp.092602/1–4

DOI:10.1063/1.4819487

Brighenti, F.; Neumann, H.; Sander, M.

Implementation of a regenerator concept in a LIQHYSMES – LIQuid HYdrogen and

Superconductive Magnetic Energy Storage (SMES) system used for buffering renewable energy production.

ECMZ Conference, Aberdeen, GB, August 19–21, 2014

\* De Sousa, W.T.B.; Näckel, O.; Noe, M.

Transient simulations of an air-coil SFCL.

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(2014) pp.5601807/1–7

DOI:10.1109/TASC.2014.2311396

Elschner, S.; Demencik, E.; Grilli, F.; Kudymow, A.; Strauss, S.; Zermeno, V.; Stemmler, M.; Goldacker, W.

AC-losses in concentric HTS power cables.

Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014

Elschner, S.; Demencik, E.; Goldacker, W.; Grilli, F.; Kudymow, A.; Vojenciak, M.; Zermeno, V.; Stemmler, M.; Noe, M.

Experimental model of a coaxial 3-phase superconducting AC-cable for the investigation of transport AC-losses. 4<sup>th</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ISCM 2014), Antalya, TR, April 27–May 2, 2014

Erb, F.

Superconducting DC generator for wind turbines.

SCI Begutachtung, Karlsruhe, 3. April 2014

Erb, F.

Supraleitende Gleichstromgeneratoren für kompakte und effiziente Windkraftanlagen.

Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64(2014) S.77–78

Erb, F.

Supraleitende Gleichstromgeneratoren für kompakte und effiziente Windkraftanlagen.

Debatten-Abend der Stiftung Energie und Klimaschutz, Stuttgart, 23. Juli 2014

Erb, F.

Supraleitende Gleichstromgeneratoren für kompakte und effiziente Windkraftanlagen.

Debatten-Abend der Stiftung Energie und Klimaschutz, Stuttgart, 23. Juli 2014

Fink, S.; Kim, W.S.; Noe, M.; Zwecker, V.

AC breakdown voltage of liquid nitrogen depending on gas bubbles and pressure.

International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014), Poznan, PL, September 8–11, 2014

Fink, S.; Müller, R.; Noe, M.; Zwecker, V.; Kim, H.R.

Withstand alternating voltage of liquid nitrogen in the presence of gas bubbles.

18<sup>th</sup> IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2014), Bled, SLO, June 30–July 3, 2014

Fleiter, J.; Ballarino, A.; Goldacker, W.; Kario, A.

Characterization of Roebel cables for potential use in high-field magnets.

Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014

Godfrin, A.

Automatic Ic(B) characterization of HTS tapes.

Dresden Karlsruhe PhD Seminar, Bad Liebenzell, 25.–27. Juni 2014

Godfrin, A.

Quench detection of an inductor pole of an HTS motor. Vortr.: Seminar in Kristberg, Kristberg, A, 14. Januar 2014

Goldacker, W.; Kario, A.; Grilli, F.; Kling, A.; Vojenciak, M.; Souc, J.

Application aspects of high current and low loss HTS cables.

4<sup>th</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ISCM 2014), Antalya, TR, April 27–May 2, 2014

- Goldacker, W.; Kario, A.; Kling, A.  
Development of Roebel cables for high current applications. (eingeladen)  
13<sup>th</sup> International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC 2014), Firenze, I, June 8–20, 2014
- Goldacker, W.; Holzapfel, B.  
Fe-based superconducting thin films: basic properties and potential applications. (eingeladen)  
Turkish-German Scientific Cooperation Workshop, Ankara, TR, May 5–6, 2014
- Goldacker, W.  
High current, low loss high temperature superconductor cables, concepts, properties and applications. (eingeladen)  
2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Functional Materials (ICAFM 2014), Thiruvananthapuram, IND, February 19–21, 2014
- Goldacker, W.  
HTS cables for energy applications.  
Turkish-German Scientific Cooperation Workshop, Ankara, TR, May 5–6, 2014
- Goldacker, W.; Grilli, F.; Kario, A.; Nast, R.; Jung, A.; Vojenciak, M.; Souc, J.; Gömory, F.; van der Laan, D.  
Low AC loss high current cable concepts made from HTS coated conductors for application in magnets.  
HTS Fusion Conductors Workshop, Villigen, CH, January 23–24, 2014
- Goldacker, W.; Kario, A.; Grilli, F.; Kling, A.; Vojenciak, M.; Ringsdorf, B.; van der Laan, D.C.  
Overview of selected high current HTS cable concepts for magnet applications.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Goldacker, W.; Kario, A.; Kling, A.; Nast, R.; Ringsdorf, B.; Jung, A.; Runtsch, B.; Terzieva, S.  
The Roebel assembled coated conductor (RACC) cable, status of performance and prospects for further upgrades.  
25<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7–11, 2014
- Grilli, F.; Zermeno, V.; Sirois, F.; Kario, A.; Vojenciak, M.  
A fast and efficient method to calculate the effective critical current of superconducting devices.  
HTS Fusion Workshop, Villingen, January 23–24, 2014
- \* Grilli, F.; Pardo, E.; Stenvall, A.; Nguyen, D.N.; Yuan, W.; Gömory, F.  
Computation of losses in HTS under the action of varying magnetic fields and currents.  
IEEE Transactions on Superconductivity, 24(2014) pp.8200433/1-33  
DOI:10.1109/TASC.2013.2259827
- \* Grilli, F.; Chervyakov, A.; Zermeno, V.; Marian, A.; Grasso, G.; Goldacker, W.; Rubbia, C.  
Numerical modeling of MgB<sub>2</sub> conductors for high power AC transmission.  
Physica C, 504(2014) pp.167–171  
DOI:10.1016/j.physc.2014.04.037
- Grilli, F.; Zermeno, V.M.R.; Queval, L.  
Numerical models of HTS coated conductors are now ready for realistic applications.  
International Workshop on Coated Conductors for Applications, Jeju, Korea, November 30–December 3, 2014
- \* Grilli, F.; Zermeno, V.M.R.; Pardo, E.; Vojenciak, M.; Brand, J.; Kario, A.; Goldacker, W.  
Self-field effects and AC losses in pancake coils assembled from coated conductor Roebel cables.  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(2014) pp.48095/1–5  
DOI:10.1109/TASC.2013.2282182
- \* Grilli, F.; Sirois, F.; Zermeno, V.M.R.; Vojenciak, M.  
Self-consistent modeling of the I<sub>c</sub> of HTS devices: How accurate do models really need to be?  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(2014) pp.8000508/1–8  
DOI:10.1109/TASC.2014.2326925
- \* Grohmann, S.  
A new method for flow measurement in cryogenic systems.  
Cryogenics, 60(2014) pp. 9–18  
DOI:10.1016/j.cryogenics.2014.01.004
- Grohmann, S.  
Flüssighelium-Kryostate – Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung.  
DIN-Mitteilungen, (2014) Nr.11
- Heidt, C.; Blum, L.; Grhmann, S.; Haberstroh, Ch.; Lau, M.; Otte, W.; Raccanelli, A.; Reinhardt, M.; Schröder, C.H.; Süer, M.; Schulenberg, O.  
Vorstellung des Entwurfs der DIN SPEC 4683: Flüssighelium-Kryostate – Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung.  
Deutsche Kälte-Klimatagung 2014, Düsseldorf, 19.–21. November 2014
- Hellmann, S.; Abplanalp, M.; Hofstetter, L.; Noe, M.  
Conceptual design of a 1MVA class fault current limiting superconducting transformer.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- \* Hellmann, S.; Noe, M.  
Influence of different surface treatments on the heat flux from solids to liquid nitrogen.  
IEEE Transactions on Superconductivity, 24(2014) pp.0501605/1–5  
DOI:10.1109/TASC.2013.2283772
- Holzapfel, B.  
Application based aspects of Fe-based superconductors.  
International Conference 'Superconductivity for Energy', Paestum, I, May 15-19, 2014
- Holzapfel, B.  
Fe-based superconducting thin films: basic properties and potential applications. (eingeladen)  
4th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ISCM 2014), Antalya, TR, April 27–May 2, 2014

- Hossain, M.S.A.; Motaman, A.; Patel, D.; Barua, S.; Maeda, M.; Rindfleisch, M.; Cicek, O.; Kovac, P.; Kario, A.; Goldacker, W.  
Superior critical current densities obtained in binary MgB<sub>2</sub> cables through various mechanical deformations. (eingeladen)  
4<sup>th</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ISCM 2014),  
Antalya, TR, April 27–May 2, 2014
- \* Hossain, M.S.A.; Motaman, A.; Barua, S.; Patel, D.; Mustapic, M.; Kim, J.H.; Maeda, M.; Rindfleisch, M.; Tomsic, M.; Cicek, O.; Melisek, T.; Kopera, L.; Kario, A.; Ringsdorf, B.; Runtsch, B.; Jung, A.; Dou, S.X.; Goldacker, W.; Kovac, P.  
The roles of CHPD: superior critical current density and n-value obtained in binary in situ MgB<sub>2</sub> cables.  
Superconductor Science and Technology, 27(2014) pp.095016/1–7  
DOI:10.1088/0953-2048/27/9/095016
- Iida, K.; Kurth, F.; Tarantini, C.; Kawaguchi, T.; Hänisch, J.; Grinenko, V.; Reich, E.; Sakagami, A.; Jaroszynski, J.; Mori, Y.; Kametani, F.; Schultz, L.; Ikuta, H.; Holzapfel, B.  
High-field transport properties of P-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>.  
International Conference 'Superconductivity for Energy', Paestum, I, May 15–19, 2014
- Kario, A.; Ringsdorf, B.; Otten, S.; Kling, A.; Goldacker, W.  
Flexibility limits of Roebel assembled coated conductor cable.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014),  
Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Kario, A.  
High current high temperature superconductor cable concepts.  
Storage and Cross-Linked Infrastructures at KIT, Karlsruhe, April 7–9, 2014
- Kario, A.; Otten, S.; Hossain, M.S.A.; Ringsdorf, B.; Runtsch, B.; Jung, A.; Nast, R.; Goldacker, W.  
The way to solve current percolation problems in MgB<sub>2</sub> cables. (eingeladen)  
4<sup>th</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ISCM 2014), Antalya, TR, April 27–May 2, 2014
- Kirby, G.A.; van Nugteren, J.; Ballarino, A.; Bottura, L.; Chouika, N.; Clement, S.; Datskov, V.; Fajardo, L.; Fleiter, J.; Gauthier, R.; Gentini, L.; Lambert, L.; Lopes, M.; Perez, J.C.; de Rijk, G.; Rijllart, A.; Rossi, L.; ten Kate, H.; Durante, M.; Fazilleau, P.; Lorin, C.; Härö, E.; Stenvall, A.; Caspi, S.; Marchevsky, M.; Goldacker, W.; Kario, A.  
Accelerator quality HTS dipole magnet demonstrator designs for the EuCARD-2, 5 tesla 40mm clear aperture magnet.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014),  
Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- \* Leys, P.; Kläser, M.; Schleissinger, F.; Schneider, T.  
Analysis of the anisotropic critical current behaviour of HTS coated conductors.  
Journal of Physics: Conference Series, 507(2014) pp.022013/1–4  
DOI:10.1088/1742-6596/507/2/022013
- Merschel, F.; Noe, M.; Stemmler, M.; Hobl, A.; Sauerbach, O.  
Ampacity – Installation und Inbetriebnahme des supra-leitenden 10-KV-Systems in der Innenstadt von Essen. (eingeladen)  
VDE-Kongress 'Smart Cities – Intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft',  
Frankfurt, 20.–21. Oktober 2014
- Merschel, F.; Noe, M.; Stemmler, M.; Steinbach, D.; Hobl, A.; Sauerbach, O.  
Supraleitendes 10-kV-System für die Innenstadt von Essen. Projekt AmpaCity zeigt Eignung der Technologie auf.  
Bulletin SEV, (2014) Nr.12, S.66-69
- Merschel, F.; Noe, M.  
The AmpaCity project.  
Transmission and Distribution World, 66(2014) No.1, pp.50-53
- Naeckel, O.; Langston, J.; Steurer, M.; Noe, M.  
Power hardware in the loop test of an air coil superconducting fault current limiter.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014),  
Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- \* Nast, R.; Vojenciak, M.; Demencik, E.; Kario, A.; Ringsdorf, B.; Jung, A.; Runtsch, B.; Grilli, F.; Goldacker, W.  
Influence of laser striations on the properties of coated conductors.  
Journal of Physics: Conference Series, 507(2014) p.022023/1-5  
DOI:10.1088/1742-6596/507/2/022023
- Nast, R.; Vojenciak, M.; Kario, A.; Jung, A.; Demencik, E.; Ringsdorf, B.; Runtsch, B.; Scheiter, J.; Grilli, F.; Goldacker, W.  
Laser striations for low AC loss conductors. (eingeladen)  
Materials Research Society 2014 Spring Meeting, San Francisco, Calif., April 21–25, 2014
- Neumann, H.  
Einführung in die Kryotechnik.  
Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 19.–21. März 2014
- Neumann, H.; Sun, J.  
Isolationskonzept für einen modularen Magnetkryostaten für das EU-Projekt: SUPRAPOWER.  
Deutsche Kälte-Klimatagung 2014, Düsseldorf, 19.–21. November 2014
- Neumann, H.  
Thermische Isolation.  
Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 19.–21. März 2014
- Neumann, H.  
Tiefemperaturanlagen – Typen und deren Einsatzbereiche.  
Vortr.: DKV-Bezirksverein Rhein-Neckar, Mannheim, 12. August 2014

- Neumann, H.  
Wärmeübertragung an Kryogene – Kühltechniken.  
Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 19.–21. März 2014
- Noe, M.  
Die Inbetriebnahme des weltweit längsten Supraleiterkabels in Essen. (eingeladen)  
ETP Konferenz 'Kabelanlagen in Mittel- und Hochspannungsnetzen', Düsseldorf, 11.–12. November 2014
- Noe, M.  
Supraleitung in der Energietechnik: Welche Perspektiven eröffnen sich? (eingeladen)  
Arbeitskreis-Energie Symposium 'Physics for the Energy Turn', Berlin, 17. März 2014
- Noe, M.  
Supraleitung in der Energietechnik: Welche Perspektiven eröffnen sich?  
Energie: Forschung und Konzepte; Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung, Berlin, 17.–21. März 2014
- Noe, M.  
The energy transition in Germany - Objectives, status and prospects for superconductivity.  
Seminar at Hydro-Quebec Research Institute, Quebec City, CDN, June 16, 2014
- Otten, S.; Dhalle, M.; Kario, A.; Gao, P.; Wessel, W.A.J.; Kling, A.; Nast, R.; Walschburger, U.; Bagrets, N.; Drotziger, S.; Goldacker, W.  
Transverse pressure dependence of the critical current at 4.2 K in epoxy impregnated REBCO Roebel cables.  
25th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7–11, 2014
- Otten, S.  
Transverse pressure dependence of the critical current in epoxy impregnated REBCO Roebel cables.  
Master Thesis, University of Twente 2014
- Ramalingam, R.  
Fiber Bragg grating sensors for cryogenics and superconducting magnet applications. (eingeladen)  
1st International Symposium on Energy Challenges and Mechanics, Aberdeen, GB, July 8–10, 2014
- Ramalingam, R.  
Investigations on basics of HTS generator and its components assembly in a rotating test stand.  
ZIEHL: Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern, Bonn, 11.–12. März 2014
- Ramalingam, R.  
Study of fiber Bragg grating sensors for current measurement in high temperature superconducting tapes.  
Deutsche Kälte- Klimatagung 2014, Düsseldorf, 19.–21. November 2014
- Ramalingam, R.; Boguhn, D.; Fillinger, H.; Schlachter, S.I.; Süßer, M.  
Study of robust thin film PT-1000 temperature sensors for cryogenic process control applications.  
Weisend, J.G. [Hrsg.]  
Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference, Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013  
Melville, N.Y.: AIP, 2014 pp.126–131  
(AIP Conference Proceedings; 1573)  
(Advances in Cryogenic Engineering; 59A)  
ISBN 978-0-7354-1201-9
- \* Ramalingam, R.K.; Kläser, M.; Schneider, T.; Neumann, H.  
Fiber Bragg grating sensors for strain measurement at multiple points in an NbTi superconducting sample coil.  
IEEE Sensors Journal, 14(2014) pp.873–881  
DOI:10.1109/JSEN.2013.2290153
- Richter, T.; Ramalingam, R.; Neumann, H.  
Fiber Bragg grating sensors for a mass flow determination in a rotating liquid neon cooling channel.  
25th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7–11, 2014
- Rossi, L.; Fazilleau, P.; Bottura, L.; Senatore, C.; Durante, M.; Kirby, G.; Volpini, G.; Bajko, M.; de Rijk, G.; Stenvall, A.; Dhalle, M.M.J.; Zangenberg, N.; Tixador, P.; Goldacker, W.; Yang, Y.; Usoskin, A.; Ballarino, A.; van Nugteren, J.  
The EuCARD-2 future magnets project: the European collaboration for accelerator quality HTS magnets.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- \* Sander, M.; Brighenti, F.; Gehring, R.; Jordan, T.; Kläser, M.; Kraft, D.; Mueller, R.; Neumann, H.; Schneider, Th.; Stern, G.  
LIQHYSMES – Liquid H<sub>2</sub> and SMES for renewable energy applications.  
International Journal of Hydrogen Energy, 39(2014) pp.12007–12017  
DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.06.008
- \* Sander, M.; Gehring, R.; Neumann, H.  
LIQHYSMES – Spectral power distributions of imbalances and implications for the SMES.  
Journal of Physics: Conference Series, 507(2014) pp.032039/1–4  
DOI:10.1088/1742-6596/507/3/032039
- Sarmiento, G.; Tropeano, M.; Funke, R.; Kovac, P.; Yang, Y.; Neumann, H.; Mondesert, B.; Noe, M.  
SUPRAPOWER: a superconducting solution to large power wind generators.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Schlachter, S.I.; Brand, J.; Fillinger, H.; Goldacker, W.; Kling, A.; Ringsdorf, B.; Willms, J.; Wu, H.  
HTS magnet for radiation blackout mitigation experiment.  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014

- Schneider, T.; Hornung, F.; Klaeser, M.; Leys, P.M.; Ruf, C. Future upgrade of the superconducting high field facility HOMER II to 25 T. Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Schneider, T. Supraleitende Hochfeldmagnete. Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 19.–21. März 2014
- \* Schrank, M. Investigation on the degradation and opening behavior of knife blade burst disks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 32(2014) pp.161–164 DOI:10.1016/j.jlp.2014.08.011
- Schrank, M.; Reiner, A. Auslegung eines Gasanwärmers für kryogenes Helium. KI Kälte – Luft – Klimatechnik, (2014) August–September, S.31–35
- Stemmler, M.; Merschel, F.; Noe, M.; Hobl, A.; Lallouet, N. AmpaCity project - Advanced superconducting 10 kV system replaces conventional 110 kV cable system in city center. 2014 CIGRE Session, Paris, F, August 24–29, 2014
- Stemmler, M.; Merschel, F.; Noe, M.; Hobl, A. AmpaCity project update – 40 MVA HTS cable and fault current limiter installation in city center. Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Süßer, M. Einsatz der ITEP-Kalibriereinrichtung zur Kalibrierung kryogener Temperatursensoren. PTB-Kolloquium, Berlin, 18. Februar 2014
- Vojenciak, M.; Kario, A.; Kling, A.; van der Laan, D.; Souc, J.; Jung, A.; Nast, R.; Gömöry, F.; Grilli, F.; Goldacker, W. Experimental investigation of HTS cables with non-uniform current distribution. HTS Fusion Conductors Workshop, Villigen, CH, January 23–24, 2014
- Wu, H.; Schlachter, S.I.; Brand, J.; Fillinger, H.; Goldacker, W.; Kling, A.; Ringsdorf, B.; Willms, J. Cryogenic design and thermal stability analysis of a HTS magnet for radiation blackout mitigation experiment. 25th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7-11, 2014
- Xu, Z.; Lewin, R.; Campbell, A.M.; Cardwell, D.A.; Jones, H. Split-coil magnetisation of bulk HTS: understanding the mechanism. 4th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Bratislava, SK, May 11-14, 2014
- Zermeno, V.; Queval, L.; Grilli, F. A multiscale model for calculating hysteretic losses in superconducting stacks and coils for large scale applications. Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Zermeno, V.; Koutrouveli, K.; Kumar, S.; Holzapfel, B.; Grilli, F. Optimal design of superconducting coils made of coated conductors. Applied Superconductivity Conference (ASC 2014), Charlotte, N.C., August 10–15, 2014
- Zermeno, V.; Krüger, P.; Sirois, F.; Takayasu, M.; Grilli, F. Recent developments in DC models of superconductors and their application to the design of cables and coils. 4th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Bratislava, SK, May 11–14, 2014
- \* Zermeno, V.M.R.; Grilli, F. 3D modeling and simulation of 2G HTS stacks and coils. Superconductor Science and Technology, 27(2014) pp.044025/1–7 DOI:10.1088/0953-2048/27/4/044025
- Zou, S.; Gu, C.; Qu, T.; Li, X.; Han, Z. Critical current uniformity examination of long HTS tape using magnetic-circuit method. Dresden Karlsruhe PhD Seminar, Bad Liebenzell, 25.–27. Juni 2014
- Zou, S.; Gu, C.; Qu, T.; Li, X.; Han, Z. Critical current uniformity examination of long HTS tape using magnetic-circuit method. 4th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Bratislava, SK, May 11–14, 2014

# Veröffentlichungen

## Programm „Struktur der Materie“ (\* Thomson Reuters referiert)

Gil, W.; Bolz, H.; Jansen, A.; Müller, K.; Steidl, M.; Hagedorn, D.

Test of by-pass diodes at cryogenic temperatures for the KATRIN magnets.

Balachandran, U. [Hrsg.]

Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Transactions of the Internat. Cryogenic Engineering Materials Conference, Anchorage, Alaska, June 17-21, 2013

Melville, N.Y.: AIP, 2014 pp.274–280

(AIP Conference Proceedings; 1574)

(Advances in Cryogenic Engineering; 60)

ISBN 978-0-7354-1204-0

Gil, W.; KATRIN Collaboration

The design improvement of the superconducting magnet of the KATRIN cryogenic pumping section.

25<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) and the International Cryogenic Materials Conference (ICMC), Enschede, NL, July 7–11, 2014

Harms, F.; KATRIN Collaboration

Radon induced backgrounds in the KATRIN main spectrometer.

Massive Neutrinos: 561. Wilhelm und Else Heraeus-Seminar, Bad Honnef, 22.–25. April 2014

Hilk, D.; KATRIN Collaboration

Removal of stored electrons in the KATRIN main spectrometer.

Massive Neutrinos: 561. Wilhelm und Else Heraeus-Seminar, Bad Honnef, 22.–25. April 2014

James, T.M.; Rupp, S.; Seitz, H.; Schlösser, M.; Bornschein, B.; Telle, H.H.

Enhanced Raman sensitivity for gas analysis: Capillary laser Raman spectroscopy.

24th International Conference on Raman Spectroscopy (ICORS 2014), Jena, August 10-15, 2014

Niemes, S.; Röllig, M.

Accurate calibration of a laser Raman system with (H,D,T) gas mixtures in thermodynamic equilibrium. DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Molekülphysik, Berlin, 17.–21. März 2014

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), MO 7.6

Rupp, S.; James, T.M.; Telle, H.H.; Schlösser, M.; Bornschein, B.

Enhanced sensitivity of Raman spectroscopy for tritium gas analysis using a metal-lined hollow glass fiber.

DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Quantenoptik und Photonik, Berlin, 17.–21. März 2014

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), Q 18.1

Schlösser, M.; KATRIN LARA Group

Accurate Raman spectroscopy at the KATRIN experiment. HAP Workshop Topic 4, Advanced Technologies, DESY Zeuthen, June 2–3, 2014

Schlösser, M. ; KATRIN LARA Group

Raman spectroscopy at the KATRIN experiment for precise neutrino mass measurement. (eingeladen) Bothe-Colloquium, Heidelberg, 21. Juli 2014

Schlösser, M.; Rupp, S.; Brunst, T.; James, T.M.

Relative intensity correction of Raman spectrometers with NIST standard reference material 2242 in 900 scattering geometry.

24th International Conference on Raman Spectroscopy (ICORS 2014), Jena, August 10–15, 2014

Schönung, K.; Senst, S.

Fibertest - Test for suitability of optical fiber feed-throughs and fibers in tritium atmosphere.

DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Molekülphysik, Berlin, 17.–21. März 2014

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), MO 7.5

Seitz, H.; Rupp, S.; Schlösser, M.; Bornschein, B.; Telle, H.H. Investigation of fluorescence suppression in a capillary Raman system.

DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Quantenoptik und Photonik, Berlin, 17.–21. März 2014

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), Q 30.48

Steidl, M.; Babutzka, M.; KATRIN Collaboration

Status report on the tritium source-related components of the KATRIN experiment.

DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Frankfurt, 17.–21. März 2014

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.49(2014), HK 35.9

# Veröffentlichungen

## Eingeladene Vorträge

### Kai Bauer

- K. Bauer, „Arbeitsschutzmanagementsysteme BGI/GUV-I 5180“, Max-Planck-Gesellschaft – 3. Gemeinsamer Workshop „MPG-HGF-HSE“, 24.06.2014, Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht Heidelberg,
- K. Bauer, „Auswirkungen eines Arbeitsschutzmanagementsystems für eine Wissenschaftseinrichtung“, Helmholtz-Arbeitskreis HSE, 14./15.10.2014, Deutsches Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE), Bonn

### Beate Borschein

- Between fusion and cosmology – The Tritium Laboratory Karlsruhe (TLK), Institutskolloquium des IPP Greifswald 07.11.2014; Abgesagt (Ersatzdatum 06.02.2015)
- KATRIN: DT, TT and HHT, Kolloquium “Lasers and Their Applications”, Swansea University, April 11th 2014
- Tritium Technology for Neutrino Physics, WE Heraeus Seminar 561: Massive Neutrinos, Bad Honnef, April 22th-25th, 2014

### Flavio Brighenti

- Brighenti, F.; Neumann, H.; Sander, M. Implementation of a regenerator concept in a LIQHYSMES - LIQUID HYDROGEN and SUPERCONDUCTIVE MAGNETIC ENERGY STORAGE (SMES) system used for buffering renewable energy production. ECMZ Conference, Aberdeen, GB, August 19-21, 2014

### Christian Day

- Chr. Day, “ITER and DEMO – current status of vacuum systems development”, Workshop 'From Large Scale Vacuum System to Vacuum Metrology', Uppsala, Schweden, April 2014.
- Chr. Day, “Fusion vacuum systems. From experimental devices to power plants”, European Vacuum Congress, Aveiro, Portugal, September 2014.
- Chr. Day, “Fusion exhaust pumping systems – evolution from experimental devices to DEMO”, ANS Topical Meeting on the technology of Fusion Energy, Anaheim, CA, US, November 2014.

### Thomas Giegerich

- Th. Giegerich, „Revival of mercury diffusion pumps - A new, compact design for fusion applications“, Frühjahrstagung DPG, Dresden, April 2014.

### Wilfried Goldacker

- W. Goldacker, “High current, low loss High Temperature Superconductor cables, concepts, properties and applications”, ICAFM 2014 (International Conference on Advanced Functional Materials), Trivandrum, Kerala, Indien, 19.–21.02.2014
- W. Goldacker, F. Grilli, A. Kario, R. Nast, A. Jung, A. Kling, M. Vojenciak J. Souc, F. Gömory, “High current HTS Roebel and Rutherford cable concepts for large magnets, generators and power bars”, Seminar University Twente, Niederlanden, 13.03.2014
- W. Goldacker, A. Kario, F. Grilli, A. Kling, M. Vojenciak, J. Souc, “Application aspects of high current and low loss HTS cables”, ICSM 2014 (International Conference on Superconductivity and Magnetism), Antalya, Türkei, 27.04.–2.05.2014
- W. Goldacker, “HTS Cables for Energy Applications”, Turkish-German Scientific Cooperation Workshop, Ankara, Türkei, 5.–6.05.2014
- W. Goldacker, B. Holzapfel, “Fe-based Superconducting Thin Films: Basic Properties and Potential Applications”, Turkish-German Scientific Cooperation Workshop, Ankara, Türkei, 5.–6.05.2014
- W. Goldacker, A. Kario, F. Grilli, A. Kling, M. Vojenciak, “High current low loss AC cables from HTS coated conductors, the Roebel and Rutherford approach”, International Conference Superconductivity for Energy, Paestum, Italien, 15.–19.05.2014
- W. Goldacker, A. Kario, R. Nast, A. Jung, A. Kling, “Properties of HTS-Roebel cables and the approach for EuCARD-2”, WAMHTS Workshop, Hamburg, 21.–22.05.2014
- W. Goldacker, A. Kario, A. Kling, “Development of Roebel cables for high current applications”, CIMTEC 2014 (International Conference on Modern Materials and Technologies), Montecatini Terme, Toskana, Italien, 8.–20.06.2014

### Francesco Grilli

- F. Grilli et al. “Numerical models of HTS coated conductors are now ready for realistic applications”, CCA 2014, Coated Conductors for Applications, Jeju Island, Korea, 30.11.–2.12.2014



### Bernhard Holzapfel

- B. Holzapfel „Application Aspects of Fe-based Superconductors: Prospects for Coated Conductors“, CCA 2014, 3. December 2014, Jeju
- B. Holzapfel “Fe-based Superconducting Thin Films: Basic Properties and Potential Applications“, Seoul National University, 29. November 2014, Seoul
- B. Holzapfel “Superconducting Materials for Applications in Energy and Magnet Technology“, Symp. GOI, Colloquium of Honour: Prof. Ludwig Schultz, 23. September 2014, Darmstadt
- B. Holzapfel “Fe-based Superconducting Thin Films: Basic Properties and Potential Applications“, ICSM 2014, 1<sup>st</sup> May 2014, Antalya
- B. Holzapfel “Application Aspects of Fe-based Superconductors“, S4E 2014, 18<sup>th</sup> May 2014, Paestum
- B. Holzapfel “Hochtemperatursupraleiter – Materialien für die Energiewende“, ZIEHL IV, 11. März 2014, Bonn

### Anna Kario

- A. Kario, S. Otten, M. S. A. Hossain, B. Ringsdorf, B. Runtsch, A. Jung, R. Nast, W. Goldacker, “The way to solve current percolation problems in MgB<sub>2</sub> cables“, ICSM 2014 (International Conference on Superconductivity and Magnetism), Antalya, Türkei, 27.4.–2.5.2014
- A. Kario, S. Otten, C. M. Bayer, M. Vojenciak, A. Kling, B. Ringsdorf, B. Runtsch, W. Goldacker, “Mechanical Properties of Roebel Coated Conductor Cable“, WAMHTS Workshop, Hamburg, 21.–22.5.2014
- A. Kario et al. “Superconducting properties of Roebel Coated Conductor Cable from Superpower and SuperOx tapes with different transposition length“, CCA 2014, Coated Conductors for Applications, Jeju Island, Korea, 30.11.–2.12.2014

### Rainer Nast

- R. Nast, M. Vojenčiak, A. Kario, A. Jung, E. Demenčik, B. Ringsdorf, B. Runtsch, J. Scheiter, F. Grilli, W. Goldacker, “Laser striations for low AC loss conductors“, MRS Spring Meeting 2014, San Francisco, Kalifornien, USA, 21.–25.04.2014

### Mathias Noe

- M. Noe, „Eccoflow Fault Current Limiter – Task 1 Simulation and Modeling, Final Review Meeting, 13. Februar 2014, Palma de Mallorca, Spanien
- M. Noe, E. Marzahn „Kabel und Strombegrenzer“, 83. Kabelleseminar, 25.-26. Februar 2014, Leibniz Universität Hannover
- M. Noe, „Supraleitung in der Energietechnik: Welche Perspektiven eröffnen sich?“ 17. März 2014, DPG Frühjahrstagung 2014, Berlin
- M. Noe, “The Energy Transition in Germany – Objectives, Status and Prospects for Superconductivity“, Colloquium Ecole Polytechnique Montréal, 25. Juni 2014, Montréal, Kanada
- M. Noe, “The Energy Transition in Germany – Objectives, Status and Prospects for Superconductivity“, Midi Conference, Hydro Quebec, 26. Juni 2014, Montréal, Kanada
- M. Noe, F. Merschel, M. Stemmler, A. Hobl „Die Inbetriebnahme des weltweit längsten Supraleiterkabels in Essen“, Euroforum Konferenz „Kabelanlagen in Mittel- und Hochspannungsnetzen“, 10.–11. November 2014, Düsseldorf

### Magnus Schlösser

- Raman spectroscopy at the KATRIN Experiment for precise neutrino Mass measurement, Bothe-Kolloquium des Max Planck Institut für Kernphysik am 21.07.2014

# Veröffentlichungen

## Schutzrechtsbestände

(\* Neue Schutzrechtsanmeldungen in 2014

\*\* Schutzrechtserteilungen mit Wirkung für Deutschland in 2014

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

Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory

DE 1149452

US 6654222

### **Zusätzliche Einrichtung in einem Strombegrenzer zur Strombegrenzung im Fehlerfall**

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

CH 1817828

DE 1817828 \*\*

DE 102004058633

FR 1817828

GB 1817828

US 7327542

### **Planar-helischer Undulator**

Beckenbach, Max; Eisele, Matthias; Kläser, Marion; Leys, Pauline; Lott, Bernd; Schneider, Theo

DE 102006056052

US 8134440

### **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

EP 1999764

FR 1999764

GB 1999764

US 8255022

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

Gehring, Rainer; Sander, Michael (verstorben)

DE 102007042711

### **Stromversorgung und Verfahren für eine gepulst betriebene induktive Last**

Gehring, Rainer; Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory; Noe, Mathias

DE 102008053679

EP PCT/EP2009/005909

### **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

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

Noe, Mathias; Schacherer, Christian

DE 102010007087.4-34

EP 10805601.1-2222

JP 2012-551507

US 13/577,272

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

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

DE 102010012924

EP 11714215.8-2209

US 8746079

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

Neumann, Holger; Sander, Michael (verstorben)

DE 102011013577

EP 2684198 \*\*

US 14/004,370

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

Brand, Jörg; Elschner, Steffen; Fink, Stefan; Goldacker, Wilfried; Kudymow, Andrej  
 DE 102011107313.6  
 EP 12737485.8-1564  
 JP 2014-517523  
 KR 1020147002881  
 US 14/130,708

**Superconducting devices such as coils, solenoids, toroids, cables and stack like arrays with tapes of varying width**

EP 14002754.1 \*

**Axialer, kryotechnisch geeigneter Potentialtrenner**

Fink, Stefan; Friesinger, Günter  
 DE 1196711

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

Grohmann, Steffen  
 AU 2012351141  
 CA PCT/EP2012/005051  
 DE 102011120899.6  
 EP 12808676.6-1554  
 JP 2014-546347  
 KR PCT/EP2012/005051  
 US 14/364,681

**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

**Supraleitende Magnetanordnung**

Krüger, Philipp  
 DE 102012106211.0

**Verfahren zur Herstellung von Metall- oder Keramik-Mikrobauteilen**

HauBelt, Jürgen; Piotter, Volker; Ruprecht, Robert; Finnah, Guido; Johann, Thomas; Schanz, Gerhard; Holstein, Nils  
 EP 03790808.4

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

Day, Christian; Giegerich, Thomas  
 DE 102013109778.2  
 WE PCT/EP2014/002342



# Kontakt

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

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

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

## Leitung

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

## Stellvertretende Leitung

Dr. Walter Fietz (-24197)

## Sekretariat

Melanie Bacher (-23501)  
Marion Gilliar (-23501)

## Professor a. D.

Prof. Dr. Peter Komarek

## Hochfeldmagnete

Dr. Theo Schneider (-22344)

## Kryotechnik

Dr. Holger Neumann (-22625)

## Supraleitermaterialentwicklung und energietechnische Anwendungen

Dr. Wilfried Goldacker (-24179)

## Abteilung Tritiumlabor Karlsruhe Leitung

Dr. Beate Bornschein (-23239)

## Geschäftsführer

Kai Bauer (-23705)

## Fusionsmagnete

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

## Vakuumtechnik

Dr. Christian Day (-22609)

## Koordination KATRIN im ITEP

Dr. Beate Bornschein (-23239)

## **Kontakt**

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

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

---

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

## **Herausgeber**

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

Stand März 2015

---

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