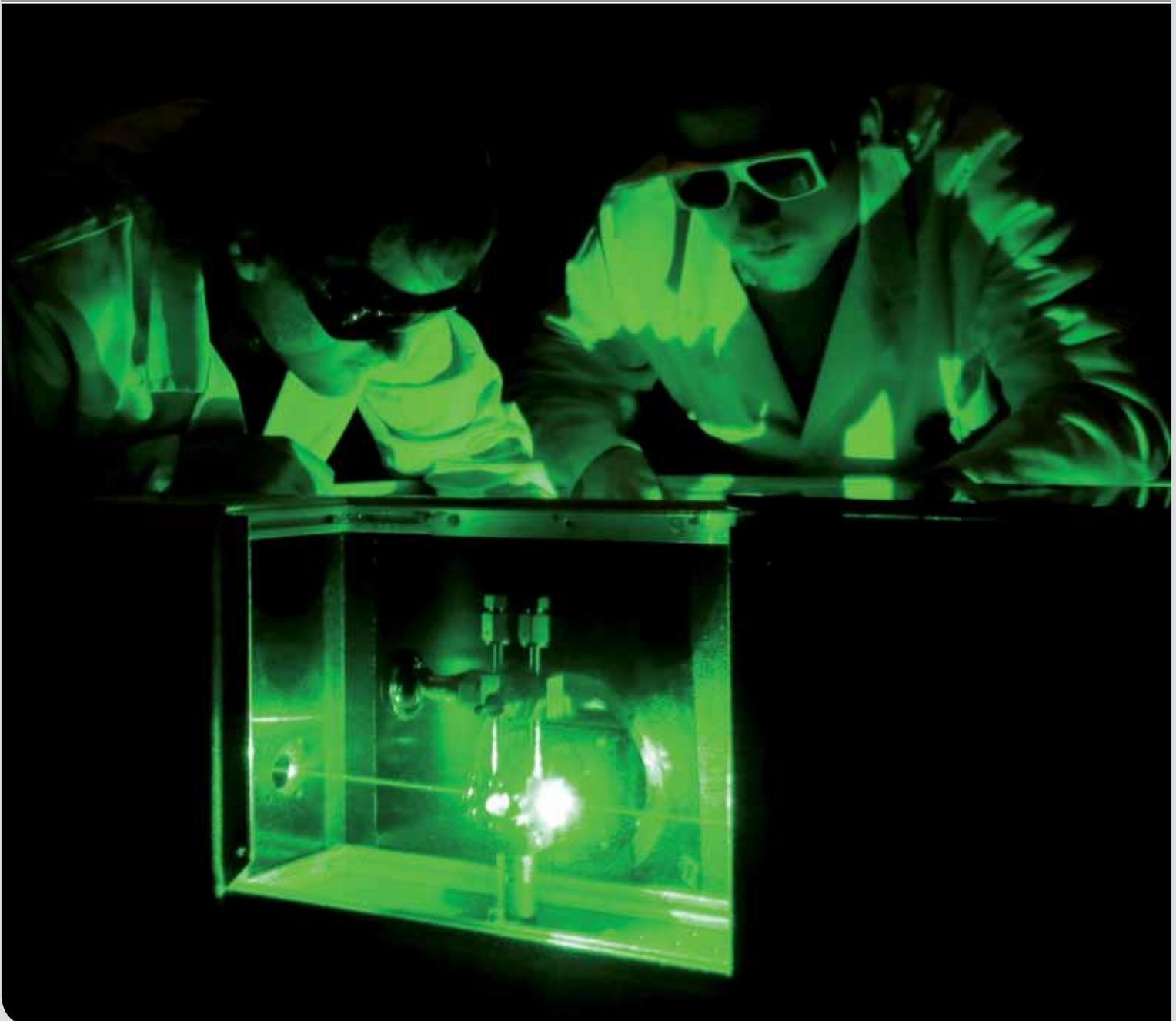


ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung
Jahresbericht 2013

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

Texte: B. Bornschein, C. Day, D. Demange, W. Fietz,
S. Fischer, W. Goldacker, R. Größle, J. Haag, R. Michling,
S. Mirz, H. Neumann, M. Noe, M. Röllig, P. Schäfer,
T. Schneider, M. Sturm

Fotos und Grafiken:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Titelbild: Raman-Messzelle zur Bestimmung der
Zusammensetzung von Tritiumgasgemischen

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

Druck:
Systemedia GmbH, 75449 Wurmberg

März 2014

Inhalt

Vorwort	4
Ergebnisse aus den Forschungsbereichen	6
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	40
Auszeichnungen und Preise	46
Lehre und Bildung	48
Vorlesungen, Seminare, Workshops und Sommerschulen	48
Doktorarbeiten – Master- und Diplomarbeiten – Bachelor- und Studienarbeiten	49
ITEP Kolloquien	51
Zahlen und Daten	52
Organigramm ITEP	52
Personalstand	52
Personalveränderungen	53
Trainee / Studentische Hilfskräfte	54
Gastwissenschaftler	55
Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien	56
Veröffentlichungen	58
Veröffentlichungen Programm „Kernfusion“	58
Veröffentlichungen Programm „Rationelle Energieumwandlung“	63
Veröffentlichungen Programm „Struktur der Materie“	68
Eingeladene Vorträge	71
Schutzrechtsbestände	73
Kontakt	75

Vorwort

Das Institut für Technische Physik (ITEP) versteht sich als nationales und internationales Kompetenzzentrum für Fusions-, Supraleitungs- und Kryotechnologie. Seine Arbeiten fokussieren auf folgende Bereiche:

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

Die Arbeiten des ITEP sind langfristig in den Programmen „Fusion“, „Rationelle Energieumwandlung und -nutzung“ sowie „Astroteilchenphysik“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren verankert.

Um seine komplexen und meist multidisziplinären Aufgaben zu bearbeiten, verfügt das ITEP über einzigartige große Versuchseinrichtungen, Labore 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

Die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse, Erfolge in Entwicklungsprojekten, Herausforderungen und Ereignisse, die das ITEP im Jahr 2013 zu verzeichnen hatte, fassen wir im Folgenden kurz zusammen.

Besonders erfreulich war die Berufung von Professor Bernhard Holzapfel vom IFW Dresden in die kollegiale Leitung des ITEP zum 1. Oktober 2013. Mit Unterstützung der Helmholtz-Gemeinschaft baut Professor Holzapfel eine Arbeitsgruppe „Supraleitende Materialien“ auf. Diese neue Arbeitsgruppe ergänzt in idealer Weise die bisher eher anwendungsorientierten Arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung. Dank der fachübergreifenden Expertise kann das ITEP nun die bei der Forschung und Entwicklung auftretenden Fragen umfas-



Professor Bernhard Holzapfel vom IFW Dresden wurde am 1. Oktober 2013 in die Institutsleitung des ITEP und auf die Professur „Supraleitende Materialien“ am KIT berufen.

send von den Materialien bis zur Anwendung bearbeiten. Bernhard Holzapfel begleitet zugleich die Professur „Supraleitende Materialien“ an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des KIT.

Der Arbeitsbereich **Fusionsmagnete** des ITEP hat für die Fusionsprojekte Wendelstein 7-X und JT60-SA die Entwicklung, den Bau und den Test von Hochstromzuführungen mit Hochtemperatur-Supraleitern übernommen. Im Jahr 2013 nahm das IPP die letzten Stromzuführungen für den Wendelstein 7-X fristgerecht und vollständig ab. Weiterhin führte das ITEP die Fertigung und den Zusammenbau von Hochstromzuführungen für das Projekt JT60-SA erfolgreich fort. Die Anfrage nach kryogenen Materialtests, vor allem für das Fusionsexperiment ITER (www.iter.org), ist erfreulicherweise stetig gestiegen.

Das **Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)** wird bei dem internationalen Fusionsexperiment ITER die Bereitstellungspakete zur Wasserdetritiierung (WDS) und kryogenen Isotopentrennung (ISS) übernehmen. 2013 prozessierte das TLK erstmals hochtritiertes Wasser im ITER-relevanten Maßstab von mehreren Kilogramm. Das vom TLK entwickelte Verfahren basiert auf platinbeschichteten Zeolithbetten. Es erfüllte den geforderten Austauschfaktor von größer 100. Dies bedeutet, dass die Konzentration der Isotopologe nach der Prozessierung um mehr als den Faktor 100 reduziert wurde. Weiterhin wurde eine Inline-Messung an flüssigen Wasserstoffisotopologen aufgebaut und ausgiebigen Tests unterzogen.

Im Bereich **Vakuumtechnik** des ITEP liegen die Schwerpunkte auf der Entwicklung von Vakuumsystemen mit extrem hohen Saugvermögen und der Entwicklung von numerischen Codes, besonders für die Vakuumströmung im Übergangsbereich. 2013 wurde für die Fusion ein neuer Divertor-Neutralteilchen Code vorgestellt, mit dem erstmals gezeigt wurde, dass sich das Plasmaverhalten im Divertor durch die Pumpenauslegung beeinflussen lässt. Dies ermöglicht es, zukünftige Divertoren

deutlich verbessert auszulegen. Weiterhin wurde das am ITEP neu entwickelte Verfahren für den Brennstoffkreislauf mit hohen Durchsätzen bei gleichzeitig niedrigem Inventar als Referenzkonzept für zukünftige Fusionskraftwerke etabliert; Dr. Christian Day wurde zum internationalen Koordinator dieser Entwicklungen ernannt.

Im Bereich **Supraleitermaterialentwicklung** stellt die Entwicklung von wirtschaftlichen, verlustarmen und hochstromtauglichen Leiterkonzepten eine Kernaufgabe dar. Im Rahmen des Verbundprojekts AmpaCity baute das ITEP ein Modellkabel auf; die Wechselstrom-eigenschaften dieses Kabels wurden genauestens charakterisiert. Dem Verbundpartner stellte das ITEP damit zur Auslegung zukünftiger Energiekabel ein neues Modellierungswerkzeug zur Verfügung. Was **energietechnische Anwendungen der Supraleitung** betrifft, wurde innerhalb eines europäischen Verbundprojektes (www.eccoflow.fp7-eu) ein supraleitender Strombegrenzer für 20 kV, 1 kA am Ort der Inbetriebnahme aufgestellt und zuvor erfolgreich getestet. Weiterhin testete das ITEP mit Erfolg einen ersten Demonstrator für eine neuartige Form der Strombegrenzung durch konventionelle Drosselspulen, verbunden mit einem supraleitenden Einsatz.

Der Arbeitsschwerpunkt des **Hochfeldlabors** liegt auf der Entwicklung von Hochfeld-NMR-Systemen mit Hochtemperatur-Supraleitern. 2013 fertigte das ITEP im Rahmen einer Industriekooperation mehrere hochtemperatursupraleitende Einsatzspulen und testete sie erfolgreich in seinen Hochfeldanlagen bei mehr als 20 Tesla. Die Richtungsabhängigkeit der kritischen Stromdichte vom Magnetfeld wurde für weitere Supraleiterproben untersucht. Im Rahmen der Entwicklung eines Demonstrators für einen supraleitenden magnetischen Energiespeicher wurden zwei supraleitende Spulen gewickelt und erfolgreich auf ihre Stromtragfähigkeit geprüft.

Der Bereich **Kryotechnik** entwickelt, erweitert und betreibt komplexe und umfangreiche Kryosysteme, beispielsweise für das Neutrinoexperiment KATRIN oder die Stromzuführungstestanlage CuLTka. Die Anlage CuLTka wurde 2013 fertiggestellt; damit steht sie rechtzeitig für die 2014 beginnenden Tests der Stromzuführungen für das Projekt JT60-SA bereit. 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) erstellte das ITEP fristgerecht den Designreport für die Auslegung des Kryostaten und schlug weitere Verbesserungen vor.

Für das **Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN** (www.katrin.kit.edu) leistet das ITEP wichtige Beiträge zu den Tritiumkreisläufen, zur Kryoversorgung und zu den

supraleitenden Magneten. Für die Rear Section von KATRIN erstellten Forscher des ITEP gemeinsam mit internationalen Kollegen ein neues Konzept und nahmen den Design Report von der Kollaboration an. Florian Priester vom TLK wurde zum Task Leiter für diesen Bereich ernannt. Weiterhin wurden wichtige Arbeiten für die Kryotechnik der kryogenen Pumpstrecke übernommen.

Was **personelle Veränderungen** betrifft, stieg die Zahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Ausbildung, wie Studentinnen und Studenten der Dualen Hochschule, Diplomanden, Doktoranden und Trainees, erfreulicherweise weiter an. Insgesamt bildet das ITEP nun schon mehr als 70 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in verschiedenen Disziplinen aus. Einen schmerzlichen Verlust erlitt das Institut durch den Tod seines langjährigen verdienten Mitarbeiters Gunther Dittrich. Er war am ITEP verantwortlicher Operateur für den Betrieb der TOSKA Anlage.

In der **Lehre** wurden weitere Vorlesungen neu konzipiert und eingeführt. Insgesamt boten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP 2013 Vorlesungen im Umfang von mehr als 30 Semesterwochenstunden im Jahr für Studierende des KIT an. Zahlreiche vom ITEP organisierte nationale und internationale Seminare, Sommerschulen und Workshops ergänzen das Lehrangebot. So wurde 2013 bereits zum siebten Mal die europäische Sommerschule für Materialien und Anwendungen der Supraleitung vorbereitet und am KIT durchgeführt.

Im Juli 2013 wurde die Feier zum 20-jährigen Bestehen des Tritiumlabors Karlsruhe mit dem traditionellen Sommerfest des ITEP verknüpft. Wir bedanken uns herzlich bei allen Helferinnen und Helfern sowie allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern.

Unser ganz besonders herzlicher Dank gilt allen Partnern des ITEP aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie für die ausgesprochen vertrauensvolle, fruchtbare und erfolgreiche Zusammenarbeit im Jahr 2013.

Herzlichst



Mathias Noe

Bernhard Holzapfel

Kollegiale Institutsleitung



Neuer Zwölf-Tesla-Magnet der FBI-Anlage zur Messung von Supraleiterkabeln unter realistischen Betriebsbedingungen.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Fusionsmagnete

Leitung: Dr. Walter Fietz

Der Bereich Fusionsmagnete des ITEP führte im Jahr 2013 Arbeiten für das nationale Projekt W7-X und 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 W7-X und JT-60SA

Arbeiten für Wendelstein 7-X

Das ITEP hat für den Stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) insgesamt 16 Stromzuführungen für einen Strom von 18,2 kA entwickelt, gebaut und getestet. Durch die Verwendung des Hochtemperatur-Supraleiters (HTS) BiSCCO ließen sich die Verluste im Bereich unterhalb 60 K deutlich reduzieren, da das HTS-Material in diesem Temperaturbereich keinen Widerstand zeigt. Nach dem erfolgreichen Test zweier Prototypen baute das ITEP 14 Serienstromzuführungen für W7-X und testete sie erfolgreich. Alle Stromzuführungen sind mittlerweile an W7-X geliefert und werden zurzeit in die Maschine integriert.

Arbeiten für JT-60SA

Angesichts der Expertise des ITEP bei HTS-Stromzuführungen hat das BMBF 2007 zugesagt, Stromzuführungen für den Bau des Satelliten-Tokamaks JT-60SA zu liefern. In einem ersten Projektteil 2008 bis 2012 wurden das Design ausgearbeitet, die Anschlussbereiche an JT-60SA zusammen mit F4E und Japan fixiert, die Konstruktion fertiggestellt und alle für den Bau notwendigen Materialien beschafft.

Innerhalb eines zweiten Projektteils, dessen Finanzierung bis Februar 2017 laufen wird, begann 2013 die Fertigung der Stromzuführungen. 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

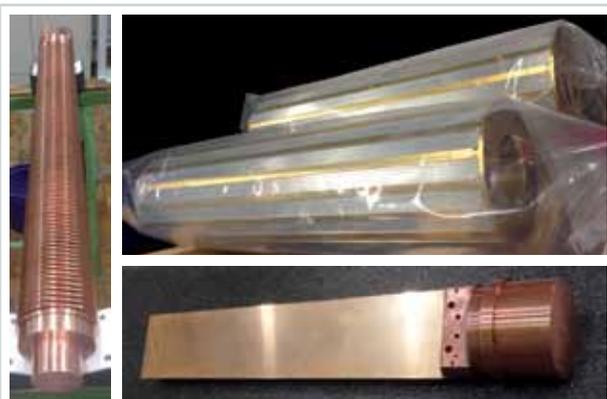


Abb. 1: Komponenten für die 26-kA-Stromzuführung.



Abb. 2: Wärmetauscher mit isoliertem Hüllrohr.

JT-60SA benötigt. Aufbauend auf den Erfahrungen bei der Fertigung der Stromzuführungen für W7-X, werden alle Stromzuführungen im KIT gefertigt, wobei das Technikhaus am KIT Campus Nord eng eingebunden ist. Fast alle Halbzeuge für die 26-kA-Stromzuführungen sind inzwischen gefertigt (siehe Abbildung 1 + 2); alle Wärmetauscher stehen bereit. Der Zusammenbau des ersten Stromzuführungspaares hat begonnen; dieses wird voraussichtlich Anfang 2014 fertiggestellt sein.

Stromzuführungs-Testanlage CuLTKa

Die für die Tests der 26 Stromzuführungen für JT-60SA benötigte neue Testanlage CuLTKa (Current Lead Test facility Karlsruhe), siehe Abbildung 3, wurde 2013 weitgehend fertiggestellt und soll Anfang 2014 in Betrieb gehen. Damit wird sie gleichzeitig mit dem ersten zu testenden Stromzuführungspaar zur Verfügung stehen.



Abb. 3: Ventilbox (rechts), Kontrollkryostat (Mitte) und zweite Ventilbox (hinten links) in der Testanlage CuLTKa.

Entwicklung von Kabeln aus Hochtemperatur-Supraleitern

Beim Imprägnieren von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) mit Epoxy besteht das Problem der deutlich unterschiedlichen thermischen Ausdehnung des HTS-Bands (siehe Abbildung 4). Dies führt zu einer Degradation des kritischen Stroms. Um die thermische Ausdehnung des Epoxy dem des HTS-Bands anzupassen, lässt sich ein Füllmaterial verwenden, beispielsweise Quarzsand. Das Epoxy Stycast scheidet für die Imprägnierung aus, da

dabei das supraleitende Material im direkten Kontakt chemisch angegriffen wird. Araldit zeigt diesen Effekt nicht. Entsprechend imprägnierte HTS-Bänder mit Araldit und Quarzsand (1:1) zeigen keine Degradation, auch nach mehreren Temperaturzyklen.

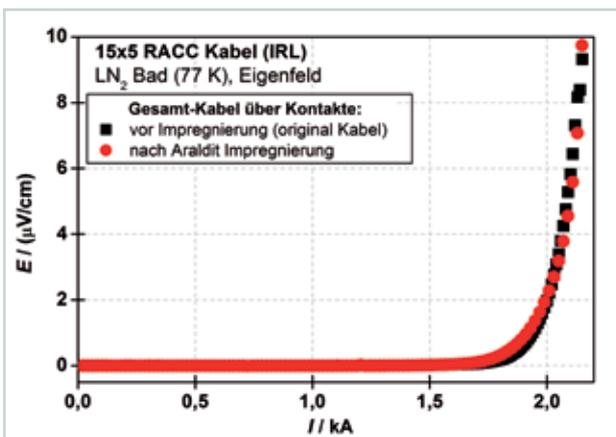


Abb. 4: Kritischer Strom eines HTS-Bands vor und nach Imprägnierung mit Araldit/Quarz-Sand (1:1).

Im Rahmen der Erweiterung der FBI-Anlage zur Messung von supraleitenden Kabeln bis 10 kA realisierte das ITEP 2013 den nächsten Schritt: Ein supraleitender Zwölf-Tesla-Spalt-Magnet mit vergrößertem Probenraum wurde erfolgreich installiert. Damit hat sich der verfügbare Probenquerschnitt verdoppelt (40 mm x 80 mm), sodass es möglich ist, HTS-„Sub-Size“-Proben zu testen.

Zusammen mit CRPP (Schweiz) testete das ITEP ein „Stacked Tape“-Kabel (siehe Abbildung 5). In Vorbereitung ist auch ein Roebel-Kabel mit einer verbesserten mechanischen Stabilisierung.

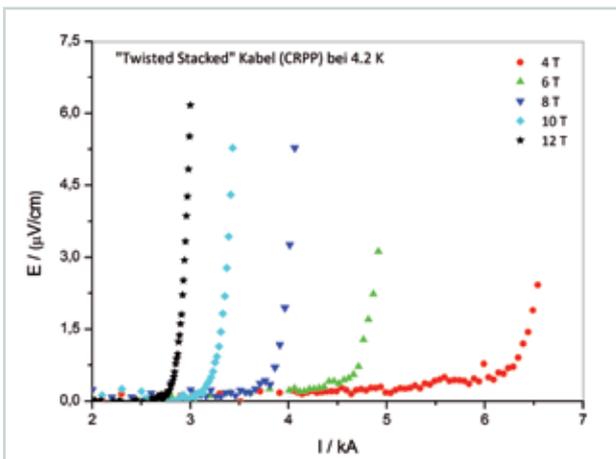


Abb. 5: Messung des kritischen Stroms bei verschiedenen Magnetfeldstärken und 4,2 K. Das Kabel wurde von CRPP (Schweiz) zur Verfügung gestellt.

Designkonzept einer TF-Spule für DEMO

Im Rahmen einer Doktorarbeit wird ein Konzept einer TF-Spule mit REBCO-Bandleitern für den Fusionsreaktor DEMO untersucht. Ausgehend von existierenden Leiterkonzepten (CORC, TSC, Roebel-Rutherford), wurde ein mit Helium gekühlter und mit einer Stahlhülle versehener Leiter ausgewählt; damit wurde das Wicklungspaket einer TF-Spule ausgelegt (siehe Abbildung 6). Basis

ist das aktuelle DEMO-Design, das sich aus dem PRO-CESS Systemcode ableiten lässt. Als Betriebstemperatur wurde 4,5 K ausgewählt, um das Potential der HTS-Materialien optimal auszuschöpfen.

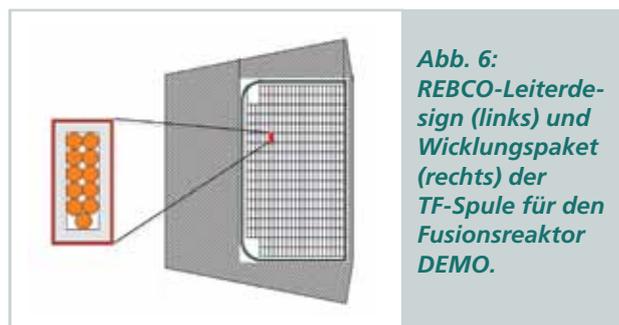


Abb. 6: REBCO-Leiterdesign (links) und Wicklungspaket (rechts) der TF-Spule für den Fusionsreaktor DEMO.

Anhand von aktuellen REBCO-Leiterdaten (siehe Abbildung 7) wurden die Temperaturmarge und die adiabatische Hotspot-Temperatur für den Fall eines Quenchs mit anschließender Sicherheitsentladung bestimmt. Im Vergleich zu ITER ist es möglich, mit einer wesentlich größeren Entladezeitkonstanten zu arbeiten, was trotz einer höheren Windungszahl zu einer vertretbaren Entladespannung führt. Die Temperaturmarge beträgt ca. 11 K und ist damit weitaus größer als beim LTS-Design mit Nb₃Sn.

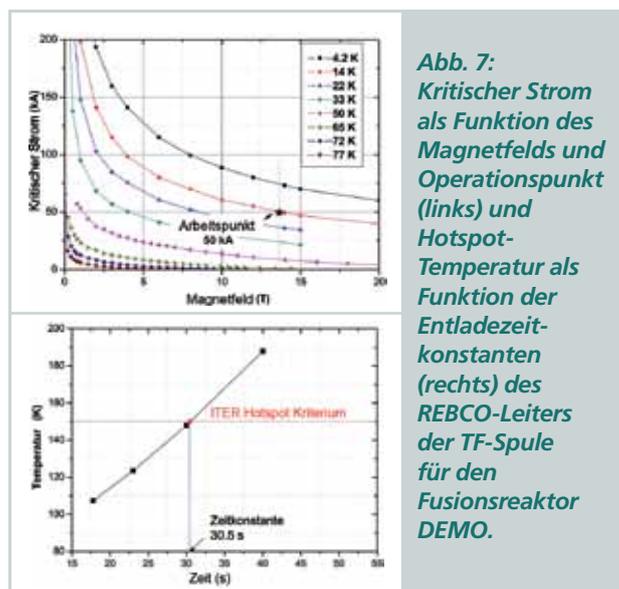


Abb. 7: Kritischer Strom als Funktion des Magnetfelds und Operationspunkt (links) und Hotspot-Temperatur als Funktion der Entladezeitkonstanten (rechts) des REBCO-Leiters der TF-Spule für den Fusionsreaktor DEMO.

Als nächste Schritte der Arbeit sind eine Strukturanalyse, eine hydraulische und eine thermohydraulische Analyse des REBCO-Leiters vorgesehen.

CryoMaK – Kryogenes Material Test Labor

Arbeiten für ITER

Mit der weltweit zunehmenden Produktion für ITER werden immer mehr kryogene Komponenten und Strukturmaterialien zu Qualifizierungszwecken im Labor CryoMaK untersucht. So werden mittlerweile Materialproben von den Kabelhüllen der Toroidal- und der Poloidalspulen, des Zentralen Solenoiden und der Korrekturspulen sowie das Grundmaterial der Radialplattensegmente und Neutronenschilddmaterialien mit Bor-Legierungen des Kryostaten getestet. Die aktuellen Untersuchungen konzentrieren sich auf metallische Werkstoffe. Dabei werden Zugversuche, bruchmechanische Tests, thermische Ausdehnungs- und Leitfähigkeits-tests vorgenommen. Seit Oktober 2013 ist auch die Cha-

rakterisierung der spezifischen Wärme von 4,2 K bis Raumtemperatur im Magnetfeld bis 9 T möglich.

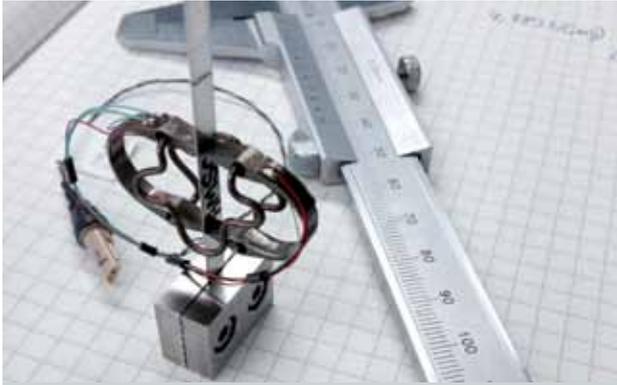


Abb. 8: HTS-Draht vorbereitet mit Extensometer für Zugversuch bei Raumtemperatur.

Normierungsarbeit für IEC

Das Regelwerk der IEC 61788 definiert verschiedene Begriffe für Supraleiter und legt diverse Charakterisierungsmethoden fest. Unter anderem enthält es grundlegende Normen für klassische Supraleiter wie Nb_3Sn oder $NbTi$. Da derzeit der Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern in den Vordergrund rückt, besteht auch dazu entsprechender Normungsbedarf. 2013 lief ein internationaler Ringversuch, beginnend mit mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur (siehe Abbildung 8). Beteiligte Labore waren Daido University, RIAS und Furukawa (Japan), Andong University (Korea), University Twente (Niederlande), NHMFL (USA), die Firma CEME (Deutschland) sowie das CryoMaK Labor am KIT. Kommerzielle HTS-Bänder von ca. 4 mm Breite wurden von AMSC, SuperPower, SuNAM und Fujikura für die Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse ermöglichen es, die Testrichtlinie für den Normtext zu überprüfen und die Messunsicherheiten zu den Ergebnissen zu bewerten. Auf der „Applied Superconductivity Conference“ 2014 in Charlotte (USA) wird eine Zusammenstellung und Auswertung der Resultate aller Beteiligten präsentiert.

Weiterführend ist geplant, die Messmethoden für die HTS-Bänder auf die typischen Charakterisierungsmethoden bei kryogenen Temperaturen, wie Dehnungsabhängigkeit des kritischen Stroms sowohl axial als auch unter Biegung, zu erweitern.

GSI – Nuklotronkabel

Bei der Herstellung des Nuklotronkabels für das Projekt FAIR (siehe Abbildung 9) müssen die supraleitenden Strands außen auf einem zentralen Kühlrohr fixiert werden. Bisher wird dazu ein NiCr-Draht verwendet. Dieser kann allerdings die Oberfläche des supraleitenden Drahts verletzen. Daher soll stattdessen ein Karbon- bzw. Kevlar-Faden eingesetzt werden. In Zusammenarbeit mit GSI und BNG untersuchte das ITEP zwei unterschiedliche Fadentypen (Probe 1 und 2: Para-Aramid Zwirn; Probe 3: Para-Aramid Twaron Zwirn). Dazu adaptierten die Forscher das

Testverfahren für Fäden bei Raumtemperatur für kryogene Temperaturen. Generell wurde eine Zugkraft von ca. 100 N bei RT erreicht (siehe Abbildung 10). Für eine ausreichende Statistik sind jedoch weitere Tests bei Raumtemperatur und kryogenen Temperaturen notwendig.

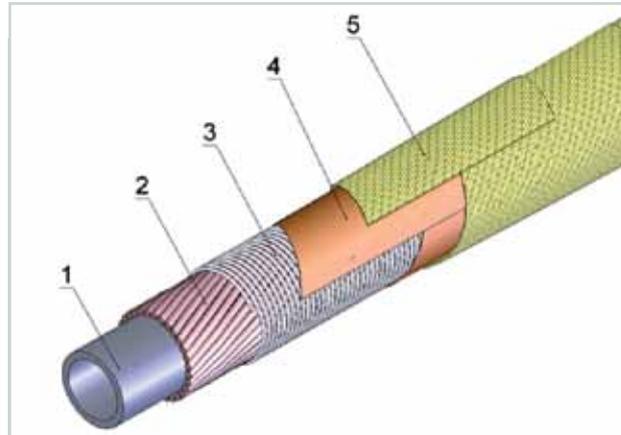


Abb. 9: Nuklotronkabel: 1 CuNi-Rohr, 2 SL-Draht, 3 NiCr-Draht (evtl. Karbon/Kevlar-Faden), 4 Kapton, 5 Glasfasern.

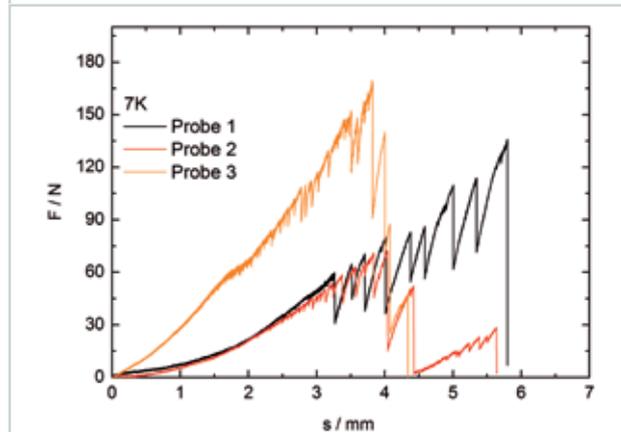
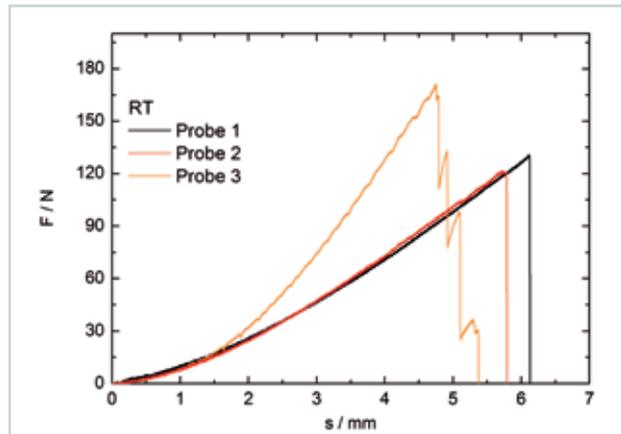


Abb. 10: Mechanisches Verhalten unter Zugbelastung bei Raumtemperatur und 7 K (Probe 1 und 2: Para-Aramid Zwirn und Probe 3: Para-Aramid Twaron Zwirn).

Highlight: He-Inlet-Prototypen für die ITER TF-Spulen erfolgreich getestet

Nachdem die ersten Kabellängen für die TF-Spulen erfolgreich fertiggestellt worden sind, geht die Produktion in die nächste Phase: Die Kabel werden in der typischen D-Form gewickelt und mit sogenannten Helium-Inlets ausgestattet. Danach lässt sich die Temperaturbehandlung der Kabelwindung vornehmen.

Die Qualifizierung der He-Inlets ist ein kritischer Punkt – das ursprüngliche Design von 2005 hielt den erforderlichen mechanischen Belastungen nicht stand: Ein Ermüdungstest mit dem Ziel, 600 000 Zyklen unter einer Wechselbelastung von 0,08 bis 0,14 Prozent Dehnung zu erreichen, musste nach ca. 480 000 Zyklen abgebrochen werden, weil eine Schweißnaht versagte.

Inzwischen wurde das Design grundlegend überarbeitet; dabei wurde die tatsächliche Belastung im Betrieb berücksichtigt. Zum Belastungstest bei 4,2 K für ITER wur-

den sowohl sechs in Europa gefertigte Prototypen als auch zwei japanische Prototypen bereitgestellt (siehe Abbildung 11). Das ITER testete von den insgesamt acht Komponenten sechs Stück bis 261 000 Zyklen mit einem Dehnungsbereich von 0,079 bis 0,125 Prozent, ein Stück mit dem gleichen Dehnungsbereich bis 600 000 Zyklen. Darüber hinaus wurde ein He-Inlet unter extremer Belastung von 0,094 bis 0,14 Prozent Dehnung bis 600 000 Zyklen getestet. Alle He-Inlets durchliefen den Test erfolgreich ohne Versagen bis zu den anvisierten Belastungszyklen. Damit ist es gelungen, das Design der He-Inlets bezüglich struktureller Integrität zu verifizieren. Die Produktion der TF-Spulen kann nun in die nächste Phase treten. Aufgrund des Erfolgs der Tests ist geplant, 2014 weitere japanische He-Inlet-Prototypen zu testen.

Die zeitlich und inhaltlich ausgesprochen ambitionierte Testkampagne ließ sich nur dank der Motivation und des Engagements der CryoMaK-Arbeitsgruppe bewältigen, die diesen Einsatz zusätzlich zu parallel laufenden Aufgaben leistete.



Abb. 11: Vier europäische Prototypen der He-Inlets für die ITER TF-Spulen mit einer Länge von je etwa 1,2 m. Außen die Klammern zum Montieren der Komponente in der Testeinrichtung, in der Mitte (siehe Pfeil) das eingeschweißte Rohrstück für den Helium-Einlass.

Highlight: Arbeiten an den Stromzuführungen für Wendelstein 7-X abgeschlossen

Für den Stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) hat das ITEP insgesamt 16 Stromzuführungen entwickelt, gebaut und getestet. Zwei Prototypen und 14 Serien-Stromzuführungen wurden mit BiSCCO-Supraleitern (HTS) ausgerüstet, welche die erforderliche Kälteleistung deutlich reduzieren. Die Stromzuführungen wurden für 18,2 kA ausgelegt (siehe Abbildung 12).

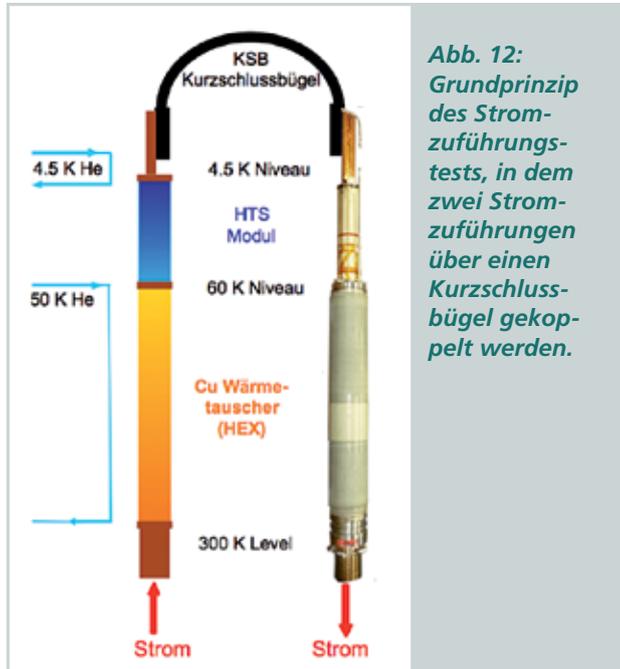


Abb. 12: Grundprinzip des Stromzuführungstests, in dem zwei Stromzuführungen über einen Kurzschlussbügel gekoppelt werden.

Nach dem erfolgreichen detaillierten Test der beiden Prototyp-Stromzuführungen 2010 und der Freigabe der Fertigung der 14 Serienstromzuführungen lief bis Oktober 2012 die Serienfertigung am KIT (siehe Abbildung 13).



Abb. 13: Drei W7-X-Stromzuführungen.

Bis März 2013 wurden alle Serien-Stromzuführungen einem Abnahmetest unterzogen. Alle Tests lieferten reproduzierbare gute Ergebnisse.

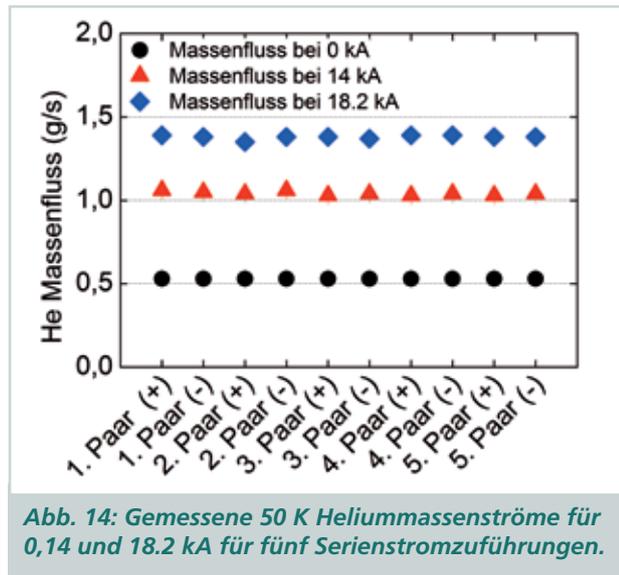


Abb. 14: Gemessene 50 K Heliummassenströme für 0, 14 und 18,2 kA für fünf Serienstromzuführungen.

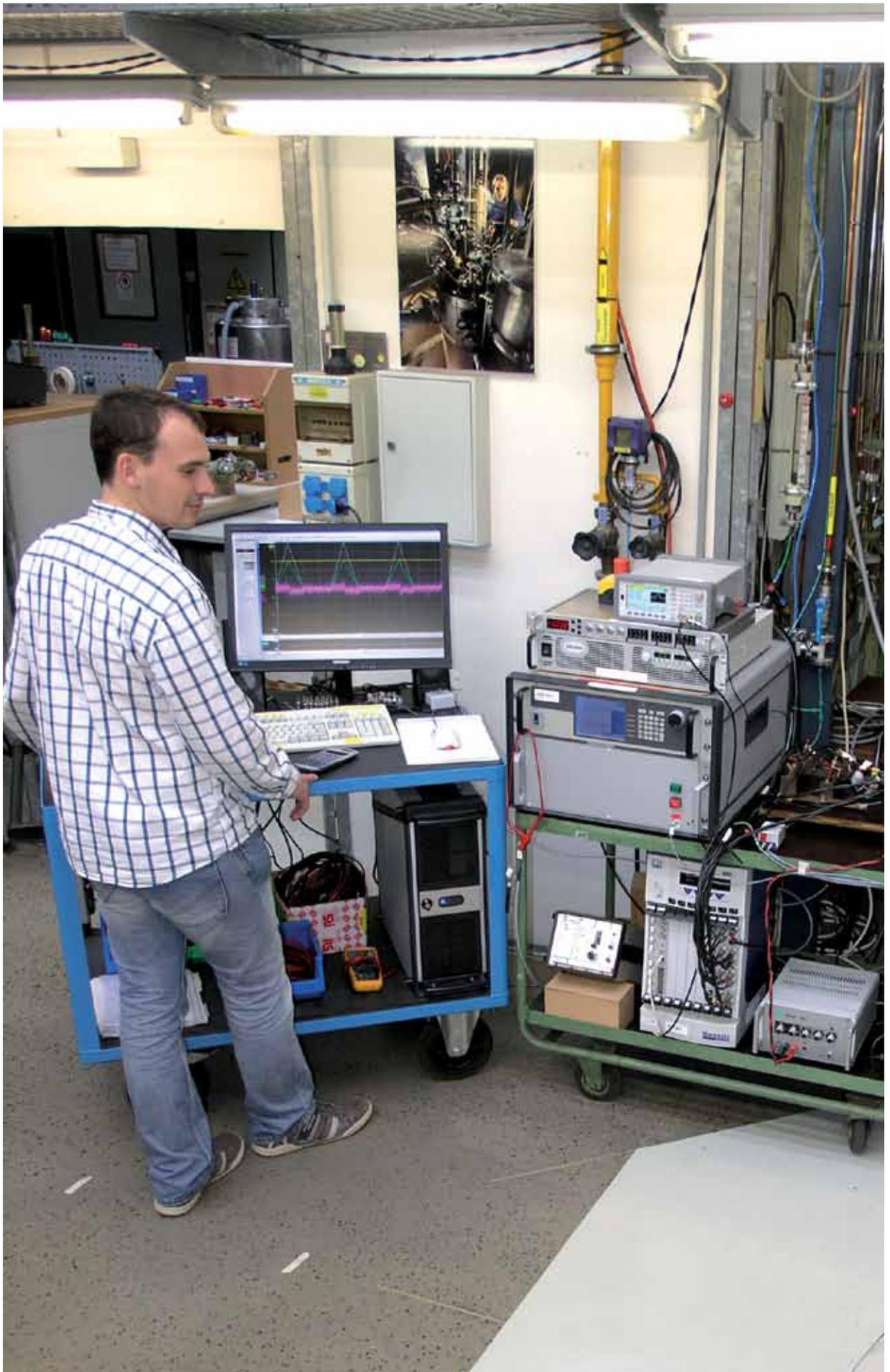
Von 2011 bis 2013 wurden alle 14 Serienstromzuführungen für W7-X erfolgreich getestet (siehe Abbildung 14). Erfolgreich durchgeführte Tests:

- SZF 1-ABF61 + 62 (04/2011)
- SZF 1-ABF63 + 64 (09/2011)
- SZF 1-ABF65 + 66 (11/2011)
- SZF 1-ABF67 + 68 (03/2012)
- SZF 1-ABF69 + 70 (07/2012)
- SZF 1-ABF71 + 72 (10/2012)
- SZF 1-ABF73 + 74 (12/2012)
- SZF 1-ABF61 + 63 (02/2013)

Nach der Auslieferung der Stromzuführungen an das IPP in Greifswald sind die Arbeiten des ITEP für Wendelstein 7-X erfolgreich abgeschlossen.



Abb. 15: Übergabe der Abnahmeprotokolle des letzten gelieferten Stromzuführungspaares durch das IPP beim Abschlusskolloquium am KIT.



Aufbau und Inbetriebnahme der Magnetstromversorgung mit integriertem Quenschutzkonzept für einen supraleitenden Energiespeicher im Rahmen des EWI-LIQHYSMES Projekts.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Supraleitende Hochfeldmagnete

Leitung: Dr. Theo Schneider

Der Bereich Supraleitende Hochfeldmagnete (HFM) des ITEP befasste sich 2013 vor allem mit der Entwicklung von Einsatzspulen mit kommerziellen REBCO-Bandleitern für Hochfeldmagnetsysteme mit Zentralfeldstärken von 25 bis 30 T. Die Ergebnisse bilden die Grundlagen für den Ausbau von HOMER II und die Entwicklung eines hochauflösenden 1200-MHz-NMR-Spektrometers in Kooperation mit der Bruker BioSpin GmbH. In einem weiteren Projekt mit Bruker BioSpin liefen die Arbeiten zur Qualitätssicherung der NMR-Spektrometer mit Frequenzen von 800 bis 1000 MHz weiter. Überdies trieb das ITEP den Ausbau und die Modernisierung des Hochfeldlabors voran. Das Projekt LIQHYSMES wurde fortgesetzt, das europäische Projekt EuCARD wurde abgeschlossen.

LIQHYSMES

Das Projekt LIQHYSMES (LIQUid HYdrogen & SMES) befasst sich mit einem Lösungsansatz zum Ausgleich von Einspeise- und Lastschwankungen durch fluktuierende regenerative Quellen bei der Energieversorgung. LIQHYSMES ist ein Hybrid-Speicherkonzept, 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. Dieser wird mit dem Supraleiter MgB_2 gefertigt. In einem von der Wasserstoffinitiative EWI geförderten Projekt soll das Funktionsprinzip anhand eines Demonstrators gezeigt werden. Der Bereich Kryotechnik des ITEP ist mit den Arbeiten zum Wärmeübertrager und Kryostaten betraut, die Wasserstoffgruppe des IKET mit allen Aspekten des Umgangs mit flüssigem Wasserstoff, der Bereich HFM des ITEP mit der Magnetspulenentwicklung und Magnetstromsteuerung.

Die SMES-Spulen werden mit einem kommerziellen MgB_2 -Leiter der Firma Columbus Superconductors gefertigt. Dazu nahm das Hochfeldlabor umfangreiche Charakterisierungen abhängig von Magnetfeld, Temperatur und Wickeldurchmesser vor. Die Designstudien der Gruppe für die großvolumige Demonstrator-Spule sind abgeschlossen; die konstruktiven Detailarbeiten werden bis Frühjahr 2014 beendet.

Die Magnetstromsteuerung der SMES-Spule wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit aufgebaut und in Betrieb genommen. Abbildung 1 zeigt das prinzipielle Blockschaltbild der Magnetstromsteuerung. Um den späteren Betrieb der Teilentladung des SMES zu simulieren, wurden zur Stromversorgung zwei Netzgeräte verwendet: ein Netzgerät für die Aufprägung eines konstanten Untergrundstroms und ein Vier-Quadranten-Netzgerät zur Lade- und Entladesimulation. Das Funktionsprinzip des Aufbaus wurde zunächst an einer einlagigen REBCO-Spule ($\varnothing = 150$ mm, $l = 300$ mm) bei 77 K getestet. Die

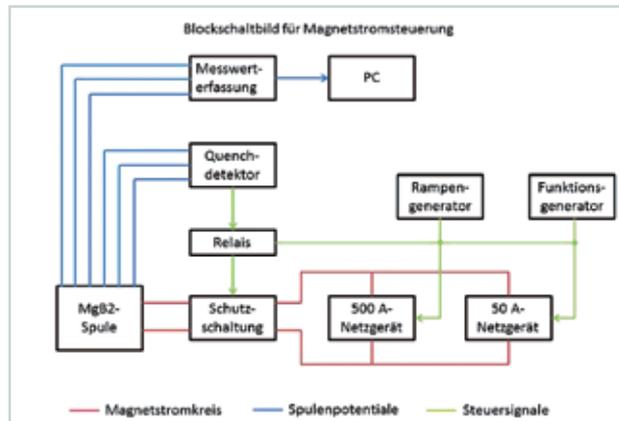


Abb. 1: Blockschaltbild der Magnetstromsteuerung der EWI- MgB_2 -Demonstratorspule.

projektrelevanten Messungen wurden an einer gleich großen einlagigen MgB_2 -Spule bei 4,2 K in der HOMER I-Anlage vorgenommen. Dabei wurde die MgB_2 -Spule mit frequenzabhängigen Lade- und Entladezyklen in verschiedenen Kurvenformen stabil bis zu 95 Prozent des I_c -Werts betrieben. Abbildung 2 zeigt als Beispiel das Verhalten der MgB_2 -Spule bei dreiecksförmigen Stromänderungen mit einer Amplitude von 50 A und

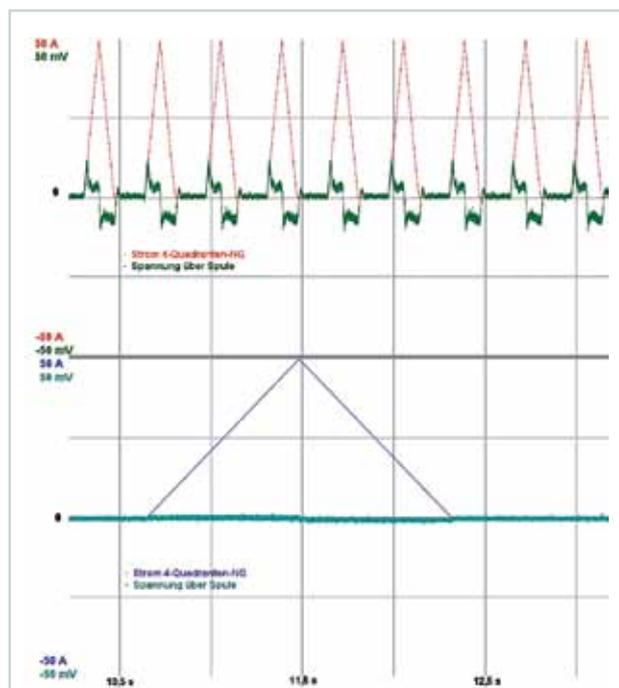


Abb. 2: Verhalten der MgB_2 -Testspule bei dreiecksförmigem Lade- und Entladezyklus mit Frequenzen von 0,3 Hz oben bzw. 3 Hz unten.

Frequenzen von 0,3 Hz bzw. 3 Hz. Das Quenchdetektionssystem mit nachfolgender Schutzschaltung wurde ebenfalls erfolgreich getestet. Zur Verbesserung des Schaltverhaltens des Schutzsystems lassen sich optional Leistungsthyristoren einsetzen.

Infrastruktur – Ausbau und Modernisierung

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten im Bereich HFM liegt auf der Instandhaltung und Modernisierung der Experimentieranlagen JUMBO und HOMER I sowie der fortlaufenden Integration von Anlagenkomponenten in das Prozessleitsystem. So nahm das HFM-Team unter anderem bei HOMER I eine temperaturgesteuerte Automatik zum Aufwärmen der 20-T-Einsatzspule auf einen definierten Grenzwert mit Überhitzungsschutz sowie eine automatische Einkühleinheit der Einsatzspulen von RT auf 4,2 K mit kontrollierten Abkühlgeschwindigkeiten erfolgreich in Betrieb. Die Vorarbeiten zur Umstellung der HOMER I-Heizungen auf eine kontinuierliche, prozessleitgesteuerte Regelung sind erfolgt, die Arbeiten werden 2014 abgeschlossen.

Für die JUMBO-Anlage hat ein DHBW-Student in seiner Bachelorarbeit eine neue Temperaturregelung zur Restwiderstandsbestimmung von technischen Supraleitern aufgebaut und getestet. Das Restwiderstandsverhältnis RRR stellt eine wichtige physikalische Größe dar, deren Wert unter anderem die Verwendbarkeit einer Kupfersorte als Wärmetauschermaterial in den ITEP-Stromzuführungen erkennen lässt. Im supraleitenden Magnetbau beeinflusst der RRR-Wert die kryogene Stabilität und das Quenchverhalten der Magnetspulen. Daher bildet der RRR-Wert als Qualitätsmaßstab einen wichtigen Parameter bei den Abnahmetests der Supraleiter für große Magnetsysteme. Der Aufbau der Regeleinheit ist derart realisiert, dass sich an den Standardtestobjekten mit 10 cm langen Supraleiterproben sowohl der $I_c(B)$ -Verlauf als auch der RRR-Wert ermitteln lassen. Derzeit läuft die Erweiterung zur Messung der Übergangskurve der Supraleiter.

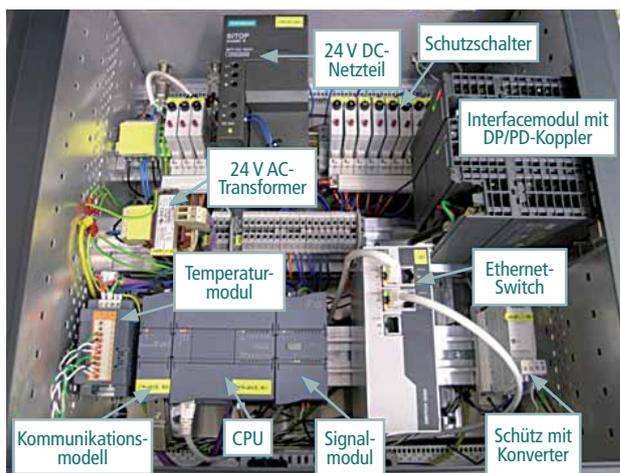


Abb. 3: Hardware der Temperatur-Regeleinheit.

EuCARD

Mit der Entdeckung des nach dem britischen Physikers Peter Higgs benannten Higgs-Bosons im Jahr 2012 hat der Large Hadron Collider (LHC) am Beschleunigerzentrum CERN seine wichtigste Aufgabe erfüllt. Für die theoretische Vorhersage des Higgs-Teilchen und des Higgs-Mechanismus erhielten Higgs und Francois Englert 2013 den Nobelpreis in Physik.

Um den Erkenntnishorizont des LHC-Beschleunigers zu erweitern, ist langfristig ein Upgrade auf höhere Teilchenenergien geplant. Diese und andere Aktivitäten in der Beschleunigerentwicklung wurden in dem von der Europäischen Union geförderten Programm EuCARD koordiniert, das nach vierjähriger Laufzeit 2013 endete. Das LHC-Upgrade erfordert neuartige supraleitende Dipolmagnete der 20-T-Klasse, die nach dem derzeitigen Entwurf aus einem 14-T-Hintergrundmagneten aus NbSn sowie einem 6-T-HTS-Einsatz aufgebaut sind. Abbildung 4 zeigt eine 3D-FEM-Studie eines solchen Dipols im sogenannten Block-Design.

Hauptarbeitsgebiet des Bereichs Supraleitende Hochfeldmagnete des ITEP waren der Test von HTS-Solenoidspulen aus REBCO-Bandleiter, die vom französischen

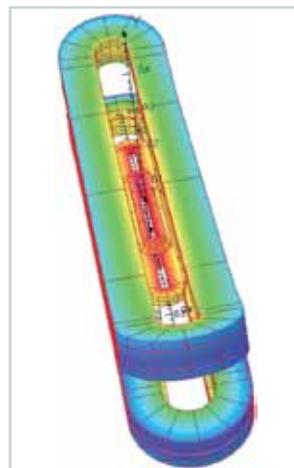


Abb. 4: 3D-FEM-Studie eines 20-T Dipolmagneten im sogenannten Block-Design zum Upgrade des LHC (Abb. aus einer Präsentation des Projektpartners P. Tixador, CNRS, Grenoble).

Projektpartner CNRS, Grenoble, als Vorstufe für eine Dipolwicklung gefertigt wurden, sowie die Charakterisierung von NbSn-Drähten zum Bau von supraleitenden Undulatoren am Rutherford Appleton Laboratory (UK). Wie die Leitercharakterisierungen ergaben, ist der Einsatz von NbSn als Undulatormaterial im angestrebten Operationsbereich von 3 bis 5 T aufgrund von mechanischen Instabilitäten und Supraleitungs-Instabilitäten allenfalls für ausgewählte Leiter möglich. Der Test der HTS-Solenoid-Doppelpancake-Spule verlief erfolgreich: Die Wicklung des 4 mm breiten HTS-Bands trug bei 4,2 K in einem Hintergrundfeld von 10 T knapp 700 A. Durch die auftretenden Lorentzkräfte von ca. 730 MPa kam es jedoch zum Bruch des Leiters. Der Test zeigt mit hin, dass der sichere Betrieb einer größeren HTS-Wicklung nur dann gewährleistet ist, wenn ein hinreichender Abstand zu den zu bestimmenden kritischen Größen der Wicklung (kritischer Strom, Zugfestigkeit des HTS etc.) eingehalten wird.

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Beschleunigertechnologie werden im Nachfolgeprojekt EuCARD2 fortgeführt.

Supraleitende Undulatoren

In Zusammenarbeit des KIT mit den Instituten ISS und LAS laufen theoretische und experimentelle Studien für ein optimiertes Design eines supraleitenden Undulators mit umschaltbarer Periodenlänge. Für die Wicklung werden niederfeldoptimierte NbTi-Supraleiter verwendet. Anhand der ersten Prototypen erkannten die Wissenschaftler Schwachstellen und nahmen erste Designanpassungen vor. Zur routinemäßigen Kalibrierung der Hallsonden begannen sie mit der Fertigung eines Helmholtz-Spulenpaars.

Industriekooperationen – NMR-Projekte

NMR-Magnettechnologie

Der Bereich HFM des ITEP und Bruker BioSpin entwickeln in einer seit 1985 laufenden Kooperation supraleitende Höchstfeldmagnete für die hochauflösende NMR-Spektroskopie mit Protonenresonanzfrequenzen von 750 bis 1000 MHz.

In ergänzenden Projekten zur NMR-Magnettechnologie unterstützt das HFM-Team den Kooperationspartner seit mehr als 15 Jahren durch flankierende Maßnahmen bei der Qualitätssicherung und der weltweiten Markteinführung. Ein Schwerpunkt liegt auf der Charakterisierung und Qualifizierung kommerzieller technischer Supraleiter durch hochauflösende $E(I)$ -Messungen in den Anlagen JUMBO und HOMER I. 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 $p\Omega$ -Bereich abhängig vom externen Magnetfeld und Transportstrom. Die Ergebnisse der Experimente und ihre Auswertung sind Kooperations-Know-how und unterliegen der absoluten Vertraulichkeit.

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 HTS-Einsatzspulen realisieren. Die Arbeiten 2013 liefen nach dem Projektplan. Im Fokus standen die physikalischen Eigenschaften der derzeit besten kommerziell erhältlichen REBCO-Bandleiter mit Leiterlängen größer als 100 m. Die Wissenschaftler untersuchten besonders die Hochfeldeigenschaften sowie die Grenzen der Lorentzkraft-Belastung bei Feldstärken von bis zu 20 T. Außerdem führten sie Experimente zur Degradation durch superfluides Helium sowie Temperatur- und Kraftzyklen durch und analysierten die Anisotropie der REBCO in ausgewählten Winkelbereichen.

F&E-Arbeiten zur HTS-Charakterisierung

Für das Design von HTS-Magnetspulen im 1200-MHz-Projekt sowie für den HOMER II-Ausbau in Richtung 30 T, aber auch für Anwendungen bei 77 K, wie Transformatoren oder Strombegrenzer, wird der Anisotropieverlauf $I_c(B, T, \Phi)$ der REBCO-Bandleiter benötigt.

Mithilfe der im HFL vorhandenen und in diesem Jahr weiterentwickelten Winkelapparaturen lässt sich dieser $I_c(B, T, \Phi)$ -Verlauf der REBCO-Bandleiter in der Experimentieranlage JUMBO bei Magnetfeldern von 0 bis 10 T sowohl bei 77 K als auch bei 4,2 K bestimmen. Die Apparaturen sind so ausgelegt, dass Transportströme bis 300 A bei 77 K und über 1500 A bei 4,2 K aufgeprägt werden können. Die Messungen werden an den etwa 4 bis 5 mm breiten Originalbandleitern durchgeführt. Dagegen wurden die meisten in der Literatur dargestellten Ergebnisse an extra präparierten „Microbridges“ mit reduzierter Breite erzielt.

Charakterisiert wurden die derzeit kommerziell verfügbaren REBCO-Bandleiter mit Schwerpunkt auf zwei Leitertypen des koreanischen Herstellers SuNAM (ohne und mit Messing Laminierung). Die Winkelabhängigkeit wurde bei 4,2 K und 77 K im Bereich von 0 bis 180° bestimmt. Da die größten Änderungen im $I_c(B, \Phi)$ -Verlauf im Winkelbereich um $\Phi = 90^\circ$ auftreten, das heißt bei senkrechtem Magnetfeld zur Bandnormalen, wurden dort Messungen mit kleiner Winkelschrittweite von $\Delta\Phi = 2^\circ$ durchgeführt. Für die Hochfeldanwendungen standen Messungen bei 4,2 K im Magnetfeldbereich von 2 bis 10 T im Vordergrund. Für 77-K-Anwendungen ist aufgrund des starken Abfalls des kritischen Stroms vor allem der Magnetfeldbereich zwischen 0 und 1 T interessant. Daher wurde die $I_c(B)$ -Abhängigkeit in diesem Bereich mit 0,1-T-Schritten intensiv untersucht.

Die I_c -Werte wurden durch Anpassung einer Potenzfunktion an die $U(I, B, T, \Phi)$ -Kennlinien bestimmt. Für die mathematische Anpassung aller $I_c(B, T, \Phi)$ -Daten wurden vier Fit-Modelle ausgewählt und bewertet. Abbildung 5 zeigt in normierten 3D-Darstellungen die besten Fit-Funktionen für den laminierten SuNAM-Leiter sowie die Änderungen der I_c -Werte durch die partiellen Ableitungen nach dem Winkel Φ bzw. dem Magnetfeld B .

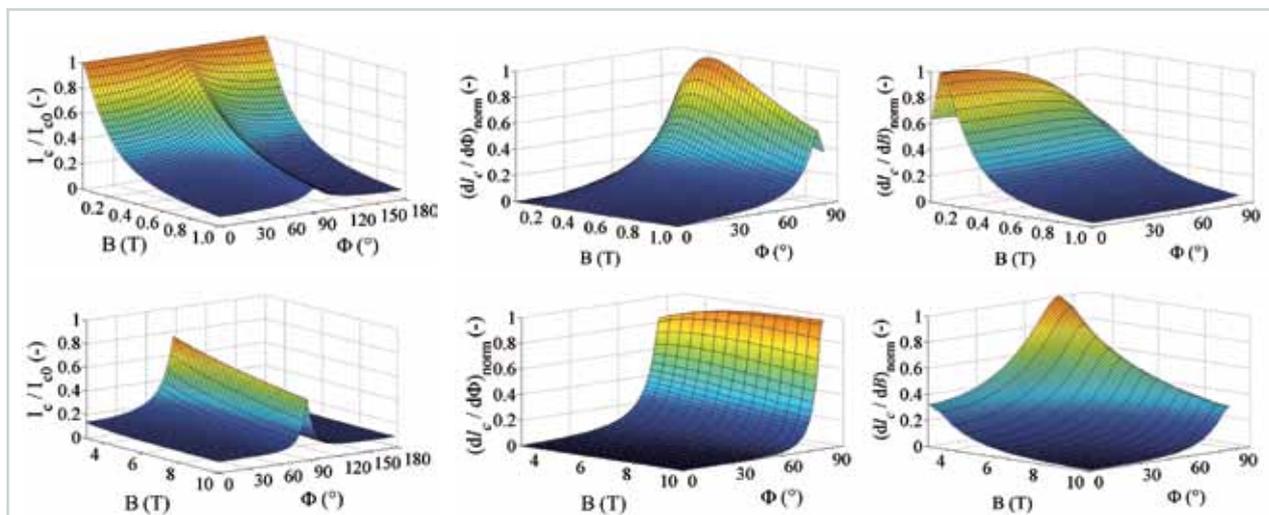


Abb. 5: 3D-Anpassung (normiert) der ermittelten $I_c(B, T, \Phi)$ -Daten und der partiellen Ableitung der Fit-Funktionen nach den Variablen Winkel Φ und Magnetfeld B für $T = 77$ K (oben) und $T = 4,2$ K (unten).

Highlight: HTS-Spulenentwicklung – Lorentzkraft-Untersuchungen

Die Supraleiter in einer Magnetspule sind axialen und radialen Kräften ausgesetzt. Dabei ist die radiale Kraft proportional zu der axialen Feldkomponenten, dem Spulendurchmesser und dem angelegten Magnetstrom, die axialen Kräfte hingegen sind proportional zur Radialkomponente des Magnetfelds in der Wicklung. Um die Grenzen der Kraftbelastung zu bestimmen, führten Forscherinnen und Forscher Experimente in der JUMBO-Anlage und in der 15-T-Konfiguration der Versuchsanlage HOMER I durch. Abbildung 6 zeigt einlagige REBCO-Test-Solenoid-Solenoiden mit variabler Spulenlänge bzw. Windungszahl und Spulendurchmesser. Außerdem liefen Belastungstests mit den verschiedenen kommerziell erhältlichen REBCO-Bandleitern an einem Dreifachspulensatz, wobei unter simultaner Lorentzkraft auf Spulendurchmessern von 40, 80 und 150 mm der maximal aufprägte Hoop-Stress ermittelt wurde.

Die axiale Kraftverträglichkeit wurde an ein- und mehrlagigen Solenoid-Spulen mit maximalen Durchmessern von 150 mm und Spulenlängen bis 300 mm überprüft. Die Messungen wurden in Hintergrundfeldern von 14 T in superfluidem Helium erfolgreich mit Spulenströmen bis zum leiter-spezifischen I_c -Wert durchgeführt. Degradationen traten keine auf. Die Funktionstüchtigkeit der Spule ($\varnothing = 150$ mm, $L = 300$ mm) wurde in einem anschließenden Experiment in flüssigem Stickstoff gezeigt (siehe Abschnitt LIQHYSMES). Dabei wurde die Spule frequenzabhängig mit Transportströmen variabler Kurvenform be- und entladen und damit zyklischen Kraftbelastungen ausgesetzt.



Abb. 6:
Einlagige
REBCO-
Solenoid-Spulen
variabler
Länge und
variablen
Durchmessers
für die
Experimentier-
anlagen
JUMBO und
HOMER I.

Abbildung 7 zeigt das Verhalten der Spule bei dreiecksförmigem Transportstrom mit einer Frequenz von 3 Hz. Im Experiment steigerten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den Strom von 50 A bis 120 A; dargestellt ist der Bereich von 110 A bis 120 A.

Deutlich ist der resistive Anstieg der Spulenspannung (grüne Peaks) ab 110 A zu erkennen. Der kritische Strom I_c des REBCO-Leiters beträgt nach Herstellerangaben und HFM-Messungen etwa 111 A – eine ausgesprochen gute Übereinstimmung, die zeigt, dass die Spule die Lorentzkraft-Belastungen bei den HOMER I-Messungen schadlos überstanden hat.

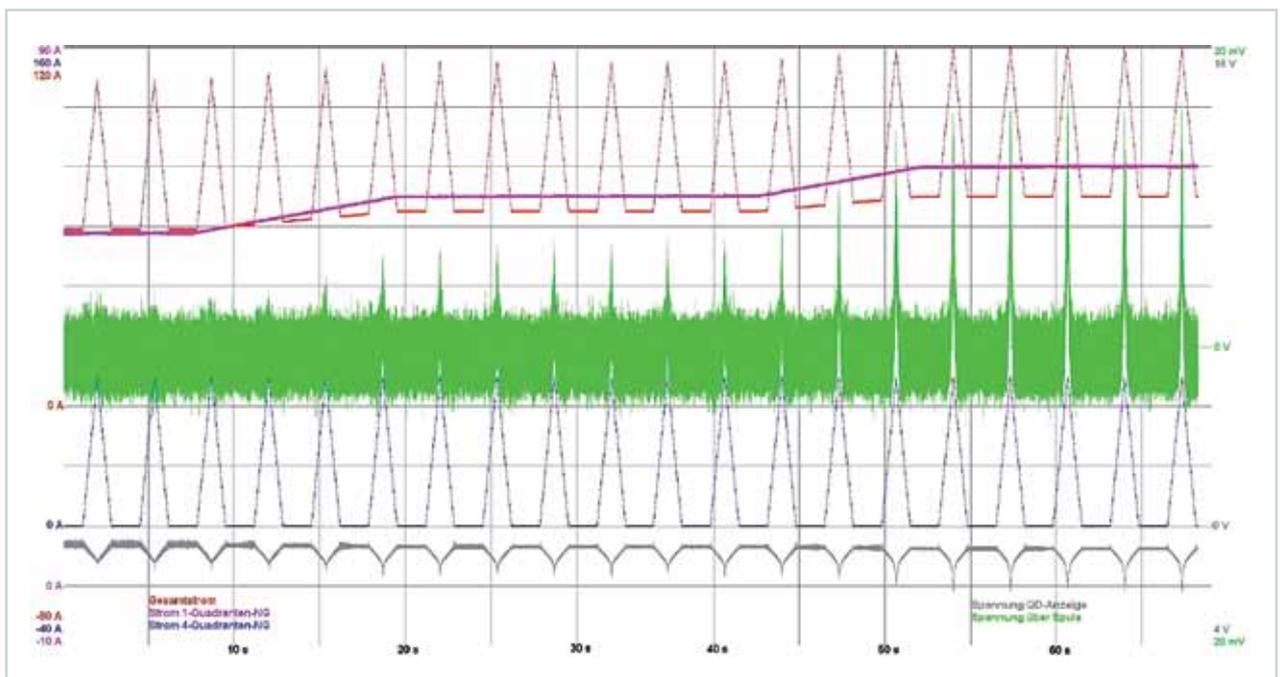


Abb. 7: Verhalten der REBCO-Solenoid-Spule bei 77 K unter dreiecksförmiger Strombelastung im Bereich von 110 A bis 120 A.

Highlight:**HTS-Spulenentwicklung – Hochfeldeigenschaften/
Hochfeldverhalten**

Beim Ausbau der Experimentieranlage HOMER II in Richtung 30 T sowie im Kooperationsprojekt zur Entwicklung einer Einsatzspule für ein hochauflösendes 1200-MHz-NMR-Magnetsystem benötigen die Wissenschaftler Informationen über Hochfeldeigenschaften, Kraftverträglichkeit und kryogene Stabilität der kommerziell erhältlichen REBCO-Bandleiter, um Einsatzspulen mit den geforderten Bedingungen entwickeln und bauen zu können.

Die Einsatzspulen müssen in der späteren Anwendung in Hintergrundfeldern größer 20 T bei kryogenen Temperaturen unter 4 K einen Magnetstrom von mehr als 300 A tragen können. Zur Bestimmung des $I_c(B, T, \Phi)$ -Verlaufs nahm das HFM-Team Messungen an den besten REBCO-Leitern in Hintergrundfeldern bis 20 T und bei Temperaturen bis 1,8 K vor. Mithilfe von mathematischen Modellen wurden Extrapolationen bis 30 T durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die gesteigerte Performanz der kommerziellen Bandleiter sowohl im $I_c(B)$ -Verlauf als auch bei der kryogenen Stabilität den Bau von mehrlagigen Einsatzspulen für HOMER II und im 1200-MHz-Projekt ermöglicht.

Experimentell ließ sich dies an mehrlagigen Mini-Solenoiden mit einem maximalen Außendurchmesser von 48 mm demonstrieren, die im Technikum des HFM hergestellt wurden. Abbildung 8 zeigt ein solches Mini-Solenoid, bestehend aus 92 Windungen REBCO-Bandleiter. Die Solenoid-Spule erreichte zusammen mit dem

Hintergrundfeld von HOMER I bei 1,8 K und einem Magnetstrom von 525 A ihr berechnetes Designfeld und steigerte das Zentralfeld von HOMER I auf 21 T.



Abb. 8: 1T-REBCO-Mini-Solenoid für die HOMER I-20 T Konfiguration.

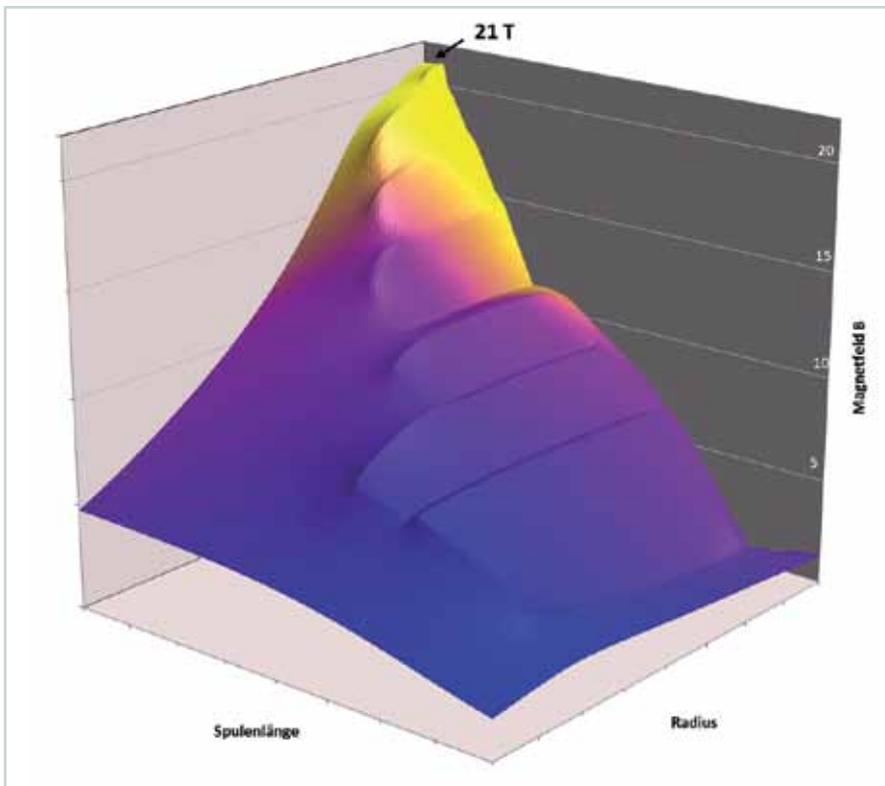


Abb. 9: Magnetfeldverteilung des Gesamtmagnetsystems mit $B_{0,max} = 21$ T, bestehend aus drei NbTi- und drei $(\text{NbX})_3\text{Sn}$ -Spulen der HOMER I-Anlage ($B_0 = 20$ T) plus REBCO-Mini-Solenoid-Spule ($B_0 = 1$ T).



Modell des Energiekabels im Flüssigstickstoffbad

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Supraleitende Materialien und Energieanwendungen

Leitung: Dr. Wilfried Goldacker

Supraleiterentwicklung und Energieanwendungen

Die Supraleiterentwicklung am ITEP konzentrierte sich im Jahr 2013 auf folgende Themen:

- Entwicklung wechselstromverlustarmer REBCO-Bandleiter mit einer laserstrukturierten Filamentierung
- Entwicklung verschiedener verlustarmer Hochstromkabel aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) der zweiten Generation (CORC-, Roebel- und Rutherford-Kabel)
- Entwicklung verseilter AC-Leiter aus dem Supraleiter Magnesiumdiborid

Die Forscherinnen und Forscher entwickelten Leiter und Kabel weiter, vermaßen sie in Bezug auf Stromtragfähigkeit und Wechselstromverluste, berechneten besonders die Eigenschaften mithilfe numerischer Verfahren und korrelierten sie mit den experimentellen Ergebnissen. Sie stellten mittlere Kabellängen aus HTS-Roebel-Kabeln in der Anordnung von verschiedenen Wicklungen her, untersuchten sie und charakterisierten die Eigenschaften. Eine besondere Rolle kam 2013 der Modellierung sowohl von Supraleitern als auch von supraleitenden Komponenten mithilfe eigens entwickelter Verfahren zu; die Ergebnisse besitzen Pioniercharakter. Bei den Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung lag ein Schwerpunkt auf der Forschung an einem Modell zum HTS-Energiekabel des Projekts AmpaCity in Essen. Was HTS-Strombegrenzer betrifft, begleiteten die Wissenschaftler technisch die Überführung und Konditionierung des ECCOFLOW-Strombegrenzers im Testfeld bei RSE in Mailand und am Einsatzort Mallorca. Die Arbeiten zu einem induktiv angekoppelten Strombegrenzer wurden mit Messungen an einem Funktionsmodell im Rahmen einer Dissertation weitgehend abgeschlossen. Ein leitungsgekühlter HTS-Magnet aus YBCO-Bandleitern der Fünf-Tesla-Klasse wurde designt und gefertigt.

HTS-Wechselstromleiter und Kabel für Windungen/Magnete

Die Anbringung einer Filamentstruktur an REBCO-Leitern ist für eine deutliche Reduktion der AC-Verluste entscheidend. Das am ITEP bereits seit einiger Zeit eingesetzte Strukturierungsverfahren mit einem Pikosekunden-YAG-Laser wurde dahingehend optimiert, dass mit einer nachfolgenden Wärmebehandlung eine vollständige elektrische Entkopplung der Filamente im Material erreicht wurde. Bis zu 120 Filamente von ca. 80 μm Breite wurden gebrannt; die damit verbundene Reduktion der Wechselstromverluste und damit der Effekt der Nachbehandlung wurden nachgewiesen. Die Transportströme weisen eine moderate Degradation auf. Zu dieser tragen zum einen Verlust von Supraleitermaterial, zum anderen die Auswirkungen von inhomogenen Supraleiterschichten bei (siehe Abbildung 1).

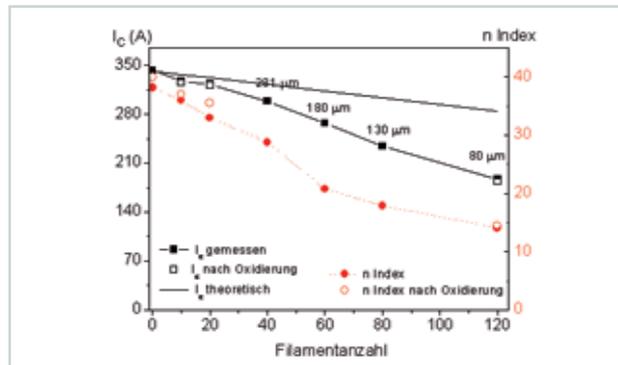


Abb. 1: Transportströme und n -Werte von Leitern mit verschiedener Filamentzahl. Das Verhalten des Leiters ist indifferent bei Anwendung der Nachglühung im Sauerstoff.

Weiterhin wurde eine Filamentierung mit fünf Filamenten an den Bändern verseilter Conductor-On-Round-Core (CORC)-Kabel angebracht. Die Wechselstromverluste wurden im Institut für Elektrotechnik der Slovak Academy of Science in Bratislava vermessen, dabei wurde die höchst effiziente Verlustreduktion in der CORC-Geometrie nachgewiesen.

Roebel-Kabel aus REBCO-Bandleitern sind unter den wenigen technischen HTS-Kabelkonzepten der aussichtsreichste Kandidat für verlustarme Hochstromkabel zur Anwendung in Wicklungen. Ein starkes Interesse an diesen Kabeln besteht für Anwendungen bei Temperaturen zwischen 4 und 77 K und zum Teil hohen Hintergrundfeldern bis zu 20 T (Dipolmagnete des LHC im CERN, Transformatoren und rotierende Maschinen). Wissenschaftler am ITEP stellten 2 bis 5 m lange Roebel-Kabel her, um zum einen das Verhalten bei tiefen Temperaturen im Hintergrundfeld zu messen (FRESCA-Anlage im CERN, 4,2 K, 0 bis 10 T), zum anderen die Eigenschaften der Kabel in Bezug auf Stromtragfähigkeit und Wechselstromverluste in Wicklungen (Pancake- und Lagenwicklung) systematisch zu untersuchen. Die Degradation der Ströme in einer Lagenwicklung sowie die Abhängigkeit der Wechselstromverluste von der Wicklungsdichte sind gering, da senkrecht orientierte Komponenten des Eigenfelds nur eine geringe Rolle spielen. Roebel-Kabel zeigten bei 4,2 K einen gegenüber 77 K um den Faktor elf bis zwölf erhöhten Transportstrom (Messungen an ITEP-Kabeln am CERN). Ein Standardkabel des ITEP mit zehn Strands von 5,5 mm Breite trug 14 000 A. Mit Hintergrundfeld zeigt sich eine starke Anisotropie des Transportstroms bis zu einem Faktor drei, ähnlich dem Verhalten des Einzelstrands oder Ausgangsbands. Die zulässige mechanische Belastung des Kabels mit transversalem Stress durch die Lorentzkraft wurde ebenfalls untersucht. Sie bewegt sich mit ca. 160 MPa im Bereich der Anforderungen der Anwendun-

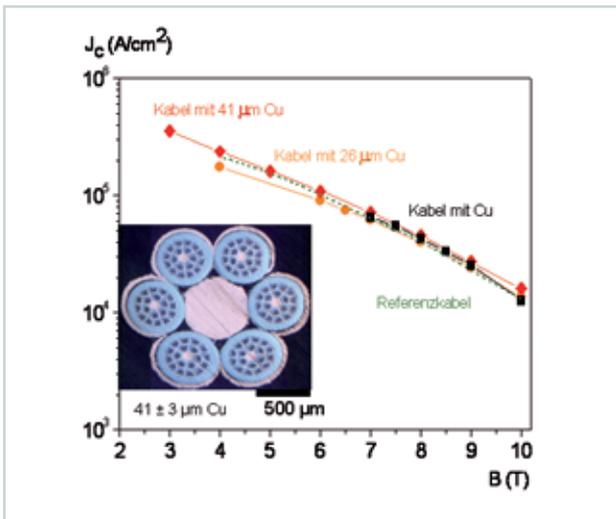


Abb. 2: Verseiltes Magnesiumdiborid-AC-Kabel im Querschnitt mit zentraler Cu-Stabilisierung und Cu-Platierung zur verstärkten Strandkopplung und entsprechendes Verhalten der Transportströme.

gen. Je nach Anforderung lässt sich der Transportstrom des Kabels durch Mehrfachstrands und verlängerte Transposition sogar um ein Mehrfaches erhöhen.

Magnesiumdiborid-Kabel für AC- und DC-Anwendungen sind aktuell von großem Interesse, da es sich um einen relativ preiswerten Supraleiterdraht handelt. Aus kommerziellen Mehrkerndrähten des Herstellers Hypertech präparierte das ITEP verseilte Kabel in verschiedenen Designs mit der Anordnung von Kupferdrähten zur externen Stabilisierung und vermaß sie in Bezug auf Transportströme und AC-Verluste. Eine Innovation gelang den Wissenschaftlern mit der zusätzlichen Kopplung der Strands mithilfe von elektroplatiertem Kupfer (siehe Abbildung 2). Bei diesen Arbeiten kooperierte das ITEP eng mit den Partnern IEE-SAS Bratislava und Universität Wollongong (Australien). Die Kabelkonzepte sind Kandidaten für Busbars zur Verbindung von Magneten (CERN), AC-Wicklungen in Transformatoren/Motoren und Generatoren für Windenergieanlagen sowie für supraleitende HVDC-Energiekabel, wie beispielsweise im EU-Projekt Best Paths angestrebt.

HTS-Kabel für Fusionsmagnete

Das progressive Konzept eines Rutherford-Kabels mit HTS-Roebel-Strands, ein Kandidat für zukünftige Fusionsmagnete, basierend auf Messresultaten aus einem Modellkabel, musste revidiert werden, um eine Degradation des supraleitenden Materials bei der auftretenden Biegung zu vermeiden. Die Messdaten gestatteten nun eine sichere Auslegung eines revidierten Kabeldesigns mit rundem Zentralrohr mit einer Transposition der Roebel-Strands von ca. 2/3 m. Die Forscher stellten



Abb. 3: Rutherford-Kabelkonzept mit sechs Roebel-Strands in hexagonaler Anordnung und Hüllrohr zur mechanischen Verstärkung.



Abb. 4: ECCOFLOW-Strombegrenzer im Umspannwerk der ENDESA in Palma de Mallorca.

ein Kabel von ca. 1,4 m Länge her und vermaßen es. Abbildung 3 zeigt das Kabelkonzept im Modell.

Supraleitende Fehlerstrombegrenzer (SSB)

Die Arbeiten zu Fehlerstrombegrenzern konzentrierten sich auf das EU-Projekt ECCOFLOW und die Entwicklung eines induktiv angekoppelten supraleitenden Strombegrenzers. In ECCOFLOW unterstützte das ITEP die Firma Nexans bei der finalen Konditionierung des SSB nach dem Test bei ERS in Mailand für den Feldtest auf Mallorca. Ein positives Ergebnis war die Standfestigkeit des am ITEP speziell entwickelten Isolationsverfahrens für den Supraleiter, das durch alle Testzyklen hindurch defektfrei blieb. 3,5 km Supraleiterband wurden auf einer vom ITEP entwickelten und beigestellten Anlage beim Hersteller Nexans mit Polyamid-Folien rundum eingekapselt. Abbildung 4 zeigt den Strombegrenzer im Umspannwerk der ENDESA auf Mallorca.

Numerische Modellierung von HTS-Kabeln und -Komponenten

Das ITEP entwickelte das erste zeitabhängige elektromagnetische 3D-Modell für Roebel-Kabel. Es wurde zur Berechnung eines 14-Strand-Kabels eingesetzt. Ein wesentlicher Punkt ist die Verwendung von periodischen Randbedingungen mit einer Reduktion der Modellierungsdomäne auf 1/n der Transpositionslänge. Abbildung 5 zeigt die berechnete Feldverteilung in einem Roebel-Kabel.

Weiterhin erstellte das ITEP ein 2D-3D-Hybridmodell für Pancake-Wicklungen aus Roebel-Kabeln. Im Besonderen wandten die Wissenschaftler eine 2D-Berücksichti-

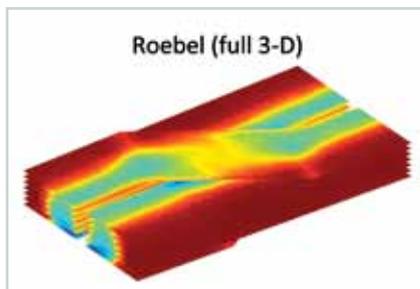


Abb. 5: Modellierte Feldverteilung in einem Roebel-Kabel.

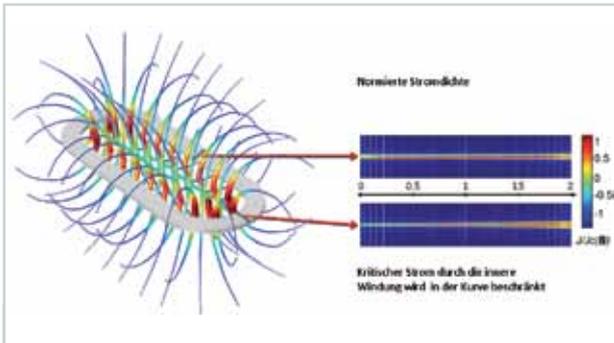


Abb. 6: Berechnete Feldverteilung in einer Racetrack-Spule.

gung des anisotropischen Stromverhaltens im Magnetfeld und eine 3D-Modellierung der Kontakte an.

Als Beitrag zum Energiekabel des BMWi-Projekts Ampacity entwickelten die Forscher einen 2,5-D-Modellierungscode für das Stromverhalten und die entstehenden Wechselstromverluste und verifizierten ihn erfolgreich durch Messungen am Modellkabel des ITEP. Die 2,5-fache Dimensionalität ist durch den Ansatz einer periodischen Scheibenstruktur entlang der Kabelachse gegeben. Sie erlaubt es, die Transposition der Leiter einzubeziehen. Das Modell ist kein echtes 3D-Modell, weil es axiale Feldkomponenten nicht berücksichtigt. Allerdings sind diese vernachlässigbar klein. Der Berechnungscode wurde als Projektbeitrag der beteiligten Industrie bereitgestellt und gestattet es bereits in der Designphase eines Energiekabels, die AC-Verluste und den Einsatz der Supraleitermenge zu optimieren.

Was Komponenten betrifft, wurde ein 3D-Modell für gestapelte Supraleiterbänder entwickelt. Es erlaubt die Simulation von Spulen mit nicht axialsymmetrischer Geometrie, wie beispielsweise Racetrack-Spulen (siehe Abbildung 6). Das Modell nimmt die Wicklung als einen größeren Leiter an. Es ist das einzige existierende Modell, das solche Spulen 3D-mäßig berechnen kann. Allerdings ist das Modell nicht auf Spulen beschränkt; es lässt sich auch für Kabel mit Transposition und Leiterstapeln einsetzen.

Supraleiter in der Weltraumforschung

Für ein Experiment im Plasmakanal des DLR entwarf und baute das ITEP im Rahmen des HGF-Vorhabens COMBIT einen HTS-Magneten. Mit seiner Hilfe soll untersucht werden, ob der gefürchtete Radioblackout, der beim Eintritt von Raumfahrzeugen in die Erdatmosphäre auftritt, sich durch das Verringern der Plasmadichte mithilfe gekreuzter elektrischer und magneti-

scher Felder abschwächen lässt. Das am ITEP entwickelte Magnetsystem besteht aus fünf Doppelpancake-Spulen, die mit einer speziellen niederohmigen Kontaktierung seriell verbunden sind (siehe Abbildung 7). Zur Verifikation der Magnettechnik wurde ein einzelnes Doppelpancake äquivalent hergestellt, mit Bienenwachs imprägniert und bei 4,2 K vermessen. Das erreichte Feld von 1,32 T entspricht der Berechnung mit OPERA.

Supraleitender Transformator zur Begrenzung von Kurzschlussströmen

Zur Auslegung von supraleitenden strombegrenzenden Transformatoren wurde am ITEP ein spezielles Computerprogramm entwickelt. Dieses ermöglicht es, unter Vorgabe von wenigen Grundparametern zur Transformatorauslegung, einen supraleitenden Transformator zu entwerfen und dessen fundamentale Parameter abzuschätzen und anzupassen. Darüber hinaus können mit dem entwickelten Computerprogramm Aussagen zu den anfallenden Materialkosten, den im Betrieb entstehenden elektrischen Verlusten und zu Abmessungen wie auch zum resultierenden Transformatorgewicht getroffen werden. Dadurch wird es möglich, den Transformatorentwurf für eine gewünschte Anwendung zu optimieren und so ein anwendungsspezifisch optimales Transformator-konzept zu erarbeiten.

Weiter ist das am ITEP entwickelte Computerprogramm in der Lage, basierend auf den errechneten Transformatorparametern, das Verhalten eines entworfenen Transformators als supraleitender Kurzschlussstrombegrenzer transient zu simulieren. Diese Option ist von großem Nutzen, da die Eigenschaften eines strombegrenzenden Transformators im Kurzschlussfall nicht trivial vorhergesagt werden können. Sie beruhen vielmehr auf einer Vielzahl verschiedener Parameter und designbedingter Einflussfaktoren.

Im Anschluss an die Erarbeitung des beschriebenen Computerprogramms wurde dieses Werkzeug am ITEP eingesetzt um einen supraleitenden Transformator mit einer Nennleistung von 577kVA auszulegen. Der entworfene Transformator stellt eine einphasige Repräsentation eines 1MVA Drehstromtransformators dar. Er besitzt eine 20kV Primärwicklung aus konventionellem Kupferleiter, eine supraleitende Sekundärwicklung mit einer Nennspannung von 1kV sowie einen Eisenkern der bei Raumtemperatur betrieben wird. Die Sekundärwicklung aus YBCO-Bandeleitermaterial soll die Begrenzung der auftretenden Kurzschlussströme übernehmen. Im Normalbetrieb wird die Sekundärwicklung mit Flüssigstickstoff auf einer Betriebstemperatur von 77K gehalten. Eine Entwurfsskizze des ausgelegten Transformators ist in Abbildung 8 dargestellt. In einem weiteren Arbeitsschritt soll dieser entworfene supraleitende Transformator am ITEP als Labordemonstrator aufgebaut und getestet werden.



Abb. 7: Magnet aus HTS-Bandleitern aus fünf Doppelpancake-Wicklungen vor Anbringung der Lötkontakte mit 5 T Zentralfeld.

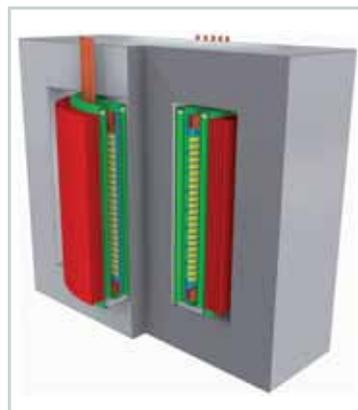


Abbildung 8: Schnittdarstellung der Entwurfszeichnung eines supraleitenden Transformators. Die strombegrenzende supraleitende Wicklung ist in gelb dargestellt

Highlight:
Induktiv gekoppelter Strombegrenzer

Die bisherige Kurzschlussstrombegrenzung mit einer Drosselspule wurde durch den Einsatz von Hochtemperatursupraleitern in einem Strombegrenzerkonzept mit induktiver Widerstandseinkopplung fortentwickelt. Im Normalbetrieb soll die Impedanz der Drosselspule kompensiert werden, um Netzrückwirkungen zu minimieren und damit die Stabilität des elektrischen Energienetzes zu verbessern. Dies wird durch einen supraleitenden Einsatz aus YBCO Bandleitern, der in die Drosselspule eingesetzt wird, realisiert. Im stationären Betrieb schirmt diese sekundäre, supraleitende Wicklung das magnetische Feld der Drosselspule und senkt die Impedanz ab. Im Falle eines Kurzschlusses überschreitet der induzierte Strom den kritischen Strom des Supraleiters, die Schirmung verliert ihre Wirkung und die Impedanz steigt.

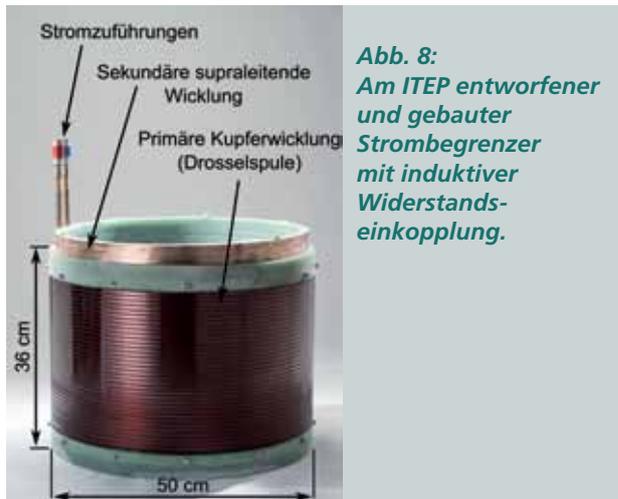


Abb. 8:
Am ITEP entworfener und gebauter Strombegrenzer mit induktiver Widerstandseinkopplung.

Zur Verifikation des Konzeptes und zur Analyse des Begrenzungsverhaltens wurde ein 60 kVA, 400 V, $z = 6\%$ Demonstrator entwickelt, gebaut und getestet (Abbildung 8). Für die sekundäre, supraleitende Wicklung kamen YBCO-Bandleiter mit 12 mm Breite und Kupferstabilisierung zum Einsatz, insgesamt wurden 33 m Supraleiter in 22 parallel geschalteten Bändern verbaut. In Abbildung 9 sind die Messergebnisse für verschiedene Kurzschlussströme für eine Dauer von 4 Halbwellen zusammengefasst. Der supraleitende Strombegrenzer erzielt die gleiche Begrenzungswirkung wie die Drosselspule und erreicht im besten Fall eine Strombegrenzung von 30 %.

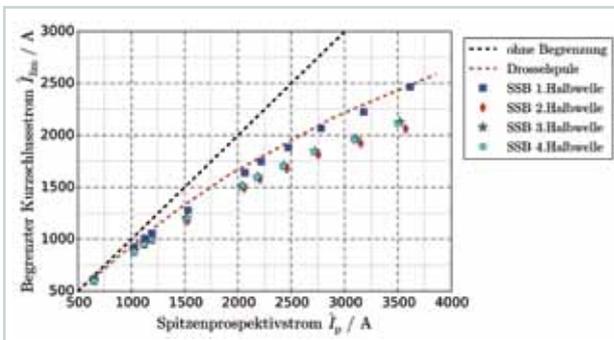


Abb. 9: Gemessene Kurzschlussstrombegrenzung des Demonstrators für verschiedene Kurzschlussströme für eine Kurzschlussdauer von vier Halbwellen.

Highlight:
HTS-Roebel-Leiter-Lagenspule

Aus einer 5-m-Länge eines HTS-Roebel-Leiters stellte das ITEP erstmals eine Lagenspule mit veränderbarem Windungsabstand her. Deren Ströme und AC-Verluste wurden vermessen und anhand eines numerischen Modells berechnet. Die Stromdegradation im Eigenfeld der Wicklung ist im Vergleich zu einer Pancake-Wicklung viel geringer; nur an den Enden der Wicklung lässt sich ein größerer Einfluss senkrechter Feldkomponenten feststellen.

Die Abbildungen zeigen die Spule selbst (Abbildung 10), die Berechnung der Feldverteilung (Abbildung 11) und die Analyse der Wechselstromverluste (Abbildung 12). Als besonderes Ergebnis aus den unterschiedlichen Geometrien ergibt sich die optimale Kombination aus möglichst geringen AC-Verlusten und dem dazu nötigen Wicklungsabstand für ein vorgegebenes Magnetfeld.



Abb. 10: Lagenwicklung aus 5 m HTS-Roebel-Leiter.

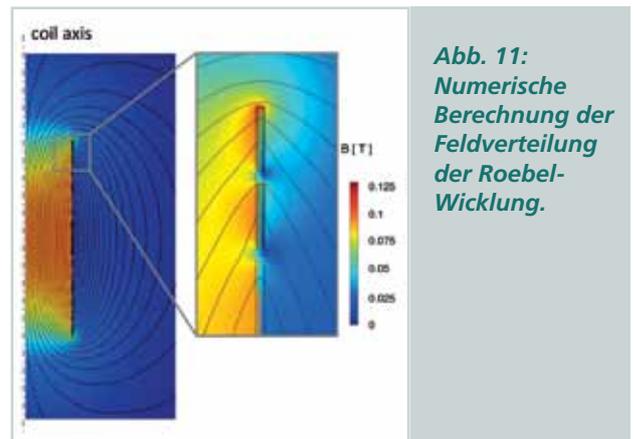


Abb. 11:
Numerische Berechnung der Feldverteilung der Roebel-Wicklung.

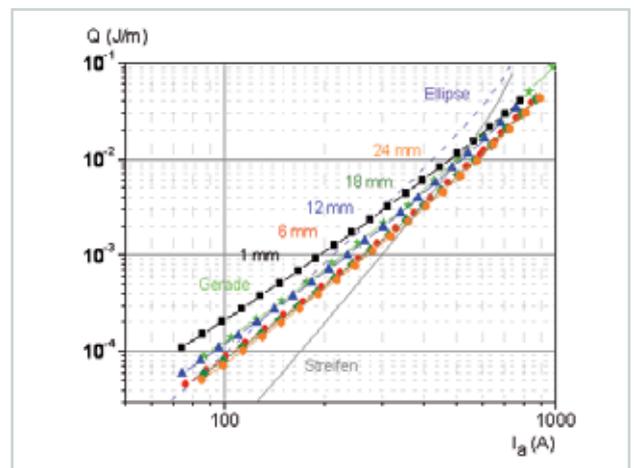


Abb. 12: Wechselstromverluste der verschiedenen Modifikationen der Roebel-Lagenwicklung.

Highlight:**AmpaCity-Energiekabel – Untersuchungen am Modellkabel und numerische Modellierung**

Die Forscher des ITEP charakterisierten das KIT-Modellkabel in äquivalenter Geometrie zum Energiekabel mit einer Bestückung von zwei Phasen vollständig und untersuchten die Wechselwirkungen der Phasen untereinander. Die gemessenen Eigenschaften vollzogen sie mit einem vollständig neu entwickelten Code zur numeri-

schen Modellierung quantitativ erstmals in einer 2,5-fachen Dimensionalität nach. Das 2,5D-Modell beschreibt die Eigenschaften quantitativ und erlaubt vor allem die Berechnung optimierter Kabeldesigns. In Abbildung 13 ist die Funktionsweise des Modells dargestellt; Abbildung 14 zeigt mögliche optimierte Kabelkonzepte. Abbildung 15 ist eine Fotografie des Modellkabels mit teilweiser Bestückung.

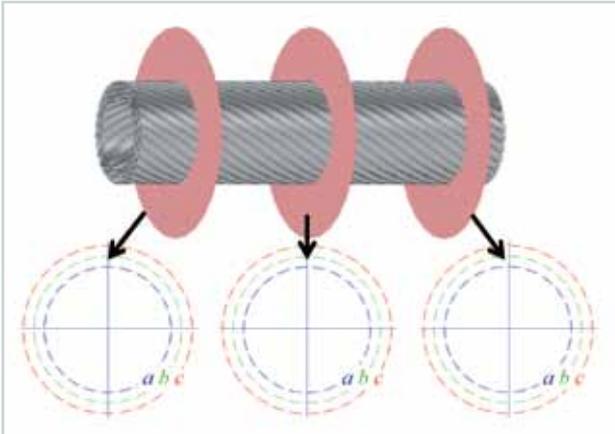


Abb. 13: Die prinzipielle Funktionsweise des numerischen Modells mit axialer periodischer Segmentierung der Rechendomänen und Phasenbeziehungen.

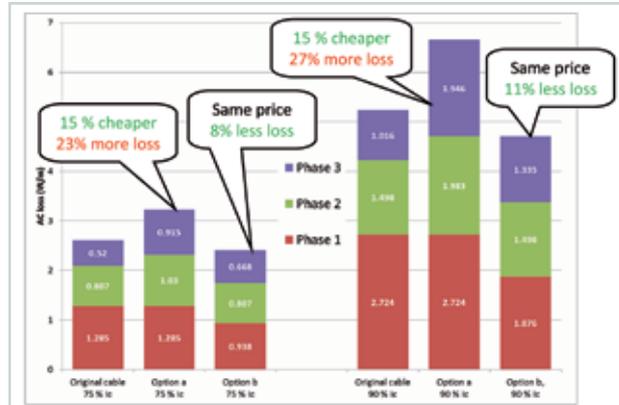
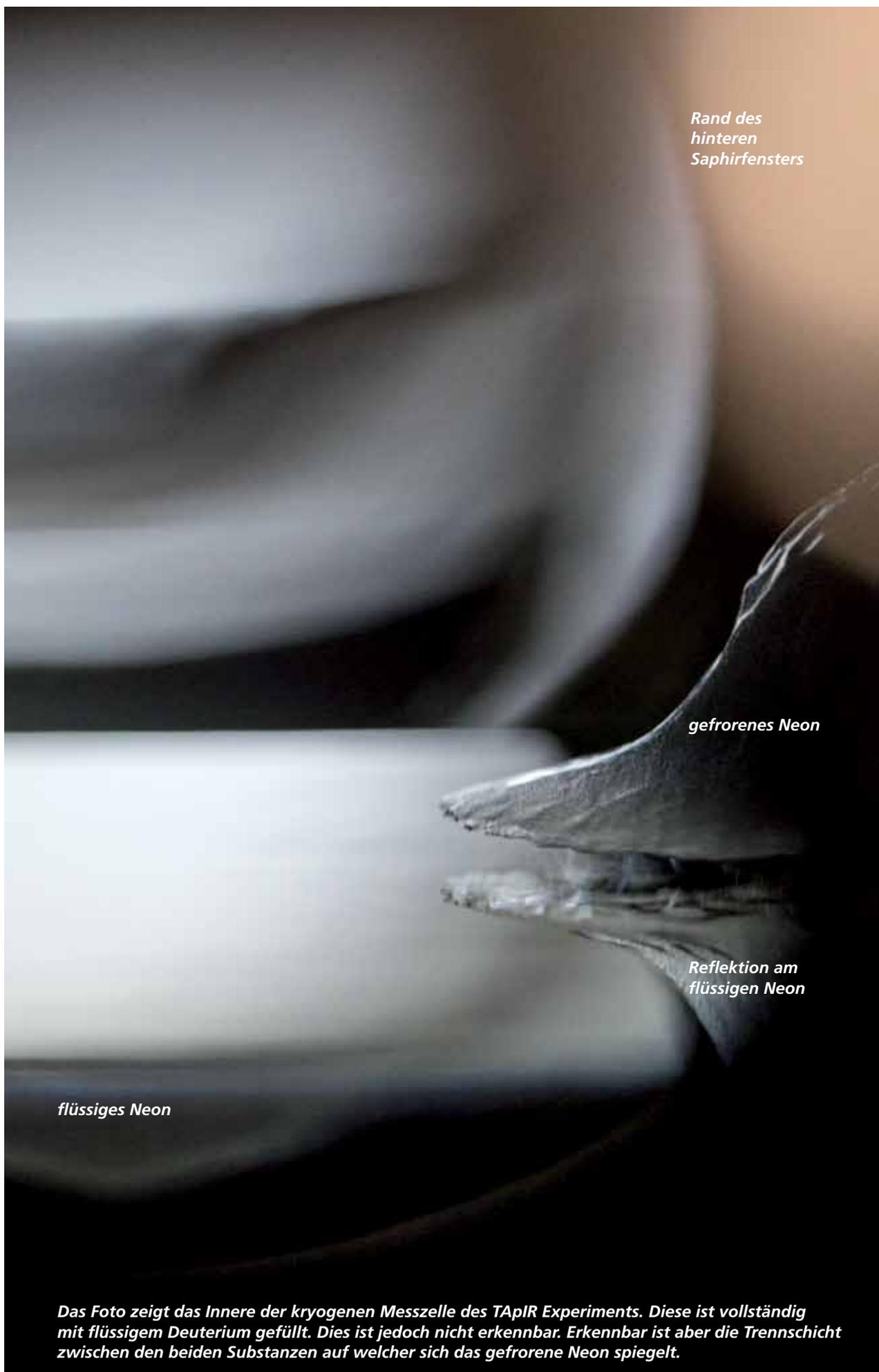


Abb. 14: Zwei Kabelauslegungen, bei denen die Stromtragfähigkeit der einzelnen Phasen auf 50 Prozent (links) und 90 Prozent (rechts) eingestellt sind und die Stromtragfähigkeit der Phasen angeglichen ist, auf Phase 1 (links) oder Phase 2 (rechts) des realen Kabels.



Abb. 15: Teilbestücktes Modellkabel des ITEP zum Projekt AmpaCity.



Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Tritiumlabor Karlsruhe (TLK)

Leitung: Dr. Beate Bornschein

Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) 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 1000 m² stehen mehr als 15 Handschuhkastensysteme mit einem Volumen von insgesamt rund 125 m³ als Einschluss für die tritiumführenden Versuchsapparaturen zur Verfügung. Gründungsaufgabe und erster Arbeitsschwerpunkt des TLK ist die Entwicklung von Technologien für den Brennstoffkreislauf von Fusionsreaktoren. Ein zweiter umfangreicher Arbeitsschwerpunkt liegt auf dem Aufbau wesentlicher Systeme des Karlsruher Tritium Neutrino Experiments KATRIN zur Messung der Ruhemasse des Elektronantineutrinos. Demgemäß werden die Arbeiten zu gleichen Teilen innerhalb der Programme „Fusion“ und „Astroteilchenphysik“ gefördert.

Wissenschaftlicher Nachwuchs ist für die Zukunft des TLK äußerst wichtig. In den vergangenen Jahren hat das TLK daher 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 fachlich wissenschaftlichen Inhalten auch die heute vermehrt gefragten „Soft Skills“ umfasst.

	2009	2010	2011	2012	2013
Bachelor			6	12	9
Diplom/Master	7	9	9	6	7
Promotion	4	8	10	10	11

Tabelle 1: Abgeschlossene und laufende Arbeiten im TLK.

Im Folgenden werden die Arbeiten und Ergebnisse in den Bereichen Betrieb und Infrastruktur des TLK sowie Forschung und Entwicklung zur Fusion kurz vorgestellt. Dem Bereich KATRIN ist ein eigenes Kapitel gewidmet.

20-jähriges Bestehen des TLK

Das TLK ging im Jahr 1993 mit der Anlieferung von 3,5 g Tritium in Betrieb. Anlässlich des 20-jährigen Bestehens fand am 23. Juli 2013 ein Festkolloquium mit anschließendem Sommerfest statt. Festvorträge vermittelten einen interessanten Überblick über 20 Jahre TLK-Geschichte, von der Planung und Umsetzung des Projekts bis zum aktuellen Status der Einrichtung. Dabei präsentierten aktuelle und ehemalige Angehörige des TLK sowohl betriebliche als auch forschungsrelevante The-



Abb. 1: Die Anfänge des TLK.



Abb. 2: Das neue TLK-Logo.

men. Einen Höhepunkt der Festveranstaltung stellten die Vorstellung des neuen TLK-Logos (siehe Abbildung 2) und die damit verbundene Auszeichnung der Urheber mit einem Preis dar. Das anschließende Sommerfest bildete einen schönen Abschluss des Festtags.

Betrieb und Infrastruktur des TLK

Im Jahr 2013 waren die konventionelle Infrastruktur sowie die Tritiuminfrastruktur des Tritiumlabors für die Forschungsvorhaben der Programme „Fusion“ und „Astroteilchenphysik“ uneingeschränkt verfügbar. Das Tritiumlager versorgte 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 über KATRIN) mit Tritium mit hoher Isotopenreinheit (>95 %). 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 im Jahr 2013 auf der Gewähr-

leistung des sicheren Betriebs des TLK und der Bereithaltung der Infrastruktur für die F&E-Arbeiten der beiden beteiligten Programme „Fusion“ und „Astro“. Eine wichtige Aufgabe in diesem Zusammenhang war wieder die Wissensweitergabe an die Studierenden, die ihre Forschungsarbeiten im TLK durchführen und naturgemäß zu Anfang keine Erfahrung im Umgang mit Tritium haben. Von betrieblicher Seite her erfolgt daher eine intensive Beratung bei der Planung der Experimente und – gemäß Betriebsanweisung – eine sorgfältige Prüfung der sicherheitsrelevanten Dokumente (Sicherheitstechnische Beschreibung etc.).

Die Tritiumverfahrenstechnikgruppe hatte neben ihren üblichen Schwerpunktaufgaben wie Betrieb, Wartung und wiederkehrende Prüfungen der Infrastrukturgewerke (Zweite Hüllen, Tritiumlager, Tritiumtransfersysteme etc.) sowie Abfallentsorgung im Jahr 2013 auch die Aufgabe, die Hauptsysteme der TRENTA-Anlage wieder in einen reibungslosen Betrieb zu überführen. Eine wichtige Teilaufgabe war dabei die Reparatur der beiden ausgesprochen teuren Elektrolyseure, der eine ausgedehnte Fehlersuche voranging. Die Reparatur umfasste den Austausch von Steuergeräten, Netzteilen und Filtern, die Diagnose an den Elektrolysezellen und letztendlich auch den Austausch der Elektrolysezellen. Eine weitere zeitintensive Aufgabe war die Vorbereitung und Durchführung der inneren Prüfung der Linde He-Kälteanlage.

Der Schwerpunkt der Leittechnikerarbeiten der Mess- und Automatisierungsgruppe lag wie im Jahr zuvor auf dem Ersatz des TLK-Prozessleitsystems. Dieser Austausch war erforderlich, weil das Altsystem Teleperm M vom Lieferanten nicht mehr gepflegt wird und Ersatzkomponenten nicht mehr verfügbar sind. In der vierten Phase des Umbaus schloss die Gruppe nun, basierend auf den Planungen aus diesem Jahr, die vollständige softwaretechnische Umsetzung für den Umbau des letzten zu ersetzenden alten Automatisierungssystems AS6 ab.

Diese Umsetzung stellte aus mehreren Gründen eine besondere Herausforderung dar: Das zu ersetzende Automatisierungssystem bildet das zentrale Tritiumrückhaltesystem (ZTS) des Tritiumlabors ab. Dazu waren neben zahlreichen Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen auch 32 komplexe und umfangreiche, ineinander verschachtelte automatische Ablaufsteuerungen zu implementieren. Nach deren Implementierung wurden dafür auch von der MAT-Gruppe eigens Labview-Programme entwickelt, die über Simulationsbaugruppen die E/A-Peripherie und das Verhalten des ZTS nachbilden. Das war notwendig, da das ZTS für diese Tests nicht zur Verfügung stand. Die finalen Tests der Ablaufsteuerungen werden nach dem abschließenden Umbau im zweiten Quartal 2014 stattfinden. Damit wird dann das Altsystem vollständig zurückgebaut und das neue PCS7-System vollständig in Betrieb sein.

Der Aufbau des KATRIN-Experiments erfordert auch weiterhin eine enge Zusammenarbeit mit der MAT-Gruppe des IKP, da für die Leittechnik der Tritiumkreisläufe einheitliche Systeme und Prozeduren erforderlich sind. Beide MAT-Gruppen erarbeiteten 2013 für KATRIN ein Gesamtkonzept zur zentralen PCS7-Projektverwaltung und Projektierung im Bereich der Leittechnik (Slow Control). Dieses Konzept umfasst neben sämtlichen Stationen auch die Datennetze bis hin zur Datenübergabe

an das KATRIN-Experiment-LAN. Dadurch werden Betrieb, Wartbarkeit und Erweiterbarkeit in diesem Bereich auch langfristig sichergestellt. Spezielle Verträge, wie beispielsweise ein Lizenz-Upgrade-Service, sichern dabei den Einsatz stets aktueller systemseitiger PCS7-Softwareversionen. Für das PCS7-Projekt der Kryogenen Pumpstrecke (CPS) von KATRIN erweiterte die MAT-Gruppe die im TLK entwickelte PCS7-AS/OS-Bausteinbibliothek einschließlich der technologischen Funktionseinheiten (Typicals).

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, wie 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 durchgeführt. Im Jahr 2013 konzentrierten sich die F&E-Arbeiten auf folgende Gebiete:

- Laser-Raman-Spektroskopie an gasförmigen tritiierten Wasserstoffisotopologen
- Beta-Induzierte Röntgenspektroskopie (BIXS) an gasförmigen Wasserstoffisotopologen und flüssigem tritiiertem Wasser (siehe KATRIN Kapitel)
- Infrarot-Spektroskopie an flüssigen Wasserstoffisotopologen (siehe Highlight)
- Anwendung der Flüssigszintillation als Inline-Methode zur Bestimmung des Tritiumgehalts von Wasser

Parallel zu den reinen F&E-Arbeiten wurden Kalorimeter, Ionisationskammern und Gaschromatographen sowie bestehende Kalibrierverfahren weiter optimiert. Die genannten Instrumente werden standardmäßig genutzt und bilden das Rückgrat der Analytik im TLK; daher müssen sie stets einsatzbereit sein. Ein Arbeitsschwerpunkt im Jahr 2013 war die kalte 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 einigen gerätetechnischen Optimierungen wurden im Sommer 2013 die ersten zufriedenstellenden Messungen mit dem Gerät vorgenommen. Im Jahr 2014 soll das Gerät in die betreffende Handschuhbox eingebaut werden. Dafür liefen 2013 verfahrenstechnische Planungen.

F&E für ITER

Die aktuellen Arbeiten für den Tritiumkreislauf von ITER konzentrieren sich auf den europäischen Beitrag „Wasserdetritierung und Isotopentrennung (WDS-ISS)“. Dafür entwickelt und untersucht das TLK im Rahmen des Programms „Fusion“ Prozesse zur Wasserdetritierung und zur Wasserstoffisotopentrennung mithilfe der TRENTA-Anlage. Ziel dieser Arbeiten 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 weitere Forschungsarbeiten im Rahmen der von ITER und F&E vergebenen Tasks aus. In diese Arbeiten ist auch die CAPER-Gruppe stark involviert.

Der Forschungsschwerpunkt im Bereich der ITER-relevanten Tritiumtechnologien lag im Jahr 2013 auf einer Studie zur sogenannten Capture & Exchange (C&E)-Methode. Dabei handelt es sich um die Speicherung von

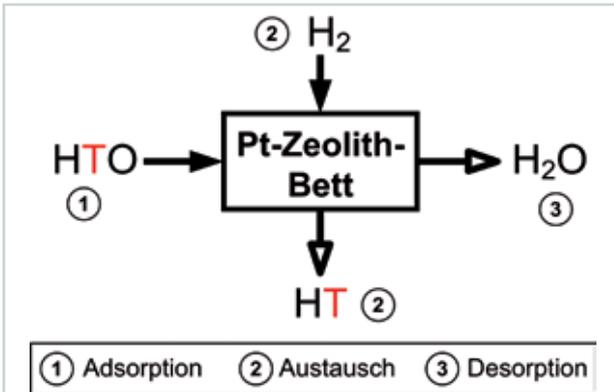


Abb. 3: Schematische Darstellung der Capture & Exchange-Methode zum Prozessieren von hochtritiertem Wasser (HTO) und zur Rückgewinnung von Tritium.

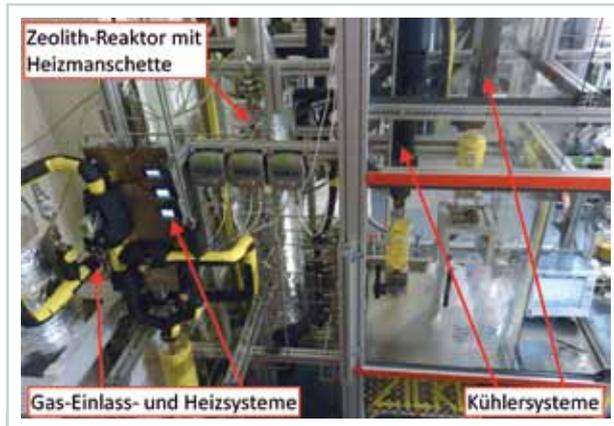


Abb. 4: Das Experiment „Zicke“ – Testaufbau für Untersuchungen der C&E-Methode unter ITERrelevanten technischen Bedingungen.

hochtritiertem Wasser auf Zeolith-Katalysatoren (Capture) und die Rückgewinnung des im Wasser gebundenen Tritiums durch Isotopenaustauschreaktionen auf den Zeolith-Katalysatoren (Exchange). Hochtritiertes Wasser, in dem ein oder gar beide Protiumatome (H) im Wassermolekül H₂O durch Tritiumatome (T) ersetzt sind, stellt aufgrund der Radiolyse des Tritiums (Bildung von Wasserstoffperoxiden H₂O₂) ein hochkorrosives Medium dar. Daher ist die Entwicklung von effektiven Technologien zur Handhabung und zum schnellen Prozessieren von hochtritiertem Wasser, welches in zukünftigen Fusionsreaktoren wie dem internationalen Projekt ITER erzeugt werden kann, wichtig und notwendig.

Basierend auf dieser Vorgabe startete das Tritiumlabor Karlsruhe in Zusammenarbeit mit ITER ein experimentelles C&E-Programm, um die Verwendung von Zeolith-Materialien zur sicheren Aufnahme und Speicherung von tritiertem Wasser sowie zur anschließenden Tritiumrückgewinnung durch Isotopenaustauschreaktion auf den Zeolithen zu untersuchen. Dabei ist die Rückgewinnung des Tritiums ein wichtiger Schritt, da Tritium neben Deuterium – einem weiteren Wasserstoffisotop – als Brennstoff für Fusionsreaktoren verwendet wird und somit ein wertvolles Gut darstellt. Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Schema mit den einzelnen Schritten der C&E-Methode.

Das C&E-Programm wurde in drei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Schritt wurden verschiedene Zeolithe im kleinen Maßstab (~25 g) in unterschiedlich dimensionierten Zeolithbetten (ZB) auf ihre Wasserspeicherkapazität (Adsorption) untersucht; anschließend wurden Isotopenaustauschreaktionen durchgeführt, um zusätzlich ihre Reaktivität zu bestimmen. Für die ersten Untersuchungen wurde anstatt des tritierten Wassers schweres Wasser (D₂O) verwendet. Die Zeolithe wurden zuvor mit dem Metall Platin (Pt) imprägniert, welches als Katalysator für die Austauschreaktionen zwischen dem adsorbierten Wasser und dem Austauschgas Protium (H₂) fungiert. Die ersten Versuche dienten letztendlich dazu, das effektivste Zeolith zu ermitteln, um dieses in den nächsten Programmschritten zu verwenden.

Der nächste Schritt umfasste die genauere Untersuchung des Zeoliths mit hochtritiertem Wasser und die Überführung des Tritiums aus dem Wasser in die Gasphase, um es für weitere Prozessschritte verfügbar zu

machen. Für diese Experimente mit dem hochkorrosiven und radiotoxischen Wasser und den 25-Gramm-Zeolithbetten musste in aufwendigen Planungs- und Umbaumaßnahmen die bestehende CAPER-Anlage im TLK modifiziert werden (siehe Abbildung 5). Gleichzeitig wurde ein neuer Teststand aufgebaut, um die C&E-Methode im technischen Maßstab unter ITER-relevanten Bedingungen (22 kg Zeolith; 2 kg gespeichertes Wasser; H₂-Flussraten bis zu 1 m³h⁻¹) mit schwerem Wasser (D₂O) zu testen. In den Versuchen, sowohl mit tritiertem Wasser in CAPER als auch im großtechnischen Testaufbau mit schwerem Wasser, wurden Prozessparameter wie Druck, Flussraten und Temperaturen variiert, um deren Einfluss auf die Wasserspeicherkapazität und die Isotopenaustauschrate zu ermitteln (Abbildung 4).

Die Ergebnisse des C&E-Programms zeigten, dass zur sicheren temporären Speicherung von hochtritiertem Wasser Zeolithe gut geeignet sind. Durch zusätzliche Imprägnierung des Zeoliths mit Metallkatalysatoren für den direkten Isotopenaustausch auf dem Zeolith ist gleichzeitig eine effektive Tritiumrückgewinnung ohne Weiteres möglich. Durch Optimierung der Betriebsparameter, wie etwa Temperaturgradienten entlang des Zeolithreaktors, war es möglich, die gesetzten Ziele von ITER (Austauschraten >100; Prozessieren von bis zu 2 kg Wasser) zu erfüllen und die Leistungsfähigkeit der C&E-Methode zu bestimmen.



Abb. 5: Erweiterung der CAPER-Anlage, um HTO prozessieren zu können.

Highlight: Infrarotspektroskopie an flüssigen Wasserstoffisotopologen mit dem Experiment TAPiR

Um den zukünftigen Energiebedarf der Menschheit aus emissionsarmen Quellen zu decken, gibt es neben der Erforschung regenerativer Energien auch Bestrebungen, die Kernfusion technisch nutzbar zu machen. Ein wichtiger Zwischenschritt auf dem Weg dorthin ist der International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), der im südfranzösischen Cadarache gebaut wird.

In der Brennkammer von ITER wird ein Plasma aus Deuterium und Tritium unter Energiefreisetzung zu Helium fusioniert. Um eine stabile Fusionsreaktion zu erhalten, muss dieses Fusionsplasma permanent gereinigt werden. Außerdem soll das für die Fusion benötigte Tritium nicht von außen zugeführt, sondern direkt im Reaktor erbrütet werden. Die bei der Extraktion des Tritiums und der Plasmareinigung entstehenden Gasströme müssen im Brennstoffkreislauf von Verunreinigungen befreit werden, bis der verbleibende Gasstrom nur noch aus den Wasserstoffisotopologen H_2 , D_2 , T_2 , HD , HT und DT besteht. Diese werden anschließend in einer Isotopentrennungsanlage (Isotope Separation System – ISS) separiert, um das reine Tritium in einen Speicherbehälter überführen zu können. Zentraler Bestandteil der ISS ist die kryogene Destillation. Dabei werden die Wasserstoffisotopologe bei Temperaturen um 23 K (-250°C) analog zur Destillation von Alkohol oder Raffination von Erdöl nur aufgrund ihrer verschiedenen Siedetemperaturen getrennt. Die kryogene Destillation findet in einer Kolonne statt, an deren Boden sich Tritium als das Isotopolog mit dem höchsten Siedepunkt ansammelt.

An dieser Stelle in der Säule ist es zur Prozesssteuerung und Bilanzierung des Tritiuminventars notwendig, die Tritiumkonzentration in der flüssigen Wasserstoffmischung kontinuierlich zu überwachen. Eine Möglichkeit dazu bietet die Infrarotspektroskopie. Diese wird im Experiment TAPiR am TLK unter Bedingungen ähnlich denen der ISS auf ihre Anwendbarkeit getestet. Ziele dieses Experiments sind, die Absorptionsspektren flüssiger Wasserstoffisotopologe zu untersuchen und den Zusammenhang zwischen Parametern der IR-Spektren und der Stoffkonzentration zu identifizieren. Eine große Herausforderung bildet der Aufbau eines Experiments, das die physikalischen Bedingungen in der kryogenen Destillation reproduzieren kann und Messungen, später auch mit Tritium, ermöglicht. Eine weitere große Herausforderung besteht darin, ausreichende Erkenntnisse zu erlangen, um alle Prozesse im flüssigen Wasserstoff, die Einfluss auf die IR-Absorptionsspektren haben, genau zu verstehen. Physikalische Größen, wie Druck und Temperatur, beeinflussen die gesuchte Messgröße, die Tritiumkonzentration. Daher sind eine komplexe Datenanalyse und aufwendige Messroutinen notwendig.

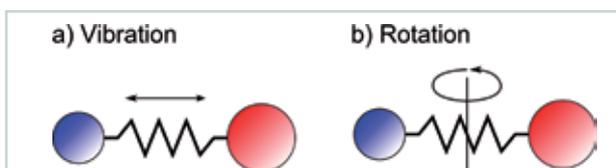


Abb. 6: Beim Hantelmodell können die Moleküle zu Schwingungen (a) und zur Rotation (b) angeregt werden, wobei diese sich gegenseitig beeinflussen.

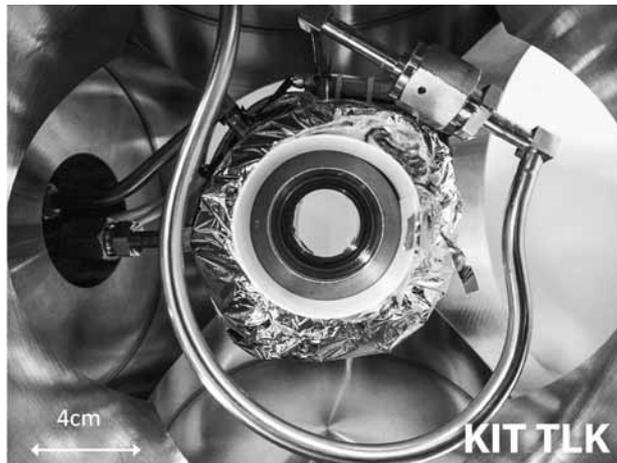


Abb. 7: Kryogene Probenzelle des Experiments TAPiR innerhalb des Vakuumbehälters, welcher der thermischen Isolation dient.

Grundlagen der Infrarotspektroskopie

Grundlage der Infrarot- wie auch der Raman-Spektroskopie ist das Hantelmodell zweiatomiger Moleküle. Dieses betrachtet die Moleküle als ein System aus zwei Massen, verbunden durch eine Feder (Abbildung 6). Somit können sie gegeneinander schwingen und um den gemeinsamen Schwerpunkt rotieren. Aus diesem Modell lassen sich mithilfe der Quantenmechanik diskrete Schwingungs- und Rotationszustände berechnen, die jeweils einer genau definierten Energie entsprechen. Diese Energien hängen von verschiedenen molekülspezifischen Parametern ab, beispielsweise von der Masse.

Aus diesen Energieniveaus ergeben sich nun genau definierte Energiedifferenzen, was die Spektroskopie ausnutzt. Die Position einer Linie lässt auf die Energiedifferenz und somit auf Parameter wie die Masse der untersuchten Moleküle schließen. Aus den Intensitäten der Übergänge wiederum lassen sich Rückschlüsse auf die Konzentration der beteiligten Moleküle ziehen. Somit sind in den Spektren sowohl Art als auch Konzentration der einzelnen Moleküle ablesbar. Die zugrundeliegende Theorie der beteiligten Wechselwirkungen in der flüssigen Phase ist allerdings nicht vollständig verstanden. Daher müssen zunächst aufwendige Kalibriermessungen durchgeführt werden, um tatsächlich aus einem Spektrum die Konzentration der verschiedenen Isotopologe bestimmen zu können.

Aufbau des TAPiR-Experiments

Um Infrarotspektren unter ähnlichen Bedingungen wie in der ISS von ITER untersuchen zu können, besteht das TAPiR-Experiment aus einer kryogenen Probenzelle (siehe Abbildung 7), die sich mithilfe von gasförmigem Helium bis ca. 20 K herunterkühlen lässt. Das Helium selbst wird in einer Kälteanlage der Firma Linde (250 W Kälteleistung bei 16 K) mit zwei Expansionsturbinen bis 14 K gekühlt und durch Edelstahlrohre und Schläuche zur IR-Zelle geleitet. Diese befindet sich in einem Isoliervakuum und wird zusätzlich durch eine hochreflektive Folie vor Wärmestrahlung geschützt.

Zum Untersuchen verflüssigter Gase mittels IR-Spektroskopie sind auf zwei Seiten der Zelle Saphirfenster angebracht, welche den tiefen Temperaturen und Drücken bis 10 bar standhalten müssen. Abbildung 8 zeigt die



Abb. 8: Blick durch die Saphirfenster – flüssiges Deuterium über einer Schicht von flüssigem Neon in der TApIR-Probenzelle.

Probenzelle, gefüllt mit flüssigem Deuterium und Neon. Das Foto entstand bei einem Vorversuch zu weiterführenden Experimenten an Mischungen mit Neon. Das Wasserstoffsystem des TApIR-Experiments besteht aus zwei Behältern zum Mischen, einem Palladium-Katalysator zur chemischen Equilibrierung der Gase und einem Vakuumpumpensystem. Zur Analyse der Gasmischungen steht außerdem ein im TLK entwickeltes Raman-Spektroskopie-System zur Verfügung, welches auch die Rotations- und Vibrationsanregungen der Moleküle nutzt (siehe auch ITEP Jahresbericht 2012).

Die verflüssigten Gasproben werden mit einem Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR)-Spektrometer untersucht. Dieses Spektrometer besteht aus einer Infrarotquelle, einem mit flüssigem Stickstoff gekühlten Detektor und einem Michelson-Interferometer. Durch die Bewegung eines Spiegels des Interferometers lässt sich auf dem Detektor ein Signal erzeugen, das die gewünschten spektralen Informationen enthält. Diese müssen jedoch zunächst fouriertransformiert und der weiteren Datenanalyse, wie einer Untergrundreduktion, unterzogen werden, um die in Abbildung 9 gezeigten Absorptionsspektren zu erhalten. Der Vorteil des Verfahrens besteht in der hohen Auflösung über einen großen Spektralbereich. So ist es möglich, zwei Vibrationsbanden der Wasserstoffisotopologe abzubilden und trotzdem die geringe Aufspaltung durch die Rotation der Moleküle aufzulösen.

Kalibriermessungen mit H_2 , D_2 , HD

Um mit dem IR-System Aussagen über unbekannte Stoffmischungen machen zu können, muss das System vorab mit bekannten Mischungen (in diesem Fall H_2 , D_2 ,

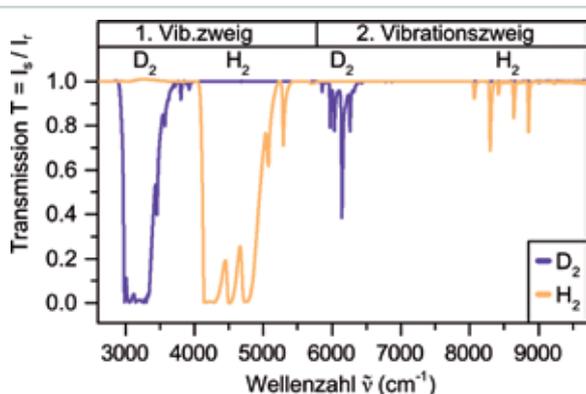


Abb. 9: Transmissionsspektrum von flüssigem Wasserstoff (H_2 , Reinheit 6.0; gelb) und Deuterium (D_2 , Reinheit 2.4 + Rest HD; lila), gemessen mit TApIR.

HD) kalibriert werden. Für die Aufnahme eines einzelnen Kalibrierpunkts – das heißt ein Infrarotspektrum einer bekannten Gasmischung – sind mehrere Schritte notwendig. Zuerst muss in einem Behälter eine Gasmischung vorbereitet werden. Mithilfe des bereits am TLK bewährten Raman-Messsystems kann nun die Zusammensetzung dieses Gases bestimmt werden. Daraufhin wird die Gasmischung in die IR-Messzelle kondensiert, wo Infrarotspektren genommen werden (siehe Abbildung 9). Die Gasmischung wird anschließend wieder verdampft und mit dem Raman-System gemessen. Die Aufnahme eines Datenpunkts mit dieser Routine dauert etwa einen Tag. Um nun eine komplette Kalibrierung durchführen zu können, das heißt von Parametern der IR-Spektren auf die Gaszusammensetzung schließen zu können, werden Messungen mit verschiedenen H_2 , D_2 - und HD-Konzentrationen benötigt. In Abbildung 10 sind als Beispiel die aus einem Datensatz erhaltenen Kalibrierkurven gezeigt, die eine quadratische Zunahme der Absorbanz mit der Deuteriumkonzentration zeigen.

Zusammenfassung und Ausblick auf zukünftige Experimente

Um Infrarotspektroskopie an flüssigen Wasserstoffisotopologen unter Bedingungen ähnlich denen der kryogenen Destillation in der Isotopentrennung bei ITER zu untersuchen, wurde am TLK erfolgreich das Testexperiment TApIR aufgebaut. Mit diesem ist es möglich, IR-Spektren von bekannten Gasmischungen in der flüssigen Phase zu messen und mit Raman-Spektren der Gasphase zu vergleichen. Die Aufnahme eines Datenpunkts zur Kalibrierung dauert mit diesem System etwa einen Tag. Zur Auswertung der Spektren wurde eine neue Datenanalysekette entwickelt, welche störende Effekte aus den Daten herausfiltert. Dies ermöglicht inzwischen ein gutes Verständnis der reinen IR-Absorptionsspektren. In naher Zukunft werden die ausgezeichneten Ergebnisse dieses wichtigen Experiments im Einzelnen veröffentlicht.

Nächste Schritte auf dem Weg der Entwicklung eines Analysesystems für die ISS von ITER sind der Aufbau eines tritiumkompatiblen Systems und die Aufnahme von IR-Spektren mit allen sechs Wasserstoffisotopologen. Langfristig soll ein IR-Spektroskopiesystem entwickelt und getestet werden, mit dem die Isotopologenkonzentration direkt im Sumpf der kryogenen Destillationskolonne bestimmt werden kann.

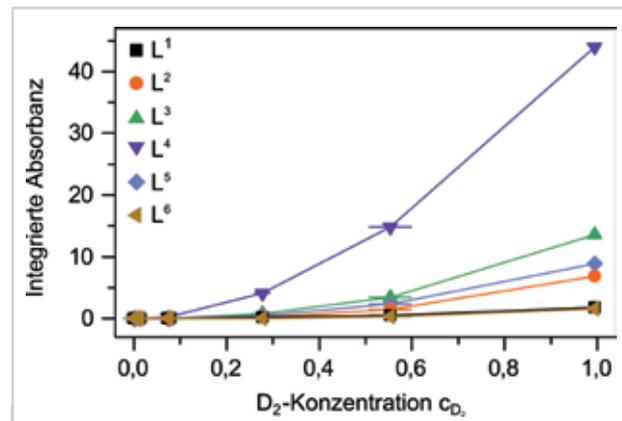


Abb. 10: Abhängigkeit der integrierten Absorbanz der Linien L_1 bis L_6 innerhalb der zweiten D_2 -Vibrationsbande von der D_2 -Konzentration.



Die weltweit erste Quecksilber-Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe im Betrieb.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Vakuumtechnik

Leitung: Dr. Christian Day

Nach wie vor sind die Vakuumsysteme für die Kernfusion der klare Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich Vakuumtechnik. Darüber hinaus wurden in diesem Jahr allerdings auch beachtliche Erfolge im Europäischen Metrologieprogramm sowie in der Methodenentwicklung der allgemeinen Vakuumgasdynamik erzielt.

In der Fusion wurden spezifische Aufträge von ITER ausgeführt und eigene Entwicklungen für ein Fusionskraftwerk vorangetrieben. Die ITER-Aufträge stützten sich in diesem Jahr auf Begleitarbeiten bei der Herstellung der Prototyp-Toruskryopumpe sowie thermomechanische Analysen für Komponenten der ITER-Neutralteilchenheizung (NBI). Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt allerdings im europäischen DEMO-Programm zur Vorbereitung eines leistungsfähigen Fusionsreaktors. Hier konnte das im Vorjahr vorgeschlagene flüssigmetallbasierte Vakuumpumpkonzept erfolgreich als Referenzlösung im DEMO-Konzeptdesign etabliert werden. Hauptaufgabe in den nächsten Jahren wird es nun sein, ein durch Messungen und numerische Simulationen abgestütztes Design der neuartigen Vakuumpumpen zu entwickeln. Das Europäische Fusionsprogramm wurde 2013 komplett umstrukturiert und in neue Arbeitspakete aufgeteilt. Hier wird der Arbeitsbereich Vakuumtechnik nicht nur federführend in der Fusionstechnologieentwicklung (Paket Vakuum-Materiezufuhr-Tritium) auftreten, wo die Projektleitung übernommen wurde, sondern, in Anerkennung der klaren Kompetenz auf dem Gebiet der Neutralteilchen-Gasdynamik, zum ersten Mal auch an mehreren plasmaphysikalischen Aktivitäten beteiligt sein. Dieses strategisch herausragende Ziel wurde dieses Jahr endlich erreicht.

Vakuumsysteme für ITER

Europa hat die Verpflichtung übernommen, alle primären Kryopumpen an ITER zu liefern. Hier handelt es sich um zwei prinzipielle Bauarten, nämlich zylindrische Pumpen für die ITER-Toruskammer und sehr große Rechteckpumpen für die Vakuumgefäße der ITER-Neutralteilcheninjektoren. Beide Bauarten beruhen allerdings auf dem gleichen physikalischen Konzept: die Kryosorption an Aktivkohle.

Um die Risiken für ITER klein zu halten, verfolgt man für beide Pumpentypen den Ansatz, die Pumpen in 1:1 Prototyp-Größe zu testen. Die Herstellung des Prototyps der Toruskryopumpe hat 2013 begonnen und wird voraussichtlich bis Mitte 2015 beendet sein.

Ein Teilgewerk bei der Pumpenherstellung, nämlich die Beschichtung der Kryopanel, die das Herzstück einer jeden Kryopumpe darstellen, wird im Bereich Vakuumtechnik erbracht. Hier macht sich ITER das große Know-How zunutze, das am Institut in den letzten zwei Jahrzehnten Kryopumpenentwicklung aufgebaut wurde.

Die Kryopanel für die Torus- und NBI-Kryopumpen – zunächst die Prototypen, dann die Serienpumpen – werden am KIT nach einer im Bereich Vakuumtechnik entwickelten bewährten Technologie mit Aktivkohle beschichtet. Dafür wurde am Institut eine halbautomatische Beschichtungsanlage aufgebaut (Beschickung mit Hand, Beschichtung automatisch), um eine sehr gut reproduzierbare Qualität gewährleisten zu können. Als erster Auftrag wurde in 2013 damit begonnen, die 30 Kryopanel für die Prototyp-Toruskryopumpe zu beschichten. Damit verbunden ist ein ausführliches Qualitätssicherungsprogramm, weil die ITER-Kryopumpen als direkt mit dem Torus verbundenen Komponenten den höchsten Sicherheitsanforderungen genügen müssen (Sicherheitsklasse 1). Abbildung 1 zeigt das erste beschichtete Panel dieser Serie, unmittelbar nach dem Beschichtungsprozess sowie nach dem Flüssigstickstoff-Eintauchtest.

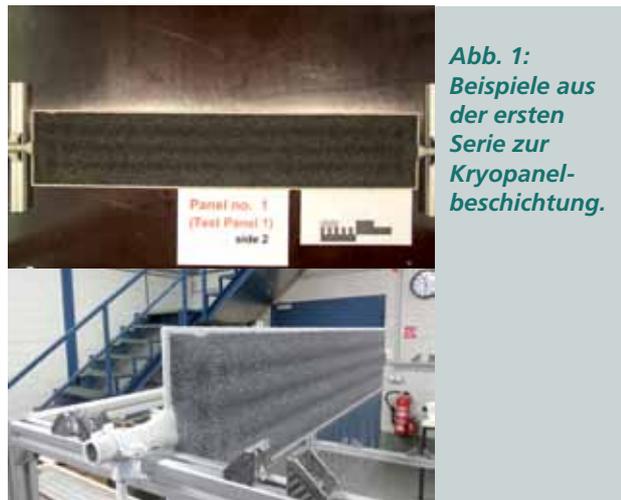


Abb. 1:
Beispiele aus
der ersten
Serie zur
Kryopanel-
beschichtung.

Ähnlich wie bei den Toruskryopumpen wird auch bei den NBI-Kryopumpen ein Test im 1:1-Maßstab vorgesehen. Dieser wird in dem eigens dafür gebauten NBI-Testbett MITICA in Padua, Italien durchgeführt werden. Das Pumpendesign wurde schon im Vorjahr abgeliefert, daher waren die Ingenieure und Physiker dieses Jahr im Bereich der thermomechanischen Analyse der NBI-Komponenten im Strahlengang aktiv. Hier konzentrierte man sich auf den Restionenneutralisator (RID), siehe Abbildung 2. Diese Komponente nimmt die auch nach dem Durchgang durch den Hauptneutralisator noch geladen vorliegenden Teilchen aus dem Strahl, in dem sie elektromagnetisch auf Platten abgelenkt werden. Detaillierte Designstudien wurden ausgeführt zum Kühlsystem der Platten und zur Stützstruktur des RID unter seismischen Belastungen. Außerdem wurde ein herstellbares Detaildesign eines Kühlkanals entwickelt und untersucht. Die Entwicklungsarbeiten für MITICA werden 2014 weitergeführt.

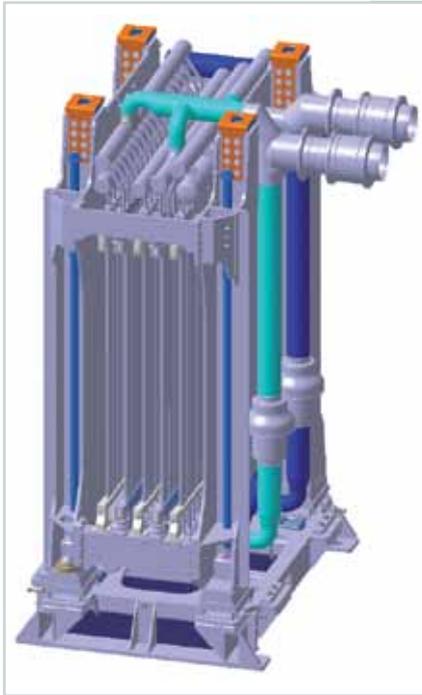


Abb. 2: Der Restionen-neutralisator eines Neutralteilchenheizsystems, mit Sicht auf die fünf parallelen Prallplatten

ITER-Physikprogramm

Das Projekt ITER hat für Komponenten mit besonders langer Lieferzeit die Designphase bereits abgeschlossen. Auch die Vakuumpumpen gehören zu den Komponenten, die bereits für das erste Plasma voll funktionsfähig sein müssen. Da sich die Plasmaszenarien in ITER jedoch kontinuierlich weiter entwickeln, ergibt sich immer die Frage, wie sich die Pumpen unter neuen Anforderungen außerhalb des Designs verhalten.

In diesem Jahr wurden ausführliche Rechnungen gemacht, wie sich die ITER-Toruskryopumpen im Falle von massiven Gaseinströmungen in das Plasmagefäß verhalten. Insbesondere sollte geklärt werden, ob die Kryopumpen in die Spontanregeneration gehen (d. h. die Pumpflächen erwärmen sich durch die mit dem Gasfluss eingebrachten Energien so stark, dass keine Pumpwirkung mehr auftritt), oder ob sie weiterpumpen können. Die massive Gaseinströmung ist eine absichtlich eingeleitete Notfallmaßnahme zur Vermeidung von punktuellen Leistungsspitzen auf die erste Wand im Falle von unerwünschten Disruptionen des Plasmas. Für diese

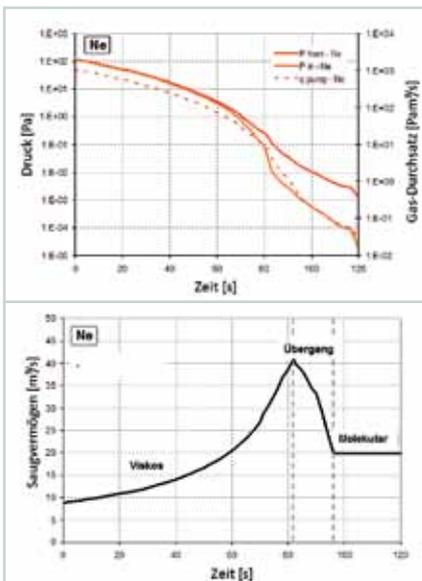


Abb. 3: Berechnete Pumpcharakteristiken im Falle von Neon als Kontrollgas nach einer Plasma-disruption.

Maßnahme können verschiedene Gase verwendet werden. Als Hauptergebnis wurde herausgefunden, dass nur die Verwendung von Neon und Argon einen kontinuierlichen Betrieb ohne Spontanregeneration der Kryopumpen sicherstellen würde. Abbildung 3 illustriert am Beispiel von Neon, dass das einströmende Gas innerhalb von 2 Minuten effektiv abgepumpt werden kann.

Vakuumsysteme für DEMO

Innerhalb des europäischen Fusionsprogramms hat der Bereich Vakuumtechnik auch die Verantwortung für die Entwicklung der Vakuumsysteme für ein stromlieferndes Kraftwerk übernommen. Dabei wurde ein neues Konzept entwickelt, das im Gegensatz zu den kryogenen Vakuumpumpen an ITER, kontinuierlich und ohne Kryogen arbeitet. Durch eine fest eingebaute Separation des Divertorabgases kann zudem ein Großteil des unverbrannten Brennstoffs direkt rezykliert werden, wodurch sich die aufgebauten Tritiuminventare und Prozesszeiten deutlich verringern lassen. Dieses sogenannte DIR-Konzept (Direkte Interne Rezyklierung) besteht aus drei Pumpstufen. Zur Separation 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 Arbeitsfluid betrieben wird.

Für dieses Konzept, das inzwischen als DEMO-Referenz etabliert werden konnte, wurde in diesem Jahr ein komplettes Verfahren entwickelt: der KALPUREX-Prozess ('Karlsruhe liquid metal based pumping process for reactor exhaust gases') wurde im September zum Patent eingereicht. Abbildung 4 zeigt den Prinzipaufbau.

Bereits letztes Jahr wurde die Quecksilberdiffusionspumpe als geeignet nachgewiesen. Als Highlight In diesem Jahr konnte auch die Funktionsfähigkeit der quecksilberbetriebenen Flüssigkeitsringpumpe und einer Metallfolie erfolgreich nachgewiesen werden. Damit wird die Verwendung von Kryopumpen für DEMO nur noch als Ersatzlösung angesehen, falls auf dem weiteren Entwicklungsweg von KALPUREX unlösbare Probleme auftauchen sollten.

Die Weiterentwicklung der neuen Pumpe wird eine Schwerpunktaufgabe im bevorstehenden Fünfjahres-

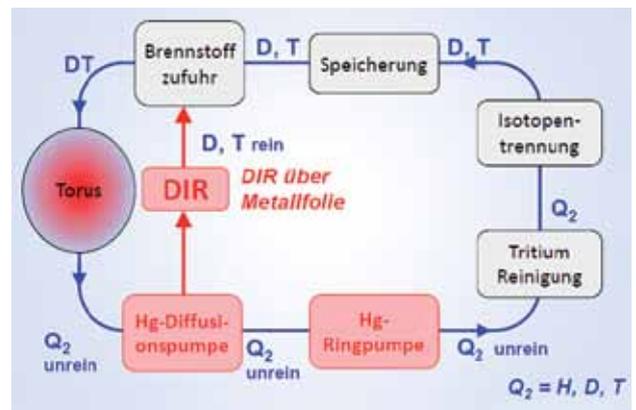


Abb. 4: Der innere Brennstoffkreislauf von DEMO mit innerer Rezyklierung.

plan des Europäischen Fusionsprogramms darstellen. Diese Entwicklung wird zusammen mit den Systemen der Tritiumanlage, der Tritiumextraktion der Brutblankühlsysteme, und den Systemen der Materiezufuhr (Gas, Eis) in einem gemeinsamen Arbeitsschwerpunkt bearbeitet, was interessante Möglichkeiten für Synergien und weitere Optimierungen bietet.

Modellierung von Vakuumströmungen

Die rechnerische Simulation von Vakuumströmungen in einem weiten Bereich der Verdünnung (also vom viskosen Regime über den Übergangsbereich bis in die freie molekulare Strömung) wurde innerhalb des Arbeitsbereiches in den letzten Jahren sehr stark vorangetrieben. Hier steht inzwischen ein Bündel von verschiedenen Ansätzen zur Verfügung, je nachdem, welche Anforderungen bestehen.

In diesem Jahr wurde der Fokus auf die Beschreibung der Neutralteilchenströmung unterhalb des Divertors einer Fusionsanlage gelegt. Im Divertor herrschen starke Temperaturgradienten, wodurch das Plasma auf der innen liegenden Seite wieder in neutrales Gas auf der Unterseite umgewandelt wird. Er ist eine der wichtigsten Komponenten, da er wesentlich für die Stabilität der gewählten Plasmamode ist als auch das in der Fusionsreaktion gebildete Helium zuverlässig ausschleusen muss. 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, die auch zur Plasmakontrolle verwendet werden könnte, wenn man die Strömungsvorgänge besser verstehen würde. Die Entwicklung eines eigenen Codes dafür ist ein Schritt in diese Richtung.

In diesem Jahr gelang es den Vakuum-Wissenschaftlern, die komplexe Divertorgeometrie (2D) so in einen Strömungscodes (DSMC) einzubauen, und die Plasmakontrolle als Randbedingung so zu berücksichtigen, dass die Dichteverteilung im Sub-Divertor physikalisch konsistent vorhergesagt werden kann. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis einer solchen Rechnung für den ITER-Divertor.

Diese neuen Ergebnisse wurden auf der Europäischen Plasmaphysikkonferenz im Sommer 2013 vorgestellt und sind dort auf äußerst große Beachtung gestoßen.

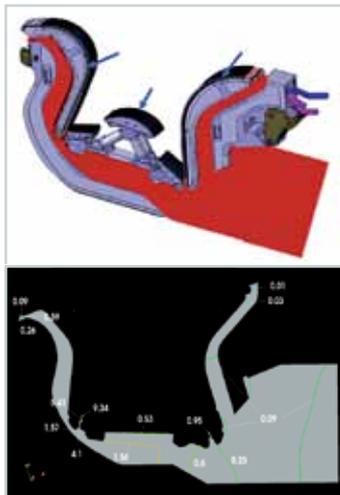


Abb. 5: Berechnung der Druckverteilung (in Pa) unterhalb einer ITER-Divertorkassette (oben). Der Integrale Totaldruck beträgt in diesem Beispiel 2.6 Pa.

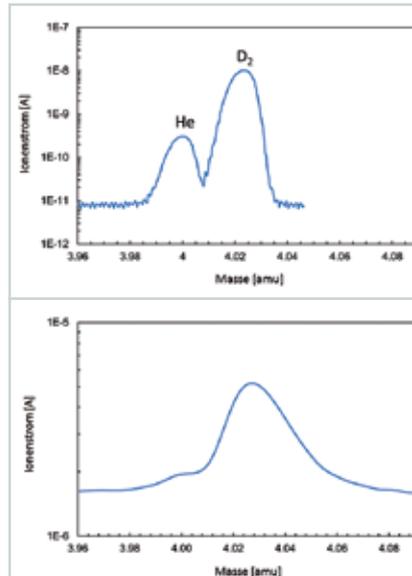


Abb. 6: Auflösung von He und D₂ in einem Gasgemisch mit 3.7 % He und 95,4 % D₂. Oben die Referenz, gemessen mit einem High End Quadrupol, unten das beste Ergebnis mit dem neuen ART-MS.

Darauf aufbauend wurde jetzt ein mehrstufiges Entwicklungsprogramm aufgelegt, bei dem der neue Rechencode mit Experimenten der großen europäischen Fusionsmaschinen (AUG, JET) und Rechnungen mit anderen, mehr plasmadominierten Codes für zukünftige Maschinen (ITER, JT60-SA, DEMO) verglichen wird. Diese Aktivität wird somit zu einem weiteren Schwerpunkt im Bereich Vakuumtechnik ausgebaut.

Gasabgabe und Vakuumdruckmesstechnik

Die neue Anlage OMA wurde im Berichtsjahr dazu verwendet, die Gasabgaberraten von Edelstahl (als Standardwerkstoff für Vakuumkammern) mit verschiedenen Oberflächenbehandlungsmethoden zu messen. Als Hauptergebnis zeigte sich, dass ein definiertes Ausheizen (100 h, 400 °C) bereits ausreicht, die Gasabgaberrate um eine Größenordnung zu reduzieren. Dabei war es unerheblich, ob das Ausheizen unter Vakuum oder unter Luft stattfand.

Des Weiteren wurde ein neu auf dem Markt befindliches Massenspektrometer (ART-MS) hinsichtlich der Fähigkeit untersucht, die im Spektrum nah beieinander liegenden Gase D₂ und He aufzulösen. Es zeigte sich, dass das neue Gerät dafür ungeeignet ist, siehe Abbildung 6.

Netzwerke und Kooperationen

Das Europäische Netzwerk VACU-TEC für vakuumtechnische Entwicklungen auf dem Gebiet der Fusion, das von KIT koordiniert wird, hat sich gut entwickelt und wurde in diesem Jahr weitgehend zu Ende geführt; die fünf Trainees zeigten beeindruckende Fortschritte. Es wird daran gearbeitet, das sehr erfolgreiche Programm ab 2015 wieder aufzulegen.

Die Ausgasanlage OMA ist innerhalb des Europäischen Metrologieprogramms in ein Vergleichsprogramm verschiedener Anlagenkonzepte aufgenommen worden, insbesondere um die Relevanz für industrielle Einsatzmöglichkeiten zu untersuchen. In diesem Zusammenhang werden die Kollaborationen mit der PTB, Berlin und dem Forschungsinstitut IMT in Ljubljana, Slovenien weiter ausgebaut. In einem round robin Test werden verschiedene Proben in allen Anlagen vergleichend untersucht.

Highlight 2013 Vakuumtechnik: Funktionsnachweis neuer Vakuumpumpen für DEMO.

Der wichtigste Meilenstein war in diesem Jahr der Funktionsnachweis der Quecksilberringpumpe und der Metallfolienpumpe, beides Vakuumpumpen, die im Brennstoffkreislauf zukünftiger Fusionskraftwerke (DEMO) eine zentrale Rolle spielen werden.

In Fusionsreaktoren muss das heiße Deuterium/Tritium-Plasma mit Hilfe von magnetischen Feldern in einem Vakuumgefäß eingeschlossen werden. Um das bei der Fusionsreaktion entstehende Helium aus dem Plasma ‚auszuspülen‘, muss der Reaktor kontinuierlich mit einer Mischung aus Deuterium und Tritium gespeist werden. Um einen Druckanstieg im Torus durch das eingebrachte Gas zu verhindern, muss dieses mit Hilfe von Vakuumpumpen ständig gepumpt werden. Das abgepumpte Gas wird anschließend in der Tritiumanlage aufgereinigt (d. h. Helium und Verunreinigungen müssen entfernt werden) und der Maschine erneut zugeführt.

Den Vakuumpumpen kommt in diesem Kreislauf, dem sogenannten inneren Brennstoffkreislauf, eine wichtige Rolle zu: Sie müssen kontinuierlich große Mengen an tritiumhaltigem Gas abpumpen und dabei zuverlässig und unbeeinträchtigt durch die rauen Umgebungsbedingungen (Staub, hohe Magnetfelder, starke Neutronenstrahlung etc.) zuverlässig und sicher funktionieren.

Die Entwicklung eines neuen Vakuumpumpkonzepts für einen Fusionsreaktor mit langen Plasmapulsen wurde bereits 2010 im Bereich Vakuumtechnik begonnen. Zunächst wurden Studien durchgeführt mit dem Ziel neue, nicht-kryogene und kontinuierlich arbeitende Vakuumpumpen zu identifizieren, die das Tritiuminventar in dem Pumpsystem gering halten und gleichzeitig die Komplexität des Gesamtsystems durch das Wegfallen von Regenerationszyklen und Kryoinfrastruktur reduzieren. Das hierbei entwickelte Konzept beinhaltet drei Pumptypen: Eine Diffusionspumpe als Hochvakuumpumpe, eine Flüssigkeitsringpumpe als Vorvakuumpumpe und eine Metallfolienpumpe, die reinen Wasserstoff spezifisch pumpt. Die Funktion der Diffusionspumpe, mit Quecksilber als tritiumkompatibles Arbeitsmittel, wurde bereits 2012 erfolgreich nachgewiesen. In diesem Jahr standen nun die experimentellen Funktionsnachweise der Flüssigkeitsringpumpe, ebenfalls mit Quecksilber als Arbeitsmittel, und der Metallfolienpumpe auf dem Programm.

Für die Flüssigkeitsringpumpe, die theoretisch mit jeder beliebigen Flüssigkeit betrieben werden kann, wurde noch nie ein Betriebsmittel mit einer ähnlich hohen Dichte wie die von Quecksilber eingesetzt (13-mal höher als die von Wasser). Typischerweise kommen in diesen industriell sehr häufig verwendeten Pumpen Wasser, Öl oder verschiedene Lösungsmittel zum Einsatz, die durch ihren Dampfdruck den Enddruck der Pumpe bei einigen zehn bis hundert mbar begrenzen. Alle bisherigen Betriebserfahrungen mit Ringpumpen sind damit so weit von dem für die Fusion vorgesehenen Einsatzzweck entfernt, dass selbst Abschätzungen des Leistungsvermögens mit einer sehr großen Unsicherheit verbunden sind. Eine, für die Dichte von Quecksilber modifizierte Testpumpe wurde daher 2012 in Kooperation mit der Industrie entwickelt und in diesem Jahr in der THESEUS-Anlage für einen ersten Funktionstest eingebaut, siehe Abbildung 7.



Abb. 7: Die Quecksilberringpumpe installiert in der THESEUS-Anlage.

Bereits das erste Abpumpen (Abbildung 8) des Testbehälters an THESEUS verlief sehr erfolgreich und übertraf die Erwartungen an die Pumpe: Sowohl der erreichte Enddruck als auch die Laufruhe (trotz einer bewegten Masse von über 100 kg in der Pumpe) waren hervorragend. Die Simulation einer zweiten Pumpstufe durch Absenken des Auslassdrucks führte zu einem Enddruck kleiner als ein mbar, was für Flüssigkeitsringpumpen einen neuen Enddruckrekord darstellen dürfte! Als nächster Schritt folgt nun ein ausführliches Testprogramm sowie Designaktivitäten um eine vollständig tritiumkompatible Pumpe für die JET Tritiumkampagne 2017 zu entwickeln

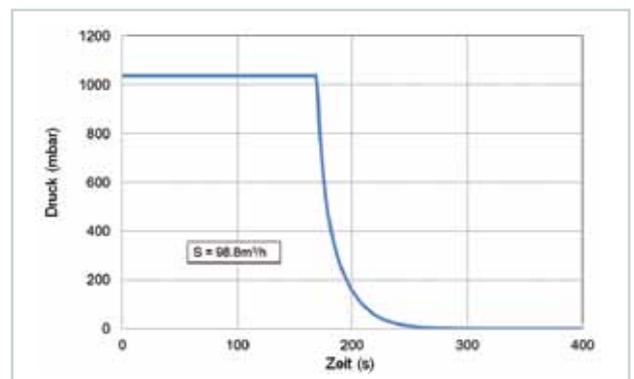


Abb. 8: Erste Abpumpkurve einer Quecksilberringpumpe: Der 450L-Dosierdom der THESEUS-Anlage wurde innerhalb von 90 Sekunden mit einem Saugvermögen von knapp 100 m³/h auf einen Enddruck von wenigen mbar evakuiert.

Die Metallfolienpumpe ist das Herzstück des Brennstoffkreislaufkonzepts mit direkter interner Rezyklierung (DIR). Aufgabe der Pumpe ist es, eine Abtrennung des unverbrannten Brennstoffs (d. h. reines Deuterium/Tritium) direkt am Torus zu realisieren und diesen Anteil des abgepumpten Gases direkt in den Reaktor zurückzuführen. Dieses direkte Recycling gibt dem DIR-Konzept seinen Namen und sorgt dafür, dass die Tritiumanlage nun einen wesentlich kleineren Gasstrom prozessieren muss und damit auch kleiner (d. h. mit einem geringeren Tritiuminventar) ausgelegt werden kann.

Diese Pumpe besteht im Wesentlichen aus einer beheizten Metallfolie, und einer Plasmaquelle. Wenn ener-



Abb. 9: Das HERMES Plasmaexperiment am ITEP.

Oben: Gesamtaufbau – Im Vordergrund befindet sich die Plasmaquelle, daran angeschlossen die zwei Vakuumkammern mit dem Metallfolienadapter dazwischen. Unten: Die lineare Plasmaquelle mit Magnetron (Bild hinten).



Abb. 10: Blick in das Wasserstoffplasma der linearen Quelle (Mitte links) auf die Metallfolie (Mitte rechts).

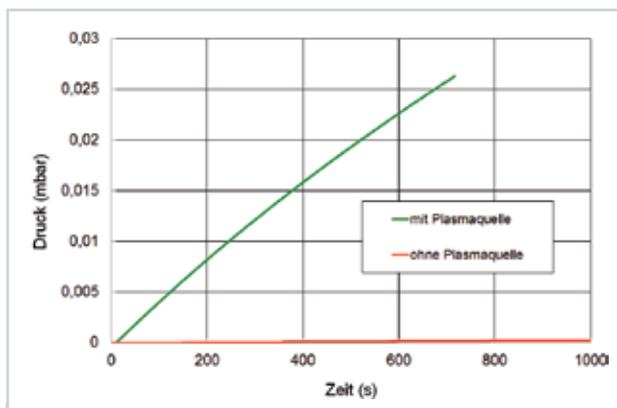


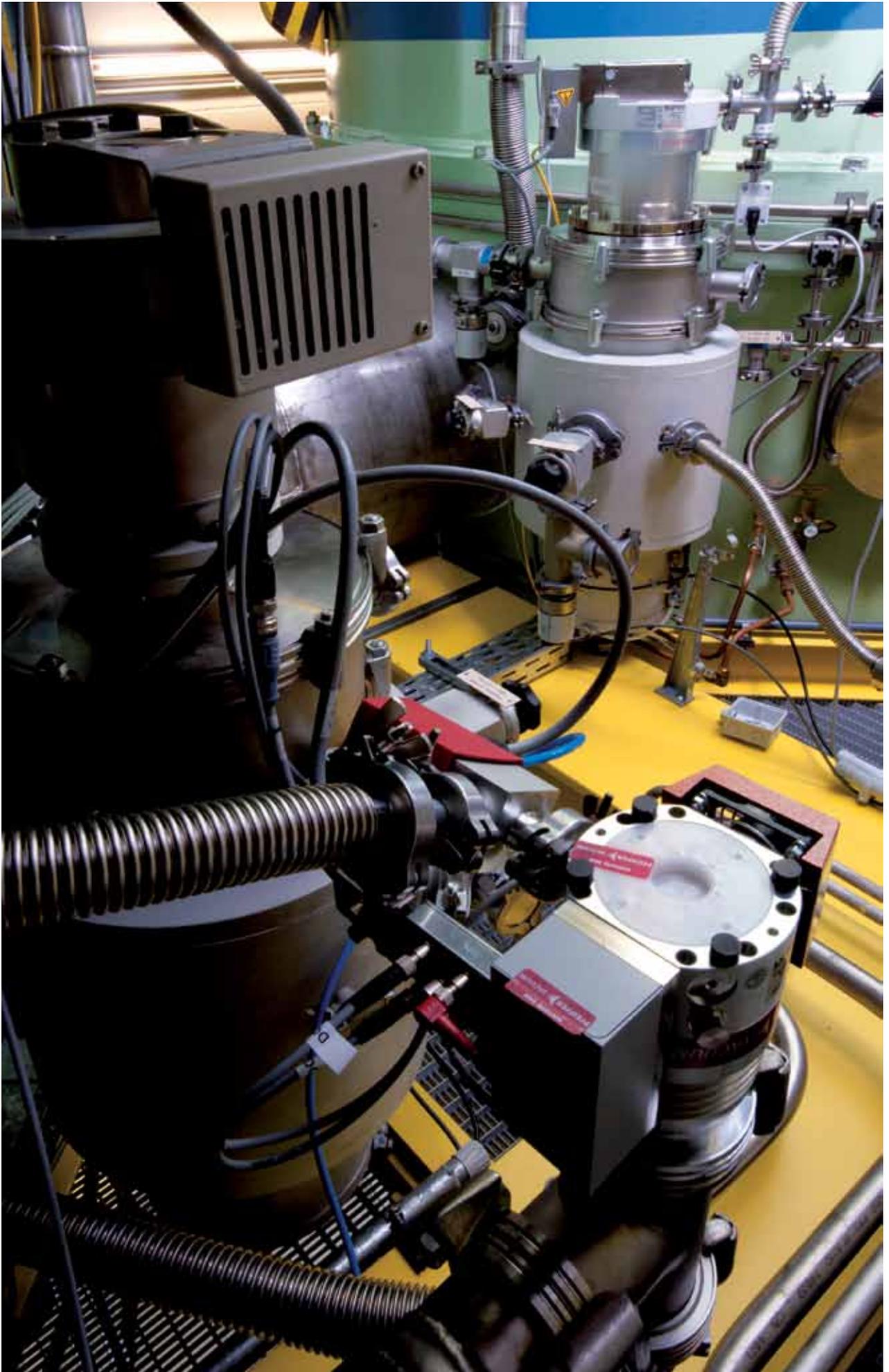
Abb. 11: Druckanstieg in der Vakuumkammer hinter der Metallfolie mit und ohne gezündetem Plasma.

giereicher, atomarer Wasserstoff (Plasma) auf die Metallfolie trifft, so kann dieser die Folie durchdringen. Eine Rekombination auf der anderen Folienseite verhindert ein Zurückströmen des bereits molekularen Wasserstoffs. Hierdurch wird ein Kompressionseffekt spezifisch für reinen Wasserstoff erreicht. Um diesen Pump-effekt, der noch nie mit einem ‚kalten‘ Mikrowellenplasma nachgewiesen wurde, und um den Einfluss verschiedener Folienparameter (z. B. Dicke, Material, Temperatur) zu untersuchen, wurde am ITEP ein Plasmaexperiment (HERMES, siehe Abbildung 9) mit einer linearen Plasmaquelle im Labormaßstab aufgebaut.

Dieses Experiment besteht im Wesentlichen aus zwei Vakuumkammern, zwischen die eine Metallfolie über einen Adapter eingebracht werden kann. Von der einen Seite wird die Folie mittels einer Plasmaquelle mit einem Hochfrequenzplasma (Abbildung 10) beaufschlagt. In der gegenüberliegenden Kammer mit bekanntem Volumen kann nun ein Druckanstieg beobachtet werden (vgl. Abbildung 11) und dadurch der Gasdurchsatz durch die Metallfolie bestimmt werden. Bereits ein erster Versuch mit einer dünnen Vanadiumfolie hat einen deutlichen Pumpeffekt erkennen lassen. Damit hat nur 9 Monate nach Baubeginn das ‚erste Plasma‘ stattgefunden und zu sehr vielversprechenden Ergebnissen geführt!

Durch die Tests der Metallfolienpumpe und der Quecksilberringpumpe ist es nun gelungen die Funktion des vom KIT vorgeschlagenen Pumpkonzepts zu demonstrieren. Dieser große Erfolg hat weitreichende Konsequenzen für die zukünftigen Arbeiten in diesem Bereich, die sich nun darauf konzentrieren werden, die einzelnen Pumpen in einem DEMO-relevanten Design zu entwickeln und experimentell zu charakterisieren.

Die Vorbereitung des Quecksilberring-Experiments in THESEUS und der Aufbau des Plasmaexperiments HERMES innerhalb von nur wenigen Monaten bedeutete einen straffen Zeitplan und war nur mit vereinten Kräften möglich. Darauf sind wir besonders stolz und hoffen dass sich dieses erfolgreiche Zusammenspiel sowohl innerhalb der Gruppe als auch gruppenübergreifend auch in der Zukunft fortsetzt.



Turbomolekularpumpe an der 2-kW-Heliumtiefemperaturanlage.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Kryotechnik

Leitung: Dr. Holger Neumann

Kryotechnik für die Fusion

Der Bereich Kryotechnik konzentrierte sich 2013 innerhalb des Programms „Fusion“ auf den letzten Serientest der Stromzuführungen für das nationale Projekt W7-X sowie den Aufbau einer Testanlage zum Test von 26 Stromzuführungen für das internationale Projekt JT-60SA.

Test der W7-X Serienstromzuführungen in TOSKA

Für das Plasma-Experiment W7-X wurden im Februar 2013 die letzten zwei von insgesamt 16 Stromzuführungen erfolgreich getestet. Die Stromzuführungen wurden nach Greifswald geliefert. Am 26. Juni 2013 endete das Projekt mit der Übergabe des letzten Abnahmeprotokolls während eines Abschlusskolloquiums.

Aufbau der Stromzuführungstestanlage CuLTKa

Zum Test der 26 Stromzuführungen für JT-60SA wird die neue Testanlage CuLTKa (Current Lead Test facility Karlsruhe), (siehe Abbildung 1) aufgebaut und in die bestehende Kryoinfrastruktur des ITEP integriert. Im März 2013 wurden die Transferleitungen (siehe Abbildung 3) nach erfolgreicher Werksabnahme geliefert und vom Hersteller eingebaut (siehe Abbildung 2). Nach der Installation der Transferleitungen im April 2013 begann der Aufbau der Verrohrung in den Kryostaten. Die Lecktests der Verrohrung im Kryostatinnern sind erfolgreich abgeschlossen. Zwei Kryostaten wurden bereits geschlossen und erfolgreich integral leckgetestet. Anfang 2014 soll die Feldverkabelung fertiggestellt werden; dann kann die Anlage in Betrieb gehen.

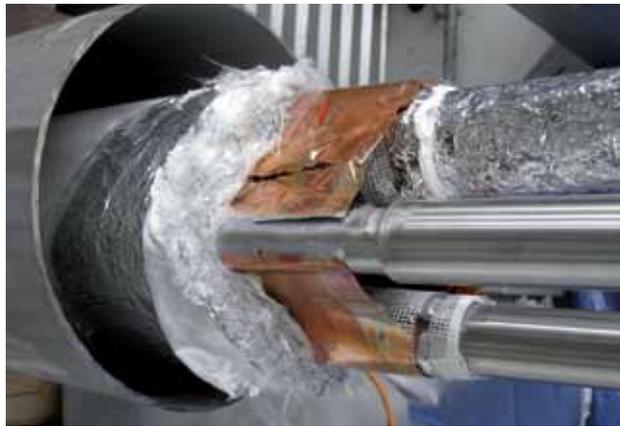


Abb. 2: Kryotransferleitung zwischen 2-kW-Anlage und CuLTKa.



Abb. 3: Kryotransferleitungsabschnitte für CuLTKa.



Abb. 1: Stromzuführungstestanlage CuLTKa.

Messung der Betriebskennlinie von Kryovalven

Im Rahmen der Stromzuführungstests für W7-X in TOSKA wurde eine Ventilmessstrecke aufgebaut, um die Grund- und Betriebskennlinie von Kryovalven bei Einsatzbedingungen zu bestimmen (siehe Abbildung 4). Mit der Messstrecke konnten die ersten Kennlinien von Kryovalven bei 4,5 K bestimmt/nachgemessen und mit Berechnungsmodellen verglichen werden. Mithilfe der Ergebnisse können Kryovalven sicherer ausgelegt werden.

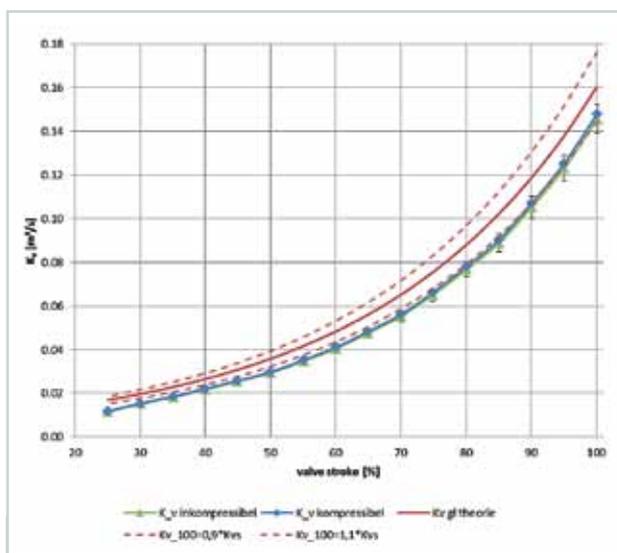


Abb. 4: Betriebskennlinien für Kryovalven.

Kryotechnik für rationelle Energieumwandlung und -nutzung

SUPRAPOWER

Im Dezember 2012 startete das EU-Projekt SUPRAPOWER (Superconducting, reliable, lightweight, and more powerful offshore wind turbine) mit insgesamt neun Partnern (Leitung: TECNALIA Research & Innovation; Partner: KIT, ACCIONA Windpower, Acciona Energy, Columbus Superconductor, Oerlikon-Leybold Vacuum, Institute of Electrical Engineering, University of Southampton, D2M Engineering). Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines supraleitenden Generators für Offshore Windkraftanlagen mit einer Leistung von 10 MW. Derzeitige Windkraftanlagen erreichen eine Leistung von bis zu 7 MW; eine weitere Vergrößerung mit konventioneller Technik stößt an Materialgrenzen hinsichtlich Größe und Gewicht. Der Einsatz supraleitender Generatoren soll die größere Leistung ermöglichen und dabei Masse, Größe und Kosten des Generators im Vergleich zu konventioneller Technik gering halten.

Das KIT hat im Rahmen dieses Projekts die Aufgabe, einen geeigneten Kryostaten für die supraleitenden Spulen zu entwickeln, zu bauen und zu testen. Zunächst analysierten die Wissenschaftler dafür das Kryostatdesign der Fa. Tecnalia (European Patent Application EP 2 525 125 A1: „Direct-action superconducting synchronous generator for a wind turbine“; 7. Dezember 2012; PCT/ES2009/070639) was Modularität, Masse und vor allem den Wärmeeintrag betrifft. Selbst unter günstigen Annahmen zeigte sich dabei, dass der Wärmeeintrag für 60 Spulen eines supraleitenden Generators mit 10 MW ca. 30 GM-Kleinkühler der Fa. Oerlikon-Leybold Vacuum erfordern würde. Weiterhin ergab die Analyse, dass die maximale Temperaturdifferenz zwischen dem GM-Kleinkühlerkopf und dem wärmsten Punkt mit über 5 K zwar noch unterhalb der kritischen Temperatur des Supraleiters liegt, aber für das aktuelle Spulendesign kritisch sein kann (siehe Abbildung 5). Ziel eines verbesserten Kryostatdesigns ist demnach, den Wärmeeinfall von außen zu reduzieren, sodass die maximale Temperaturdifferenz weniger als 3 K beträgt.

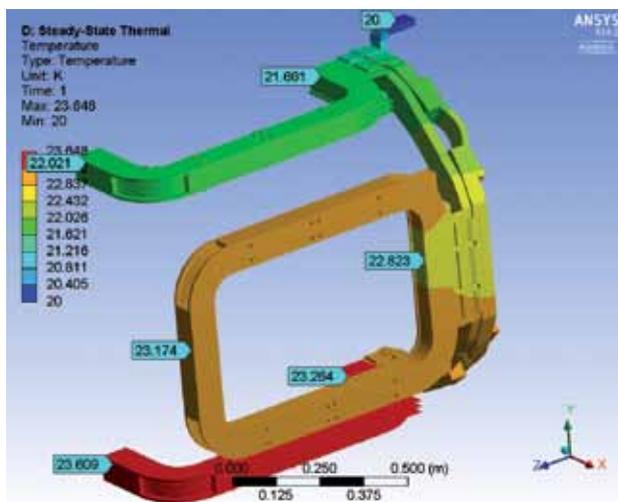


Abb. 5: Temperaturverteilung der supraleitenden Spulen an einem Kupferferring für den Demonstrator mit vier Spulen.

LIQHYSMES (LIQuid HYdrogen & SMES)

Für den Hybrid-Energiespeicher auf Basis von flüssigem Wasserstoff und supraleitendem Energiespeicher erstellte das ITEP weitere Studien zu den jahreszeitlichen Stromschwankungen. Darüber hinaus wurde für erste Experimente ein vorhandener Kryostat ausgewählt (siehe Abbildung 6).

Die Wissenschaftler erstellten R&I-Schemen für verschiedene Betriebsweisen und diskutierten sie ausführlich. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde der Regenerator/Rekuperator-Teil zunächst thermodynamisch bilanziert. Darüber hinaus wurde ein erster Konstruktionsentwurf erstellt, der die Abmessungen des ausgewählten Kryostaten berücksichtigt. Als Regenerator-Material wurde Blei hinsichtlich Dichte und Wärmekapazität für besonders geeignet erachtet. Darüber hinaus wurden die optimalen Druckverhältnisse ermittelt, um eine maximale Verflüssigung beim vorgegebenen Volumen zu erzielen. Im Bereich Hochfeldmagnete unter der Leitung von Dr. Theo Schneider wurden MgB_2 -Proben charakterisiert; im Rahmen einer Diplomarbeit wurden Be- und Entladung an einer kleinen Spule in HOMER I untersucht. Die endgültigen Versuche mit LH_2 sollen am IKET im Wasserstoffzentrum durchgeführt werden. Dafür wurde bereits ein Experimentstandort festgelegt.



Abb. 6: Kryostat mit SMES (MgB_2 -Spule) und Regenerator/Rekuperator-Einheit.

Kryoinfrastruktur

Auch im Jahr 2013 gewährleistete der Bereich Kryotechnik den Betrieb der drei Kälteanlagen und der Heliumrückgewinnungsanlagen des ITEP. Darüber hinaus nahm er umfangreiche Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an den Anlagen vor.

Die Arbeiten umfassten unter anderem:

- Reparatur von Ölpumpen innerhalb der Verdichter- und Turbineneinheiten (siehe Abbildung 7)
- Revision von Leistungsschaltern
- Erweiterung der Heliumrückgasleitung vom ANKA-Gebäude und vom VATESTA-Versuchsstand
- Austausch von Messumformerschränken und der Analysenmesstechnik
- Erneuerung der Ansteuerung von Heliumgasanwärmern und Turbopumpen
- Ausbau und Revision von Ventilen (siehe Abbildung 8)
- Umbauarbeiten an der Heliumreinigungsanlage
- Erneuerung von verschiedenen Leitungsabschnitten
- 20 000 Stunden Service am Rückverdichter V40 (siehe Abbildung 9)
- Erneuerung aller Hochdruckschläuche der Rückverdichter



Abb. 7:
Instandsetzungsarbeiten an Anlagenteilen der 300-W-Tief-temperaturanlage.

Die 300-W-Heliumtieftemperaturanlage war 2013 für 1617 Stunden in Betrieb. Davon entfielen 336 Stunden auf den Verflüssigungsbetrieb und 97 Stunden auf den Spülbetrieb sowie das Kalt- und Warmfahren der Anlage, sodass 1184 Stunden reine Kälteleistung für Experimente im Hochfeldmagnetbereich erbracht wurden.

Die 2-kW (4,5 K)-He-Tieftemperaturanlage war im Jahr 2013 für 917 Stunden in Betrieb. Davon entfielen 419 Stunden auf den Verflüssigungsbetrieb und 221 Stunden auf den Spülbetrieb sowie das Kalt- und Warmfahren der Anlage. Somit wurden 277 Stunden reine Kälteleistung für Experimente im Bereich Fusion erbracht.



Abb. 8: Austausch von Kryovalven 2-kW-TTA und Hochdruckreinigung.

Insgesamt wurden von den Anlagen ca. 176 758 Liter Helium verflüssigt. Davon wurden 122 304 Liter für Experimente innerhalb des ITEP verwendet, während 54 454 Liter an Fremdinstitute gingen.

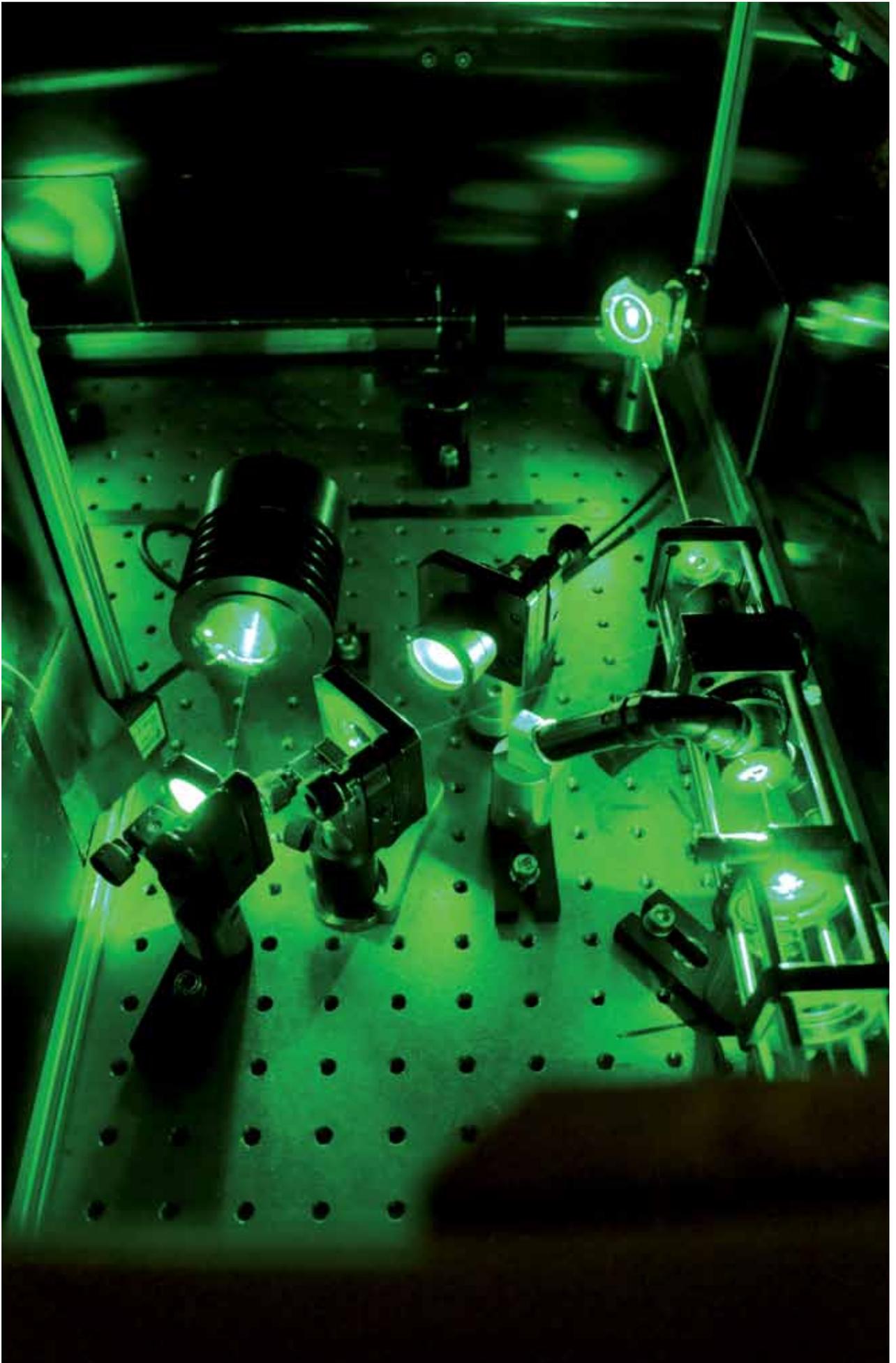
Die 500-W (4,5 K)-Linde Tieftemperaturanlage für das KATRIN-Experiment war 2013 lediglich für 147 Stunden in Betrieb, davon 62 Stunden für den Spülbetrieb sowie das Kalt- und Warmfahren der Anlage. Der reine Refrigeratorbetrieb entfiel mit 83 Stunden auf die Abnahmetests des dritten Teilstücks der Transferlinie für den Anschluss der CPS.

Die Instandhaltungsarbeiten wurden planmäßig und professionell von den Mitarbeitern der Kryoinfrastruktur ausgeführt. So traten im Jahre 2013 keine nennenswerten Störungen an den Anlagen auf.

Im Rahmen des Aufbaus des Versuchsstands CuLTka für JT-60SA war das Kryoinfrastrukturteam 2013 an den Aufgabenbereichen Lecksuche, Planung und Koordination der Feldverkabelung der Kryostaten sowie Programmierung der Prozessleittechnik beteiligt.



Abb. 9: Revision am He-Rückverdichter V40.



Laser Raman System in Aktion!

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

Karlsruher Tritium Neutrino Experiment KATRIN

Leitung: Dr. Beate Bornschein

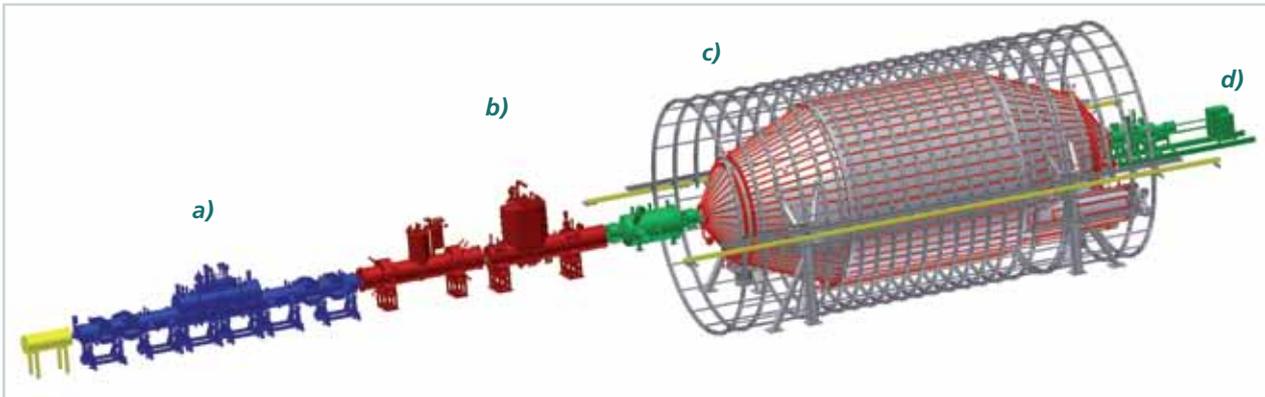


Abb. 1: Schematische Darstellung des internationalen Großexperiments KATRIN. Die bei β -Zerfällen in einer hochintensiven fensterlosen molekularen Tritiumquelle (WGTS, [a]) entstehenden Elektronen werden über eine Tritiumpumpstrecke mit den aktiven und passiven Elementen DPS2-F und CPS (b) zu einem System (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 Bedeutung 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 Betazerfall molekularen Tritiums nahe dem kinematischen Endpunkt von $18,6 \text{ keV}$ (maximal beim Betazerfall frei werdende Energie). 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 m lange Experimentiereinrichtung geführt. Ein System aus zwei elektrostatischen Retardierungsspektrometern erlaubt es, 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 Hochspan-

nung. 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 Kryotechnologie inne. Es stellt in diesem Bereich mehrere Teilprojektleiter („Taskleiter“). Die Arbeit des ITEP ist zu mehr als 95 Prozent im sogenannten Quell- und Transportsystem (siehe Abbildung 2) angesiedelt. Wegen der Handhabung großer Mengen an Tritium wird das System komplett im TLK aufgebaut.

Hauptbestandteil ist ein als WGTS (Windowless Gaseous Tritium Source) bezeichnetes supraleitendes Magnetsystem von 16 m Länge, das in seinem $\approx 30 \text{ K}$ kalten Strahlrohr die gasförmige Tritiumquelle beherbergt. Außerdem befinden sich auf der Strahlachse im rückwärtigen Teil das sogenannte Kalibrations- und Monitoringsystem (CMS) und im vorderen Teil – Richtung Spektrometer – das Transportsystem. Dieses dient dazu, die Tritiumzerfallelektronen ins Spektrometer zu leiten und gleichzeitig über Pumpen den Tritiumgasfluss ins Spektrometersystem um mehr als zwölf Größenordnungen zu reduzieren. Das geschieht einerseits mithilfe einer differentiellen Pumpstrecke (DPS) durch den Einsatz von Turbomolekularpumpen und andererseits – als letzte Stufe – mit einer kryogenen Pumpstrecke (CPS), die bei $3,5$ bis 4 K betrieben wird. Sowohl DPS als auch CPS stellen supraleitende Magnetkryostatsysteme von 7 bzw. 9 m Länge dar. Sie werden bei externen Firmen gefertigt und fertigungsbegleitend von Teams aus IKP, IEKP, ITEP und PMQ betreut.

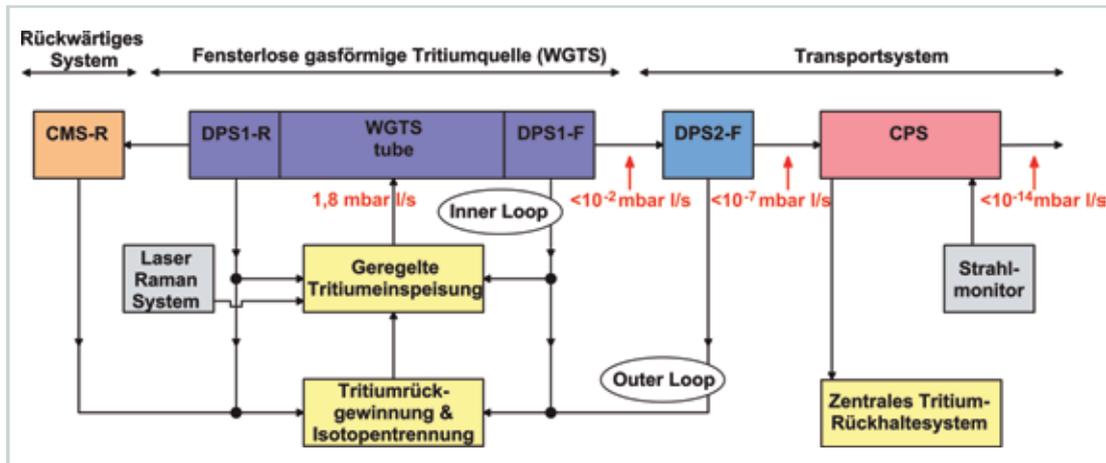


Abb. 2: Blockbild der KATRIN-Tritiumquelle und ihrer Schnittstellen zur Infrastruktur des TLK.

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 Prozent halten. Das gleichzeitige stabile Einspeisen und Abpumpen des Tritiumgases sorgt letztendlich für eine stationäre Gassäulendichte im Strahlrohr der WGTS (Tritiumquelle).

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

WGTS

In diesem Jahr wurde der WGTS-Demonstrator erfolgreich demontiert. Parallel dazu wurden fast sämtliche noch fehlende Baugruppen der WGTS fertiggestellt. Auch alle noch ausstehenden Magnettests wurden abgeschlossen, sodass der WGTS-Kryostat nun montiert werden kann. In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Research Instruments (Bergisch Gladbach) wurde ein detailliertes Montagekonzept entwickelt und eine Montagehalle vorbereitet. Die Montage der KATRIN-Quelle wird im Januar 2014 beginnen und zum Sommer 2015 abgeschlossen sein.

Die Vorbereitung der externen Supportsysteme, die das KIT beiträgt, besonders zu Kryoversorgung, Quenchedetektion und Magnetsicherheit, schreitet planmäßig voran. Alle Systeme werden Anfang 2015 einsatzbereit sein.

DPS2

Nach einem Defekt der Schutzdioden der DPS2-F im Jahr 2011 war eine wirtschaftliche Reparatur der Anlage nicht mehr möglich. Daher wurde 2012 ein modularer Neubau der DPS mit Einzelmagnetsystemen und



Abb. 3: Neues Konzept für die differenzielle Pumpstrecke von KATRIN. Zu sehen sind die fünf supra-leitenden Magnete sowie die fünf Pumpkammern.

einem am KIT entwickelten und zu fertigenden Strahlrohrsystem beschloss. Die Ausschreibung und Bestellung der Magnete erfolgte 2012. Im Frühjahr 2013 wurde der Auftrag um einen sechsten baugleichen Magneten für das Rückwärtige System erweitert. 2013 lagen die Schwerpunkte der Arbeit auf der Verfolgung der Fertigung der sechs bei der Firma Cryomagnetics Inc. in Oak Ridge (USA) bestellten Magnetmodule sowie auf der Konstruktion und Fertigung des Untergestells und des Strahlrohrsystems. Dabei wurde besonders auf die Weiterverwendbarkeit der bereits gefertigten Instrumentierung des Strahlrohrs geachtet (FTICR).

Untergestell und Strahlrohr werden aktuell bei TID-DGT-TEC (frühere Hauptwerkstatt) gefertigt und werden voraussichtlich Anfang 2014 fertiggestellt sein. Die ersten drei Magnetmodule – zwei sind bereits gebaut – werden im Januar 2014 angeliefert, die übrigen drei Module im April 2014. Nach den Abnahmetests am KIT erfolgt dann der Zusammenbau zur DPS2-F.

CPS

Die CPS (Abbildung 4) wird von der Firma ASG in Genua gefertigt. Aufseiten von KATRIN begleitet ein institutsübergreifendes Projektteam die Fertigung. Der Schwerpunkt der Qualitätssicherungsarbeiten im Jahr 2013 lag auf der Beaufsichtigung der Magnetmodifikation und der Kontrolle der einzelnen Fertigungsschritte mit Schweißinspektion und Lecktests. Dazu griff das KIT auch auf externes Personal zurück. Wichtige Meilensteine waren der erfolgreiche Kalttest der modifizierten Magnete nach dem Lecktest sowie der erfolgreiche

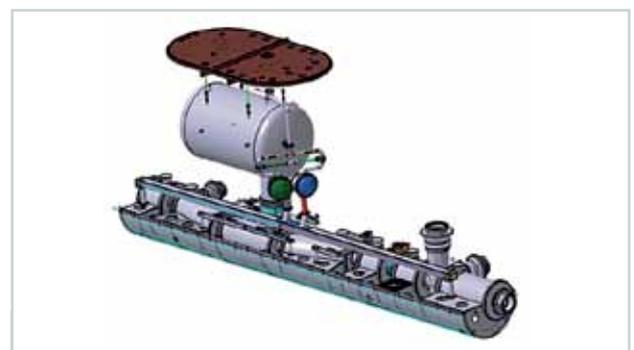


Abb. 4: Blick in das Innere der CPS. Zu sehen sind die einzelnen Strahlrohrabschnitte und der Heliumvorratsbehälter. Unterhalb des Behälters sollen nun die Schutzdioden montiert werden (grün, blau markiert).

Lecktest des Zusammenbaus aller Strahlrohre und Magnete. Parallel dazu wurden die modifizierten Schutzdiodenstapel für die supraleitenden Magnete in einem am ITEP aufgebauten Kryoteststand bei 4,2 K erfolgreich getestet. Die sieben Schaltschränke für den Kryobetrieb der CPS wurden geliefert und erfolgreich abgenommen.

Der Zusammenbau der CPS in Genua wird noch einige Monate dauern. Nach dem aktuellen Zeitplan soll die CPS im Oktober 2014 an das KIT geliefert werden.

Kälteanlage und Kryotransferleitung

Ein Arbeitsschwerpunkt im Jahr 2013 lag auf der Begleitung der Fertigung des dritten Teils der Kryotransferleitung und der dritten Ventilbox, die für die kryogene Anbindung der CPS notwendig ist. Inzwischen ist die Fertigung abgeschlossen; Lieferung und Montage sind erfolgt.

Tritiumkreisläufe

Die Tritiumkreisläufe von KATRIN werden im TLK entwickelt und aufgebaut, unter anderem auch im Rahmen von Bachelor-, Diplom- und Doktorarbeiten. 2013 konzentrierten sich die Arbeiten auf den Aufbau neuer Testexperimente und die Fortführung der Messungen mit TriToP (Tritium Test of Pumps). Das wichtige neue Testexperiment TriADE (Tritium Adsorption Desorption Experiment) wird in diesem Jahresbericht als Highlight vorgestellt.

In TriToP war 2012 eine magnetisch gelagerte Leybold MAG W2800 Turbomolekularpumpe (TMP) im Langzeitbetrieb erfolgreich mit einem integralen Tritiumdurchsatz von ≈ 1 kg getestet und anschließend zerlegt worden. 2013 wurde das Experiment umgebaut, um eine hybridgelagerte Pfeiffer HiPACE300 Turbomolekularpumpe zu testen. Dieser Pumpentyp soll an der WGTS und der DPS eingesetzt werden, um den für die MAG W2800 Pumpen benötigten Vordruck bereitzustellen.

Die Tritiumreinheit im KATRIN-Tritiumkreislauf soll mithilfe der Laser-Raman-Spektroskopie (LARA) kontinuierlich überwacht werden. 2013 fokussierten die Arbeiten wie im Jahr zuvor auf die Kalibrierung des Systems, die Untersuchungen von optischen Fenstern und Beschichtungen für KATRIN sowie die Weiterentwicklung der automatisierten Analyse der Raman-Spektren für KATRIN im Hinblick auf den späteren Langzeitbetrieb.



Abb. 5: Design der RearSection von KATRIN.

Für die optischen Fenster wurde eine optische Beschichtungsmethode identifiziert, die im Vergleich zu der bisher verwendeten Standardbeschichtung eine bessere Resistenz gegenüber Tritium und der in den Handschuhboxen inertisierten Atmosphäre verspricht. Dies soll 2014 verifiziert werden.

Weiterhin wurde ein alternativer Ansatz für einen LARA-Aufbau erfolgreich demonstriert: Anstatt, wie bisher bewährt, das bestehende Design der Messzelle zu verwenden, wurde untersucht, ob sich eine von innen verspiegelte Kapillare als Messzelle verwenden lässt. Dies bietet den Vorteil einer weitaus höheren Signalausbeute, da das effektiv genutzte Raman-Volumen sich stark erhöht. Ein entsprechender Testaufbau, CLARA (Capillary Raman System) genannt, ging erfolgreich in Betrieb; das Prinzip wurde mit Tritium demonstriert. Nach den vielversprechenden ersten Ergebnissen soll der Aufbau 2014 systematisch untersucht und verbessert werden.

Rear Section

Die Rear Section, auch CMS (Calibration and Monitoring System) genannt, soll die wichtige Aufgabe übernehmen, das Gesamtsystem KATRIN zu kalibrieren. Dazu ist in der Rear Section eine Elektronenkanone vorgesehen, die das KIT derzeit mit einem Kollaborationspartner an der University of California in Santa Barbara (UCSB), entwickelt. Der KIT-Beitrag an der Rear Section umfasst auch die Entwicklung und den Aufbau des Primärsystems (inklusive Strahlrohr) und der Zweiten Hüllen sowie die Integration in die Infrastruktursysteme des Tritiumlabors. Im Dezember 2013 genehmigte die KATRIN Kollaboration das dazu vorgeschlagene Design (Abbildung 5). Die Vorbereitungen zum Aufbau des Systems im Tritiumlabor laufen derzeit.

Parallel dazu werden sogenannte BIXS-Systeme (Beta Induced X-ray Spectrometry) in die Rear Section integriert. Die BIXS-Systeme dienen dazu, die Intensität der gasförmigen Quelle im WGTS-Kryostaten jederzeit präzise (0,1 Prozent in < 100 Sekunden) zu bestimmen. Dieser Parameter geht direkt in die spätere Analyse der KATRIN-Daten ein und beeinflusst damit die Genauigkeit der Bestimmung der Neutrinomasse. Darüber hinaus untersucht das KIT in Zusammenarbeit mit der Universität Mainz mögliche Kandidaten einer sogenannten KATRIN-Rear Wall. Die Rear Wall definiert das elektrische Potenzial der Tritiumquelle und besitzt damit größten Einfluss auf die Unsicherheiten der Neutrinomassenbestimmung. Darüber hinaus werden weitere Komponenten wie piezoelektrische Aktuatoren, Glasfasern und Glasfaserdurchführungen sowie Konzepte zur gezielten Beleuchtung von Oberflächen im Vakuumsystem mit UV-Licht auf ihre Tritiumkompatibilität sowie ihre Eignung zum Einsatz in der Rear Section untersucht.

Dank

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, Ingenieurinnen und Ingenieuren, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des ITEP, des Instituts für Kernphysik (IKP), des Instituts für experimentelle Kernphysik (IEKP), der Hauptwerkstatt (TID-DGTTEC) und der KIT Projektmanagementgruppe (PMQ). Dafür herzlichen Dank!

Highlight: Beta-induzierte Röntgenspektroskopie zur Bestimmung der Tritiumaktivität auf Oberflächen

Einleitung

Im Rahmen des KATRIN Experiments führen Forscher eine präzise Energieanalyse von Elektronen aus dem Betazerfall von Tritium durch, um daraus die Neutrino-masse mit einer Sensitivität von 200 meV/c² zu bestimmen. Dazu werden die Elektronen aus der Quelle durch starke Magnetfelder entlang des 70 m langen KATRIN-Aufbaus geführt. Die Energie der Elektronen wird mithilfe eines elektrostatischen Retardierungspotenzials bestimmt, das die Elektronen überwinden müssen, um anschließend im Detektor registriert zu werden.

Das Endpotenzial wird auf Spektrometerseite durch eine regelbare Hochspannung im Bereich von 18,6 kV bestimmt und muss im ppm-Bereich stabil sein. Das Startpotenzial der Elektronen in der Quelle wird unter anderem durch die Spannung an der Rear Wall (RW) definiert. Bei der RW handelt es sich um eine goldbeschichtete Scheibe, die den elektrischen Abschluss der Quelle in Richtung CMS (spektrometerabgewandte Seite) bildet. Durch ihre Materialeigenschaften beeinflusst die RW die KATRIN-Sensitivität maßgeblich.

Innerhalb der KATRIN-Quelle kann Tritium auf der Oberfläche der RW adsorbieren und die Materialeigenschaften, insbesondere die Austrittsarbeit, während der Messzeit von KATRIN ändern. Die Änderung der Austrittsarbeit wirkt sich direkt auf den Wert des Startpotenzials der Elektronen in der Quelle aus und hat damit Einfluss auf die Sensitivität von KATRIN. Die Änderung hängt von der Menge des adsorbierten Tritiums ab und ist druck-, zeit- und temperaturabhängig.

Das Experiment TriADE

Das Tritium Adsorption Desorption Experiment (TriADE) soll die Tritiumadsorption auf RW-Kandidaten unter KATRIN-nahen Bedingungen untersuchen. Zum Nachweis der adsorbierten Menge an Tritium auf dem Festkörper dient das sogenannte BIXS-Verfahren. Beta Induced X-ray Spectrometry (BIXS) nutzt die Röntgenstrahlung, die bei der Adsorption von Betaelektronen in Festkörpern oder Flüssigkeiten entsteht. Diese Röntgenstrahlung lässt sich für Materialanalysen oder zur Aktivitätsüberwachung einsetzen. Da Röntgenstrahlung sehr viel langreichweitiger ist als die Elektronen aus dem Betazerfall, lässt sich der Detektor außerhalb der Probenkammer platzieren; damit bleibt er unbeein-

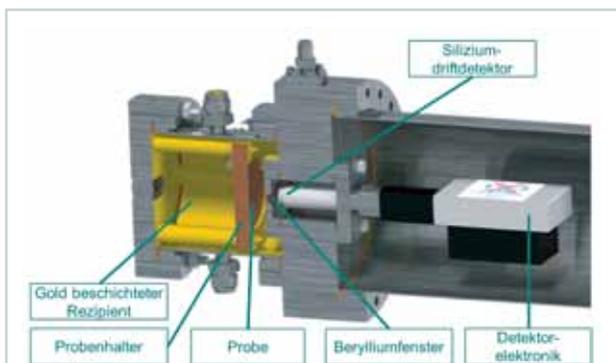


Abb. 6: CAD-Zeichnung der Kernkomponenten von TriADE.



Abb. 7: Berylliummaterialprobe für Messungen mit TriADE.

flusst von den Bedingungen in der Probenkammer. Ein Berylliumfenster schließt die Probenkammer vakuumtechnisch gegenüber dem Detektor ab. Es besitzt eine besonders hohe Transparenz für Röntgenstrahlung bei gleichzeitig geringer Leckrate gegenüber Tritium.

Zur Messung von RW-Kandidaten unter KATRIN-nahen Bedingungen müssen in TriADE Tritiumpartialdrücke von 10⁻⁵ mbar bis 10⁻³ mbar bei möglichst hoher Tritiumreinheit (>95 Prozent) erreicht werden. Untergrundeinflüsse durch Tritiumadsorption auf Probenhalter und Rezipient müssen weitestgehend reduziert werden. Die Probe muss innerhalb eines breiten Temperaturbereichs temperaturstabilisiert sein. Abbildung 6 zeigt die CAD-Zeichnung der TriADE Probenkammer und der Detektor-kammern. Ein Probenwechsel lässt sich durch Entfernen des rückwärtigen Flansches vornehmen. Als Proben lassen sich alle Materialien untersuchen, die als mechanisch stabile Scheiben mit einem Durchmesser von ca. 7 cm und Materialstärken zwischen 0,1 und 5 mm gefertigt werden können.

Die Temperaturstabilisierung der Probe in einem Bereich von -100 °C bis +200 °C auf ±2 °C geschieht über eine Kaltgasanlage bzw. eine Heizmanschette. Der Wärmetransport erfolgt über den Flansch, auf den der Probenhalter montiert ist. Der Probenhalter selbst ist zur besseren Wärmeleitung aus Kupfer gefertigt. Um das Prozessgas möglichst nicht zu verunreinigen und Untergrundquellen durch adsorbiertes Tritium zu reduzieren, sind der Rezipient (Abbildung 8), der Probenhalter und das Berylliumfenster vergoldet. Darüber hinaus ist das gesamte System bis 200 °C ausheizbar. Die KATRIN-RW wird bei Temperaturen von bis zu 150 °C ausgeheizt werden. Ein vierstufiges Pumpsystem, das aus Metallfaltbalgpumpe, Scrollpumpe und zwei hintereinandergeschalteten Turbomolekularpumpen besteht, ermöglicht Totaldrücke von ≤10⁻⁹ mbar.

Die Abstände von Probenhalter, Berylliumfenster und SDD sind so gewählt, dass lediglich Röntgenstrahlung von der Materialprobe und von der Oberfläche des

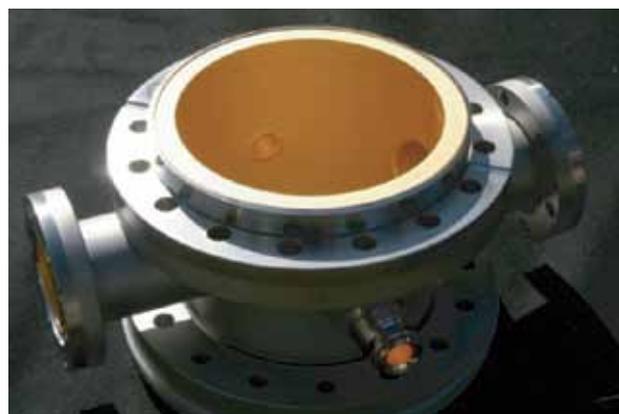


Abb. 8: Goldbeschichteter TriADE-Rezipient.

goldbeschichteten Berylliumfensters ohne Streuung den Detektor erreicht. Das Berylliumfenster dient dabei als Kollimator und beschränkt den Öffnungswinkel des Detektors auf den Durchmesser der Probe.

Als Detektor wird ein Siliziumdriftdetektor eingesetzt. Diese Detektoren bieten gegenüber herkömmlichen Halbleiterdetektoren den Vorteil einer großen aktiven Fläche von 25 bis 100 mm² bei gleichzeitig geringem intrinsischen Untergrund ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ 1/s) und hoher Energieauflösung (125 eV FWHM bei 5,9 keV). Dies macht den effizienten Nachweis niederenergetischer Röntgenstrahlung (<18,6 keV) erst möglich. Darüber hinaus benötigt diese Art von Detektor keine Kühlung mit LN₂, sondern wird stattdessen thermoelektrisch auf -55 °C gekühlt.

Ablauf einer Messung mit TriADE

Eine Messung mit TriADE läuft in mehreren Phasen ab: Nach dem Einsetzen einer Probe in TriADE wird der Rezipient über etwa zwei Wochen ausgeheizt. Anschließend wird die gewünschte Temperatur an der Probe eingestellt und mithilfe der Kaltgasanlage oder der Heizmanschette stabilisiert. Die Probe wird dann für eine voreingestellte Zeit einem Tritiumpartialdruck zwischen 10⁻⁵ und 10⁻¹ mbar ausgesetzt. Der Rezipient wird anschließend bis zu einem Druck < 10⁻⁹ mbar abgepumpt. Mit dem Röntgendetektor werden die Adsorptionsmessungen durchgeführt. Abbildung 9 zeigt ein dabei erzeugtes typisches BIXS-Spektrum.

Um die auf der Probenoberfläche adsorbierte Tritiummenge zu quantifizieren, wird die Gesamtzahl der Ereignisse im Spektrum aufaddiert und eine Zählrate bestimmt. Diese Zählrate wird mit der erwarteten Zählrate verglichen, die sich aus Monte-Carlo-Simulationen für eine bestimmte Menge Tritium auf der Probe ergibt. Die minimal nachweisbare Menge an Tritium auf der Probe wird dabei maßgeblich durch den intrinsischen Detektoruntergrund bestimmt. Simulationen mit Penelope 2009 haben gezeigt, dass damit Tritiumbedeckungen auf der Probe von weniger als einer Atomlage nach-

weisbar sind. Damit ist die KATRIN-Anforderung an die RW (Belegung weniger als eine Atomlage) messtechnisch erstmals überprüfbar. Dies konnte zuvor mit keiner anderen Anlage erreicht werden.

Nach einer erfolgten BIXS-Messung kann die Proben-temperatur erhöht werden; mit dem angeschlossenen Massenspektrometer lässt sich überprüfen, bei welchen Temperaturen das Tritium von der Probe desorbiert. Dies ermöglicht prinzipiell Rückschlüsse auf die Bindungsenergie. Alternativ lässt sich untersuchen, inwieweit mit Spülgasmischungen eine Dekontamination der Probe und somit möglicherweise auch der RW im späteren KATRIN-Aufbau möglich ist.

Erste Messungen erfolgen mit einer goldbeschichteten Berylliumprobe, da diese KATRIN-relevante Materialkombination von besonderem Interesse ist. In späteren Messungen lassen sich mit diesem Aufbau auch fusionsrelevante Materialien untersuchen, wie sie beispielsweise in den Breeder Blankets oder in der Tritiumverfahrenstechnik eingesetzt werden.

Status und Ausblick

Der TriADE Abzug (Abbildung 10) wurde 2012/2013 im Rahmen zweier Doktorarbeiten und einer Diplomarbeit aufgebaut. 2014 werden im Rahmen einer Masterarbeit die ersten wichtigen Tritiummessungen durchgeführt und ausgewertet. Mithilfe dieser Messungen wird es möglich sein, einen geeigneten RW-Kandidaten für KATRIN zu finden und die mit der Tritiumadsorption verbundene systematische Unsicherheit der KATRIN-Tritiumgasquelle zu quantifizieren.

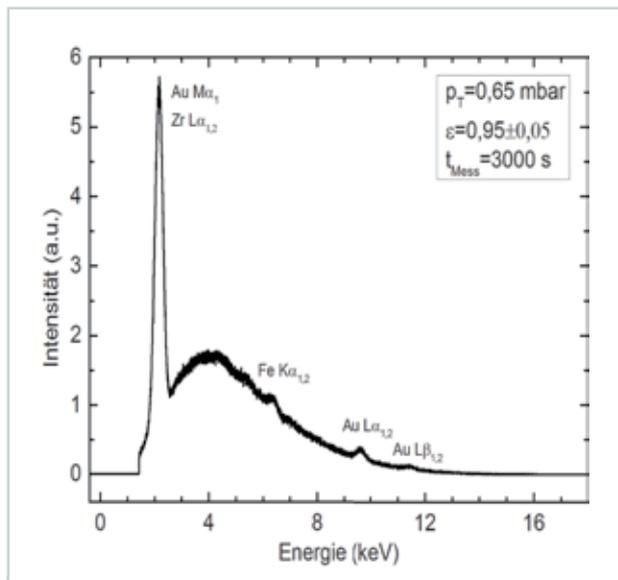


Abb. 9: Mit einem Siliziumdriftdetektor aufgenommenes BIXS-Spektrum einer gasförmigen Tritiumquelle. Ein kontinuierlicher Bremsstrahlungsanteil wird überlagert von materialspezifischen Fluoreszenzlinien.



Abb. 10: CAD des TriADE-Abzugs mit Pumpstand (blau markiert), Kernkomponenten (grün), Instrumentierung und Handventilen (braun), Massenspektrometer und zugehörigem Volumen (magenta) sowie Probenhalter (gelb).

Auszeichnungen und Preise

Das Jahr 2013 erwies sich für das ITEP als besonders ereignisreich und fruchtbar. So erhielten das Institut und seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter einige Auszeichnungen in verschiedenen Bereichen.

KIT-Innovationspreis NEULAND

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.



Professor Steffen Grohmann (links) nahm die Urkunde von KIT-Präsident Professor Eberhard Umbach entgegen.

AMS – Arbeitsschutz mit System

Vorreiter beim Arbeitsschutz: Das ITEP ist das erste wissenschaftliche Institut in Europa, dessen Arbeitsschutz-Managementssystem rezertifiziert wurde. Im April 2013 erhielt das ITEP das Zertifikat „AMS – Arbeitsschutz mit System“ von der gesetzlichen Unfallversicherung VBG und der Unfallkasse Baden-Württemberg (UKBW). Das Institut ließ sein Arbeitsschutz-Managementssystem nach nationalen und internationalen Standards prüfen und erfüllt alle berufsgenossenschaftlichen Arbeits-

schutzkriterien. Die Einführung des Arbeitsschutz-Managementsystems hatte das ITEP vor besondere Herausforderungen gestellt, vor allem bei der vollständigen Integration des Arbeitsschutzes in neue Technologien, für die es noch keinen allgemeingültigen Stand der Technik gibt.



Uwe Marx, Präventionsleiter der VBG-Bezirksverwaltung Ludwigsburg, und Wolfgang Kurz, Leiter Prävention der UKBW, überreichen das Zertifikat an Institutsleiter Professor Mathias Noe (von links). Rechts im Bild die KIT-Vizepräsidentin Personal und Recht, Dr. Elke Luise Barnstedt. (Foto: KIT)

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 Campus Nord (Bau 410) wurde vom Architekturbüro Beh-



Vorderansicht und Blick in den Innenhof des ITEP-Gebäudes.



nisch 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.

Ideenwettbewerb EnergieCampus

Ausgezeichneter Forschernachwuchs: Florian Erb vom KIT hat für eine Arbeit zum Thema „Supraleitende Gleichstromgeneratoren für kompakte und effiziente Windkraftanlagen“ den zweiten Platz im Ideenwettbewerb „EnergieCampus 2013“ erreicht. Mit dem 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 sowie die Qualität der Darstellung. Bei einem Symposium im November 2013 an der Universität Ulm wurden die Preise überreicht.



Florian Erb vom ITEP des KIT errang den zweiten Preis im Ideenwettbewerb EnergieCampus. Der erste Preis ging an Kathrin Menberg vom Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) des KIT.

Studienpreis des DKV

Preis für Diplomarbeit: Für ihre am ITEP angefertigte Diplomarbeit hat Carolin Heidt im November 2013 den DKV-Studienpreis erhalten. Mit der Auszeichnung würdigt der Deutsche Kälte- und Klimatechnische Verein – DKV hervorragende Studien- und Diplomarbeiten zu Themen aus seinen Arbeitsgebieten. Carolin Heidt befasste sich in ihrer Diplomarbeit mit „Untersuchungen zur Sicherheit von Flüssighelium-Druckbehältern“.



Carolin Heidt bei der Preisverleihung mit dem Betreuer ihrer Diplomarbeit, Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann (2. von links), sowie Dr.-Ing. Josef Osthues (links, Vorsitzender des DKV) und Prof. Dr.-Ing. Ullrich Hesse (rechts, stellv. Vorsitzender des DKV).

Lehre und Bildung

Vorlesungen, Seminare, Workshops und Sommerschulen

Vorlesungen

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Supraleitende Systeme für Ingenieure (Noe, Neumann, Siegel) WS 12/13-13/14

Supraleitertechnologie (Noe) SS 13

Superconducting Materials for Energy Applications (Grilli, Noe) SS 13

Seminar Project management for engineers (Noe, Day, Grohmann) SS 13

KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

Vakuumtechnik I (Day, Varoutis) WS 12/13-13/14

Kryotechnik (Neumann) WS 12/13-13/14

Kältetechnik A (Grohmann) WS 12/13-13/14

Kältetechnik B (Grohmann) SS 13

KIT-Fakultät Maschinenbau

Fusionstechnologie A* (Bornschein, Day, Fietz, Weiss) WS 12/13-13/14

Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren (Fietz, Weiss) SS 13

Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf (Bornschein, Day, Demange) SS 13

KIT-Fakultät Physik

Messmethoden und Techniken in der Experimentalphysik (Bornschein) SS 13

Hauptseminar Astroteilchenphysik: Neutrinos und dunkle Materie (Bornschein) WS 12/13-13/14 und SS 13

Leibniz Universität Hannover – Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Neue Komponenten der elektrischen Energieversorgung* (Noe) SS 13

House of Competence

Blockseminar (4 Tage) Wissenschaftliches Schreiben und Präsentieren für Physiker (Bornschein) WS 12/13 und SS 13

Blockseminar (4 Tage) „Erstellen wissenschaftlicher Publikationen in der Physik“ (Bornschein, Schlösser, Fischer) WS 12/13

Mikromodul Physik/Geophysik (HoC in Kooperation mit Physikpraktikum) (Bornschein) WS 12/13-13/14

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau

Konstruktionslehre (Bauer) WS 12/13

Arbeitssicherheit und Umweltschutz (Bauer) SS 13

Thermodynamik 1 für Maschinenbauer (Neumann) WS 12/13-13/14

Thermodynamik 2 für Maschinenbauer (Neumann) SS 13

Seminare / Sommerschulen / Workshops

4th ITEP Young Scientists Seminar

14.–17. Januar 2013, Kristberg, Österreich

VDI-Seminar Kryotechnik

27. Februar – 01. März 2013, Karlsruhe

CIGRE Working Group Meeting D1.38*

23.–27. April 2013, Peking, China

7. Karlsruhe-Dresden Doktorandenseminar zur Supraleitung*

19.–20. Juni 2013, Colditz

3rd KIT Fusion PhD Student Seminar*

19.–20. Juni 2013, St. Martin

7th ESAS Summer School on Materials and Applications on Superconductivity

29. Juli – 2. August 2013, Karlsruhe

7th International Summer School on Fusion Technologies*

2.–13. September 2013, Karlsruhe

CIGRE Working Group Meeting D1.38*

18. September 2013, Genua, Italien

VDI Seminar Cryogenics

9.–11. Oktober 2013, Karlsruhe

Haus der Technik Seminar Kryostatbau

16.–18. Oktober 2013, Karlsruhe

KSETA Doktorandenworkshop 2013*

16.–18. Oktober, Freudenstadt

* Organisation mit ITEP Beteiligung

Lehre und Bildung

Doktorarbeiten – Master- und Diplomarbeiten – Bachelor- und Studienarbeiten

Doktorarbeiten 2013 (* abgeschlossen)

Martin Babutzka (TLK)

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

Christian Barth* (FUSION)

High temperature superconductor cable concepts for fusion magnets

Wesley 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

Sebastian Fischer (TLK)

Laser Raman Spectroscopy for the KATRIN Experiment

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

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

Philipp Krüger (SUPRA)

AC Loss characterization of HTS devices for power applications

Robert Michling (TLK)

Performances Assessment of Water Detritiation Process

Oliver Näckel (SUPRA)

Untersuchungen strombegrenzender Spulen

Florian Priester* (TLK)

Tritiumtechnologie für die fensterlose WGTS von KATRIN

Enrico Rizzo* (FUSION)

Thermal-fluid dynamic and electrical optimization of high temperature superconductor current leads for fusion magnet systems

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

Magnus Schlösser* (TLK)

Accurate calibration of the Raman system for the Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment

Betreute Master-/Diplomarbeiten 2013 (* abgeschlossen)

Alexander Beck*

Entwicklung und Test einer Analysesoftware für das Tritium-Absorptions-Infrarot (TApIR)-Experiment zur Untersuchung der IR-Absorption in flüssigen Wasserstoffisotopen.

Miroslav Dimov

Untersuchungen zur Entwicklung eines Prototyp-Sensors für ein neues thermisches Messverfahren zur Durchflussmessung

Daniel Fischer*

Gasabgabeeffekte beim Abpumpen von Fusionsreaktoren

Amit Grover*

Development, construction and test of a flexible support structure for multi-layer insulation in a flexible cryogenic transfer line

Enno Heits

Supraleitende Miniaturbahn

Yannick Ille*

Untersuchung eines Versuchsstandes zur Charakterisierung von superpermeablen Metallfolien mittels Wasserstoffplasma

Daniel Kraft*

Auslegung eines Rekuperators/Regenerators für LH₂-Speicherung

Sebastian Mirz

Untersuchung des Ir-Absorptionsverhaltens flüssiger Wasserstoffisotope von der Weglänge und der Ortho-Parabesetzung

Simon Niemes*

Messung des Bremsstrahlungsspektrums von tritiiertem Wasser mit einem Siliziumdriftdetektor am Tritiumlabor Karlsruhe

Simon Otten

Transverse pressure of IC in coated Conductor Roebel Cables

Manuel Pitsch

Auswertung von Netzzustandsdaten – Chancen und Optimierungspotentiale

Clio Saglietti*

Experimental and computational study of vacuum gas flows through short tubes and bellows

Vera Schäfer*

Charakterisierung des „Coating Test Experiments“ zur Verbesserung der Langzeitstabilität und der Reproduzierbarkeit

Fabian Schneck*

Untersuchung des Adsorptionsverhaltens von Tritium an Oberflächen und Implikationen für KATRIN

Hendrik Seitz

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

Rodrigue Tchoumbe*

Berechnung und Untersuchung notwendiger Modifikationen für den Einsatz von Quecksilberring-Vakuumpumpen in der Fusion

Betreute Bachelorarbeiten 2013 (* abgeschlossen)

Tim Brunst*

Durchführung von Messungen mit einem Lumineszenzstandard zur Kalibrierung des Laser-Raman-Systems für KATRIN

Julia Dusold*

Charakterisierung der Amptek X-123 Si-PIN Diode und Identifizierung von Mineralien mithilfe des Amptek Mini-X Röntgensystems

Max Görtz*

Messung von Quench und Rückkühlzeiten verschiedener Supraleiteranordnungen in flüssigem Stickstoff

Felix Heil

Aufbau und Inbetriebnahme der Magnetversorgung eines supraleitenden Energiespeichers

Roxana Helm

Simulation von Generatoren für Windkraftanlagen

Yannik Hörstensmeyer

Simulation von Quecksilberdampfströmungen durch das Düsensystem von Diffusionsvakuumpumpen

Patrick Kabrhel

Experimentelle Untersuchungen des transienten Übergangs an Bandleiter in flüssigem Stickstoff

Thomas Karcher

Entwicklung eines Pumpenventils für eine tritiumkompatible Vakuumpumpe

Milena Kesenheimer (IKET)

Untersuchungen zur Kavitation in einem passiven Rückstrombegrenzer

Dustin Kottonau*

Wirtschaftlicher Vergleich von konventionellen und neuartigen Energieübertragungssystemen auf unterschiedlicher Spannungsebene

Alexander Kraus*

Modellierung und Messung von IR-Absorptionsspektren flüssiger Wasserstoffisotope

Michael Mai*

Berechnung einer kalten Gasreinigungskolonnen zur Aufreinigung des Abgases von Quecksilberringpumpen

Manuel Mungenast*

Aufbau, Programmierung und Visualisierung einer Temperaturregelung mit einer Steuerung Simatic S7-1200 und einem Touch-Panel

Pakari Oskari

Untersuchung von Beta induzierter Atom Emission

Kevin-Davis Richler

Aufbau, Inbetriebnahme und erste Testmessungen mit einem Ortho/Para-Konverter für flüssige Wasserstoffisotope

Sebastian Senft

Untersuchung von Glasfasern auf ihre Tauglichkeit in einer Tritiumumgebung

Sebastian Wozniewski

Relative Kalibrierung der IR Absorptionsspektren gegen H₂, HD und D₂ Konzentration

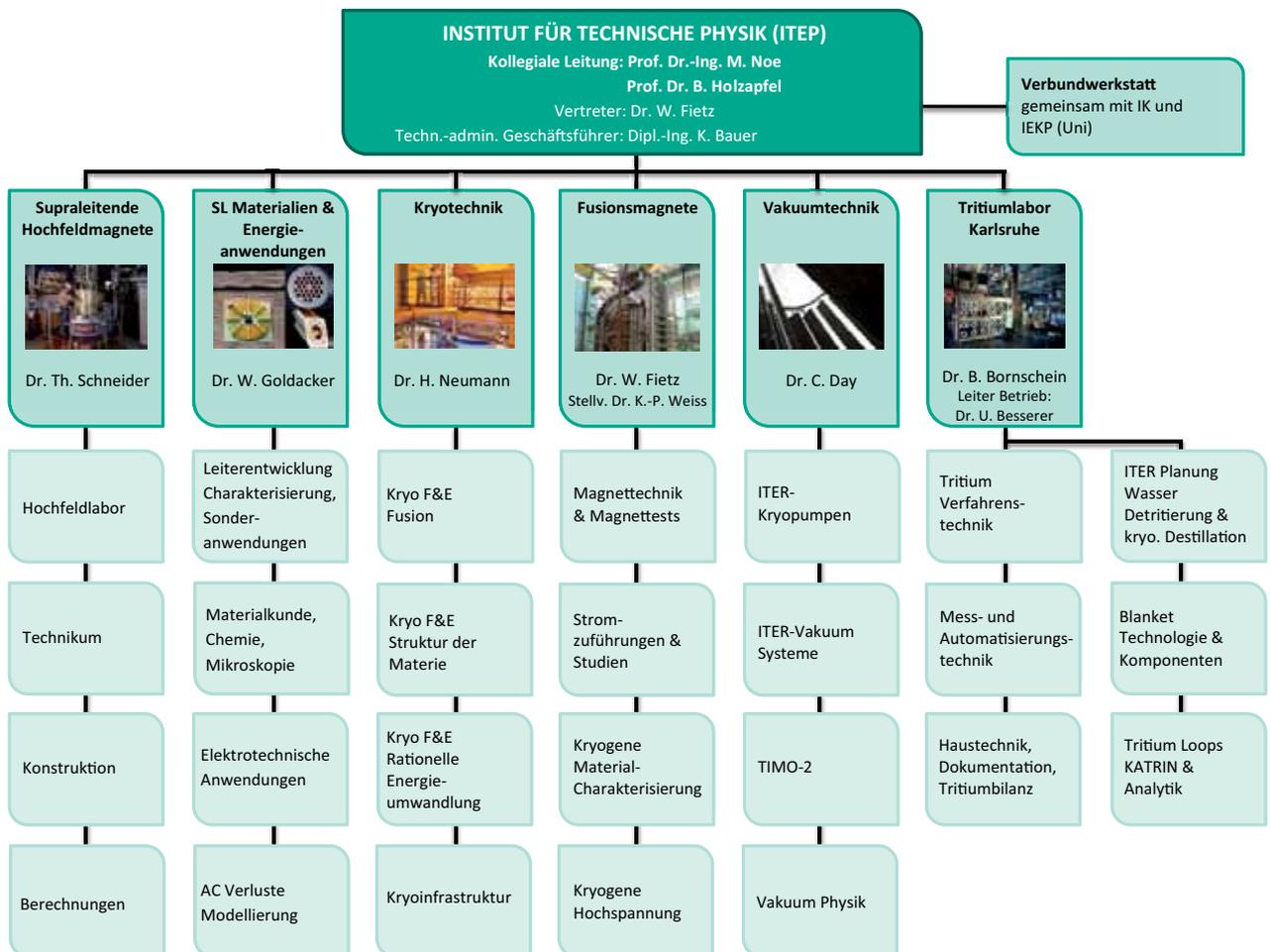
Lehre und Bildung

ITEP Kolloquien

24.01.2013	Cryogenic Properties Assessment at CCMAS Dr. Chuan-Jun Huang Chinese Academy of Sciences; FUSION	01.10.2013	Experimental and computational study of vacuum gas flows through short tubes and bellows Clio Saglietti; VAKUUM
26.03.2013	Potenzial interdisziplinärer Forschung Neuromarketing, oder: was verbindet Supraleitung mit einem „guten?“ Glas Wein Dr. Goldacker; SUPRA	08.10.2013	Kryoventilpräsentation Fa. Stöhr; KRYO
23.04.2013	Fördermöglichkeiten der DFG Stabsstelle FOR; Administration	12.11.2013	Auslegung eines Rekuperators/ Regenerators für LH2-Speicherung Daniel Kraft; KRYO
29.04.2013	Auxiliary Cryogenic systems for SST-1 and Recent developments Naresh Gupta; Institute for Plasma Research (India); KRYO	19.11.2013	Gasabgabeeffekte beim Abpumpen von Fusionsreaktoren; Untersuchung eines Versuchsstandes zur Charakterisierung von superpermeablen Metallfolien mittels Wasserstoffplasma Daniel Fischer, Yannik Ille; VAKUUM
30.04.2013	High-Power Stirling-Type Pulse Tube Cryocooler for Operation near 80 K Jiuce Sun Zhejiang; University Hangzhou, China; KRYO	26.11.2013	Aufbau und Inbetriebnahme der Magnetstromversorgung eines supraleitenden Energiespeichers Felix Heil; HFM
14.05.2013	Untersuchungen zur Sicherheit von Flüssig-Helium-Druckbehältern Carolin Heidt; KRYO	03.12.2013	Angle-Dependent U(I) HTS Measurements Pauline Leys; HFM
04.06.2013	LIQHYSMES – ein multifunktionales Hybrid Energiespeicher-Konzept Michael Sander; KRYO	11.12.2013	Optimization of High Temperature Superconductor current leads for nuclear fusion applications Enrico Rizzo; FUSION
18.06.2013	Messung des Bremsstrahlungsspektrums von tritiiertem Wasser zur Konzentrationsbestimmung mit einem Siliziumdrift-detektor Simon Niemes; TLK		
02.07.2013	Berechnung eines mehrstufigen Gaskühlers zur Aufreinigung des Abgases von Quecksilberringpumpen Michael Mai; VAKUUM		
24.07.2013	Hochtemperatur-Supraleiter-Kabelkonzepte für Fusionsmagnete Christian Barth; FUSION		
17.09.2013	ITEP Guide – eine Orientierungshilfe für neue Mitarbeiter/innen Röhnisch/Meinzer; Administration		
24.09.2013	Simulation von Quecksilberdampfströmungen durch das Düsensystem von Diffusionsvakuumpumpen Yannick Hörstensmeyer; VAKUUM		

Zahlen und Daten

Organigramm ITEP (Januar 2013)



Personalstand (30.11.2013)

Gesamt	200	Auszubildende	2
Akademiker	54	Trainees	4
Ingenieure und Techniker	63	zusätzlich, während 2013:	
Sonstige	28	Gäste	13
Doktoranden	23	Praktikanten	14
Diplomanden/Master	16	Studentische Hilfskräfte	23
DH-Studenten	10	Studien-, Bachelorarbeiten	20

Zahlen und Daten

Personalveränderungen

Neu eingestellt (ohne Praktikanten, Gäste und studentische Hilfskräfte)

Melanie Bacher

Wescley Batista de Sousa

Axel Bönisch

Flavio Brighenti

Tim Brunst

Andras Bükki-Deme

Daniel Fischer

Marius Frank

Eric Freynhagen

Max Görtz

Felix Heil

Carolin Heidt

Enno Heits

Marvyn Hellmann

Roxana Helm

Bernhard Holzapfel

Yannick Hörstensmeyer

Yannik Ille

Patrick Kabrhel

Thomas Karcher

Dustin Kottonau

Michael Korevaar

Daniel Kraft

Michael Mai

Simon Otten

Oskari Pakari

Kevin-Davis Richler

Hendrik Seitz

Jiuce Sun

Thorben Wahl

Sebastian Wozniewski

Hong Wu

Ausgeschieden (ohne Praktikanten, Gäste und studentische Hilfskräfte)

Catalin-Gabriel Alecu

Martin Babutzka

Christian Barth

Sabrina Gerl

Manfred Jung

Benedikt Kuffner

André Opitz

Rolf Simon

Rodrigue Tchoumbe

Michal Vojenciak

Robert Wagner

Zahlen und Daten

Trainee / Studentische Hilfskräfte

Trainee 2013 (* abgeschlossen)

Katharina Battes

Thomas Giegerich*

Benedikt Kuffner

Xavier Lefebvre

Ochoa Guaman Santiago

Michael Schrank

Studentische Hilfskräfte in 2013

Daniel Barth

Alexander Beck

Sebastian Della Bona

Sylvia Ebenhöch

Felix Heil

Florian Kassel

Manuel Klein

Kyriaki Koutrouveli

Alexander Kraus

Simon Kudella

Sebastian Mirz

Simon Niemes

Sashank Pappu

Manuel Pitsch

Clio Saglietti

Matthias Schaufelberger

Vera Schäfer

Florian Schleißinger

Fabian Schneck

David Schneider

Pia Schulz

Jasmin Seeger

Sascha Singer

Zahlen und Daten

Gastwissenschaftler

Gastwissenschaftler

Jérôme André

21.10.–31.12.13 Gast aus Traineeprogramm
GOTP-GIRO, Saclay, Frankreich

Dr. Gheorghe Bulubasa

01.07.–31.07.13 National Institute of R&D for
Cryogenic and Isotopic Technologies,
Valcea, Rumänien

Dr. Jiwen Cen

23.09.–15.03.14 Guangzhou Institute of Energy
Conversion, Chinese Academy of
Sciences, Peking, China

Dr. Chuanjun Huang

22.01.–25.01.13 Chinese Academy of Science,
Peking, China

Dr. Rongjin Huang

22.01.–25.01.13 Chinese Academy of Science,
Peking, China

Dr. Timothy James

21.04.–09.05.13 Universität Swansea,
Wales, Großbritannien

Prof. Kenzo Munakata

28.10.–31.10.13 Faculty of Engineering and Resource
Science, Akita University, Japan

Alina Niculescu

17.07.–26.07.13 National Institute of R&D for
Cryogenic and Isotopic Technologies,
Valcea, Rumänien

Dr. Yoshinori Ono

07.10.–31.03.14 National Institute for Materials
Science, Tsukuba, Japan

Catalin Petrutiu

13.05.–07.06.13 National Institute of R & D for
Cryogenic and Isotopic Technologies,
Valcea, Rumänien

18.11.–06.12.13 National Institute of R & D for
Cryogenic and Isotopic Technologies,
Valcea, Rumänien

Alexandre Serrand

18.11.–13.12.13 Gast aus Traineeprogramm
GOTP-GIRO, Saclay, Frankreich

Prof. Dr. Helmut Telle

22.04.–26.04.13 Universität Swansea,
Wales, Großbritannien

Zahlen und Daten

Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

Kai Bauer

- Mitglied der Helmholtz Akademie für Führungsnachwuchskräfte
- Mitglied im Helmholtz Arbeitskreis „Arbeitssicherheit und Umweltschutz“
- Mitglied der Kommission für Lehrkultur der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe
- Mitglied des Prüfungsausschusses der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe in den Fachbereichen Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen

Beate Bornschein

- Mitglied im „International Steering Committee“ der „International conference on Tritium Science and Technology“
- Mitglied im „Executive Committee of IEA Nuclear Technology for Fusion Reactors Network Co-ordinator for EU network trainee programme 'TRI-TOFFY'“
- Mitglied im KATRIN Executive Committee
- Mitglied im KATRIN Collaboration Board
- Koordinator Quelle und Transportsystem von KATRIN
- Mitglied in der Wissenschaftlich-Technischen Versammlung von KCETA
- Mitglied im KSETA Vorstand (KHYS-Lenkungsgremium)
- Stellvertretendes Mitglied im CRYIS (Council for Research and Promotion of Young Scientists) des KIT
- Mitglied im Publication Committee der KATRIN Kollaboration

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, EFDA (GOT).
- 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 (ISFNT).
- 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
- Mitglied im KIT Senat

Francesco Grilli

- Board member International HTS Modelling working group: <http://www.htsmodelling.com>
- International advisory board member of the 4th 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 Conference)
- Mitglied der Kommission Elektrotechnik, Elektronik- und Informationstechnik im DIJN und VDE, 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
- Program Board Member EUCAS-2013, Genova
- Member Executive Board of Eucard-II (EU-Projekt)
- Mitglied und KIT-Vertreter Windenergie-Netzwerk e.V. Rostock

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

Volker Hauer

- Ko-ordinator des Arbeitsbereiches 'Fuel Cycle Modelling' des Europäischen Programms Physik in der Kernfusion
- Organisator eines Research Excellence Grants im Europäischen Metrologieprogramm (EMRP-IND-12-REG3)

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), Secretary
- 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
- Superconductivity for Energy Conference, Member of International Advisory Committee
- Superconductor Science and Technology, Member of Advisory Board

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
- Smart Grid Plattform Baden-Württemberg, Teilnehmer
- Industrieverband Supraleitung, Gastmitglied
- Helmholtz Programm Rationelle Energieumwandlung und -nutzung, Topicsprecher Supraleitung
- Verwaltungsrat der Heinrich-Hertz-Gesellschaft, Mitglied

Rajanikumar, Ramalingam

- Advisory Committee, 2nd 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
- Mitgliedschaft der Berufungskommission 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

Veröffentlichungen

Programm „Kernfusion“ (* Thomson Reuters referiert)

Bagrets, N.; Barth, C.; Weiss, K.-P.

Low temperature thermal and thermo-mechanical properties of soft solders for superconducting applications. International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013

Bagrets, N.; Fischer, E.; Sugita, K.; Walter, W.; Weiss, K.-P. Mechanical properties of carbon wires at low temperatures.

Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC), Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013

Bagrets, N.; Bayer, C.; Weiss, K.-P.

Thermal and thermo-mechanical properties of soft solders for superconducting applications. 7th Mechanical and Electromagnetic Effects in Superconductors Workshop (MEM 2013), Aix-en-Provence, France, March 12–14, 2013

* Bagrets, N.; Goldacker, W.; Jung, A.; Weiss, K.P.

Thermal properties of REBCO copper stabilized superconducting tapes.

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 6600303/1–3

DOI:10.1109/TASC.2012.2233268

* Barth, C.; Bagrets, N.; Weiss, K.-P.; Bayer, C.M.; Bast, T. Degradation free epoxy impregnation of REBCO coils and cables.

Superconductor Science and Technology, 26(2013) S. 055007/1–10

DOI:10.1088/0953-2048/26/5/055007

* Barth, C.; Weiss, K.-P.; Vojenciak, M.; Schlachter, S.

Electro-mechanical analysis of Roebel cables with different geometries.

Superconductor Science and Technology, 25(2013) S. 025007/1–9

DOI:10.1088/0953-2048/25/2/025007

Battes, K.; Hauer, V.

Influence of the pre-treatment on outgassing.

Frühjahrstagung DPG, Sektion Kondensierte Materie, Fachverband Vakuumphysik und Vakuumtechnik, Regensburg, 10.–15. März 2013

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), VA 3.1

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

Review and measurement of outgassing rates of stainless steel and polymers.

19th Internat. Vacuum Congress (IVC–19), Paris, F, September 9–13, 2013

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

Tokamak exhaust gas composition measurement via different mass spectrometers.

11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT 2013),

Barcelona, E, September 16–20, 2013

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

FBI – Measurement facility for high temperature superconducting cable designs.

International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013

Bayer, C.; Bagrets, N.; Barth, C.; Goldacker, W.; Weiss, K.-P.

Low resistive soldering joints for HTS tapes.

7th Mechanical and Electromagnetic Effects in Superconductors Workshop (MEM 2013), Aix-en-Provence, France, March 12–14, 2013

Beck, A.; Grössle, R.

First calibration of TApIR (tritium absorption IR-spectroscopy).

Frühjahrstagung DPG, Sektion AMOP, Fachverband Molekülphysik, Hannover, 18.–22. März 2013

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), MO 11.5

Beck, A.; Grössle, R.

First measurements with TApIR (tritium absorption IR-spectroscopy).

Frühjahrstagung DPG, Sektion AMOP, Fachverband Molekülphysik, Hannover, 18.–22. März 2013

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), MO 11.6

Bekris, N.

Surface analysis techniques for the study of plasma wall interactions.

3rd EIROforum School of Instrumentation (ESI 2013), Geneva, CH, May 27–31, 2013

Borisevich, O.; Demange, D.; Kind, M.

Zeolite membrane cascade for tritium extraction and recovery systems.

10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),

Nice, F, October 21–25, 2013

* Bornschein, B.; Day, Chr.; Demange, D.; Pinna, T.

Tritium management and safety issues in ITER and DEMO breeding blankets.

Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 466–471

DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.03.032

Commin, L.; Antusch, S.; Baumgärtner, S.; Goldacker, W.; Lukits, P.; Rieth, M.; Bolich, D.; Hoffmann, M.

Assessment of copper based materials for the water-cooled divertor concept of the DEMO European fusion reactor.

25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2013), San Francisco, Calif., June 10–14, 2013

Commin, L.; Antusch, S.; Baumgärtner, S.; Goldacker, W.; Lukits, P.; Rieth, M.; Bolich, D.; Hoffmann, M.

Assessment of copper based materials for the water-cooled divertor concept of the DEMO European fusion reactor.

Proceedings of the 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2013), San Francisco, Calif., June 10–14, 2013 Piscataway, N.J.: IEEE, 2013 ThPO-15

ISBN 978-1-4799-0171-5

DOI:10.1109/SOFE.2013.6635275

Day, C.; Haas, H.; Hanke, S.; Hauer, V.; Luo, X.; Scannapiego, M.; Varoutis, S.

20 years experience in designing and testing customized cryopumps – A review.

Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC),

Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013

Day, C.

20 years of customized cryopumps in fusion research.

24th National Symposium on Cryogenics (NSC 2013), Ahmedabad, IND, January 21–24, 2013

Day, C.

A two-lecture short course on cryopumps.

24th National Symposium on Cryogenics (NSC 2013), Ahmedabad, IND, January 21–24, 2013

Day, C.; Giegerich, Th.

Exhaust pumping of DT fusion devices – Current state-of-the-art and a potential roadmap to a power plant.

25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2013), San Francisco, Calif., June 10–14, 2013

Day, C.

ITER – Der Weg zu einem Fusionskraftwerk.

Bad Honnefer Industriegespräche,

Bad Honnef, 17. Juli 2013

Day, C.

Kryovakuumtechnik und Kryopumpen.

Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen,

Anwendungen ; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 27. Februar – 1. März 2013

Day, C.; Giegerich, T.

Non-cryogenic pumps for DEMO. (eingeladen)

21st Congress 'Materials, Interfaces, Processes: New Challenges for Future

Applications', Catania, I, May 15–17, 2013

* Day, C.; Giegerich, T.

The direct internal recycling concept to simplify the fuel cycle of a fusion power plant.

Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 616–620

DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.05.026

Day, C.; Hauer, V.; Igitkhanov, J.; Kalupin, D.; Valovic, M.; Varoutis, S.

Towards a physics-integrated view of the fusion fuel cycle.

11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT 2013),

Barcelona, E, September 16–20, 2013

Day, Chr.

Kryotechnik und Kryopumpen.

Jousten, K. [Hrsg.]

Wutz Handbuch Vakuumtechnik

Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013 S. 523–577

ISBN 978-3-8348-1745-7

Demange, D.; Fanghänel, E.; Fischer, S.; Le, T.L.; Priester, F.; Röllig, M.; Schlösser, M.; Simon, K.H.

CAPER as central and crucial facility to support R&D with tritium at TLK.

10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),

Nice, F, October 21–25, 2013

Demange, D.; Fanghänel, E.; Gramlich, N.; Le, T.L.; Moosmann, H.; Simon, K.H.; Wagner, R.; Welte, S.

Integration of a micro-channel catalytic reactor in CAPER to study highly

tritiated water handling and processing.

10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),

Nice, F, October 21–25, 2013

* Demange, D.; Borisevich, O.; Gramlich, N.; Wagner, R.; Welte, S.

Zeolite membranes and palladium membrane reactor for tritium extraction from the breeder blankets of ITER and DEMO.

Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 2396–2399

DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.05.102

* Dremel, M.; Pearce, R.; Strobel, H.; Hauer, V.; Day, C.; Wikus, P.; Papastergiou, S.

The new build to print design of the ITER torus cryopump.

Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 760–763

DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.02.026

* Drotziger, S.; Buscher, K.-P.; Fietz, W.H.; Heiduk, M.; Heller, R.; Hollik, M.; Lange, C.; Lietzow, R.; Moennich, T.; Richter, T.; Rummel, T.

Overview of results from Wendelstein 7-X HTS current lead testing.

Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1585–1588

DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.01.104

* Fietz, W. H.; Fink, S.; Kraft, G.; Scheller, H.; Weiss, E.; Zwecker, V.

High voltage testing of ITER prototype axial breaks.

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 4200604/1–4

DOI:10.1109/TASC.2012.2234177

Fietz, W.H.; Fink, S.; Fuhrmann, U.; Müller, R.; Urbach, E.; Zwecker, V.; Brummer, A.; Oberstarr, R.; Wildner, C.; Wimmer, F.; Woelfl, K.

Mass production of the superconducting magnet system for the JT-60SA.

International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013

- * Fietz, W. H.; Barth, C.; Drotziger, S.; Goldacker, W.; Heller, R.; Schlachter, S. I.; Weiss, K. P.
Prospects of high temperature superconductors for fusion magnets and power applications.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 440–445
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.03.059
- * Fink, S.; Fietz, W.H.; Kraft, G.; Scheller, H.; Urbach, E.; Zwecker, V.
Paschen testing of ITER prototype cryogenic axial breaks.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1475–1477
DOI:10.1016/j.fusengdes.2012.11.028
- Fischer, S.; Schönung, K.; Rolli, R.; Schäfer, V.; Sturm, M.
Investigation of durability of optical coatings in high purity tritium gas.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- Gade, P. V.; Bayer, C.; Franza, F.; Heller, R.; Weiss, K.-P.
Conceptual design of a toroidal field coil for a fusion power plant using high temperature superconductors.
23rd International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013
- Giegerich, T.; Day, C.
A metal foil vacuum pump for the fuel cycle of fusion power plants.
Frühjahrstagung DPG, Sektion Kondensierte Materie, Fachverband Vakuumphysik und Vakuumtechnik, Regensburg, 10.–15. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), VA 1.2
- * Giegerich, T.; Day, C.
Conceptuation of a continuously working vacuum pump train for fusion power plants.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 2206–2209
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.05.019
- Giegerich, T.; Day, C.
The KALPUTREX-Process – A new vacuum pumping process for exhaust gases in fusion power plants.
11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT 2013),
Barcelona, E, September 16–20, 2013
- Giegerich, T.; Day, C.
The THESEUS facility – A test environment for the torus exhaust vacuum pumping system of a fusion power plant.
25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2013), San Francisco, Calif., June 10–14, 2013
- Giegerich, T.; Day, C.
Theoretical and experimental investigation of metal foil vacuum pumps for pumping and separating hydrogen.
19th International Vacuum Congress (IVC 2013), Paris, France, September 9–13, 2013
- Gleason-Gonzalez, C.; Varoutis, S.; Day, C.
Divertor region gas kinetics: an engineering approach.
40th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS 2013), Espoo, SF, July 1–5, 2013
- Gleason-Gonzalez, C.; Varoutis, S.; Day, C.
Simulation of neutral gas flow in a tokamak divertor using direct simulation Monte Carlo method.
11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT 2013),
Barcelona, E, September 16–20, 2013
- Größe, R.; Beck, A.; Bornschein, B.; Fischer, S.; Kraus, A.; Rupp, S.
First calibration measurements of an IR absorption spectroscopy system for liquid hydrogen isotopologues.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- Heller, R.
Representative device builder points of view – current leads.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- * Heller, R.; Buscher, K.P.; Drotziger, S.; Fietz, W.H.; Kienzler, A.; Lietzow, R.; Mönnich, T.; Richter, T.; Rummel, T.; Urbach, E.
Status of series production and test of the HTS current leads for Wendelstein 7-X.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1482–1485
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.02.07
- * Hollik, M.; Fietz, W.H.; Fink, S.; Gehrlein, M.; Heller, R.; Lange, C.; Möhring, T.
Design of electronic measurement and quench detection equipment for the current lead test facility Karlsruhe (CuLTKa).
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1445–1448
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.02.082
- * Kamada, Y.; Barabaschi, P.; Ishida, S.
Progress of the JT-60SA project.
Nuclear Fusion, 53(2013) S. 104010/1–17
DOI:10.1088/0029-5515/53/10/104010
- Kuffner, B.; Richter, T.; Lietzow, R.
Cryogenic control valves – Measurements of characteristic curves at cryogenic conditions.
Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC),
Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- Lang, P.; Day, Ch.; Lehnen, M.; Pautasso, G.
Plasma control aspects of fuelling – pumping – disruption mitigation.
2nd IAEA DEMO Programme Workshop, Wien, A, December 17–20, 2013
- * Lange, C.; Fietz, W. H.; Gröner, F.
Influence of contact surface quality and contact material on the contact resistance of high current connections.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1581–1584
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.01.049
- Luo, X.; Giegerich, T.; Day, C.
Monte Carlo simulation of a vapour diffusion pump.
19th Internat. Vacuum Congress (IVC-19), Paris, F, September 9–13, 2013

- Luo, X.; Hauer, V.; Ochoa, S.; Day, Chr.
Simulation of the thermal radiation heat load of a large-scale customized cryopump with the Monte Carlo ray trace method.
Funaki, K. [Hrsg.]
Proc. of the 24th Internat. Cryogenic Engineering Conf., Internat. Cryogenic Materials Conference 2012, Fukuoka, J, May 14–18, 2012
Tokyo: Cryogenics and Superconducting Society of Japan, 2013 S. 111–114
ISBN 978-4-9906959-0-3
- Luo, X.; Giegerich, T.; Day, C.
Transient gas flow studied by a test particle Monte Carlo approach with ProVac3D.
Mareschal, M. [Hrsg.]
28th Internat. Symp. on Rarefied Gas Dynamics (RDG 28), Zaragoza, E, July 9–13, 2012
Vol. 1 S. 857–863
Melville, N.Y.: American Institute of Physics, 2012
(AIP Conference Proceedings ; 1501)
ISBN 978-0-7354-1116-6
- * Michling, R.; Bekris, N.; Cristescu, I.; Lohr, N.; Plusczyk, C.; Welte, S.; Wendel, J.
Water detritation processing of JET purified waste water using the TRENTA facility at tritium laboratory Karlsruhe.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 2361–2365
- Michling R., Braun A., Cristescu I., Dittrich H., Gramlich N. and Lohr N.
Capture and isotopic exchange method for Water and Hydrogen Isotopes on zeolite catalyssts up to technical scale for pre-study of processing hoghly tritiated water
10th international Conference on Trtium Science and Technology (TRITIUM 2013)
Nice, F. October 21–25, 2013
- Niemes, S.
Tritium measurement in water using bremsstrahlung X-rays and a silicon drift detector.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 75.7
- * Ochoa Guaman, S.; Hanke, S.; Day, C.
Heat transfer enhancemenbt of NBI vacuum pump cryopanel.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 882–886
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.02.111
- * Plusczyk, C.; Bekris, N.; Cristescu, I.; Lohr, N.; Michling, R.; Moosmann, H.; Welte, S.
Experimental assessment of a catalytic hydrogen oxidation system for the off-gas processing of the ITER WDS.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 2332–2335
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.05.104
- Priester, F.; Röllig, M.
Post service examination of TMP after stress testing with kg-scale tritium throughput.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- * Qin, J.; Wu, Y.; Yu, M.; Liu, B.; Liu, H.; Weiss, K.P.; Li, L.; Li, H.; Niu, E.; Bruzzone, P.
Manufacture of ITER feeder sample conductors.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1461–1464
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.01.008
- * Qin, J.; Weiss, K.P.; Wu, Y.; Liao, G.; Wu, Z.; Li, L.; Li, H.; Niu, E.
Mechanical test on the ITER CC and Feeder jacket.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 151–155
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.01.089
- Richter, T.; Lietzow, R.
Cryogenic experiences during W7-X HTS-current lead tests.
Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC),
Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- * Rizzo, E.; Bauer, R.; Heller, R.; Savoldi Richard, L.; Zanino, R.
1-D thermal-electrical analysis of the high temperature superconducting current leads for the ITER magnet system from 5 K to 300 K.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 3125–3131
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.09.001
- * Rizzo, E.; Heller, R.; Savoldi Richard, L.; Zanino, R.
CtFD-based correlations for the thermal-hydraulics of an HTS current lead meander-flow heat exchanger in turbulent flow.
Cryogenics, 53(2013) S. 51–60
DOI:10.1016/j.cryogenics.2012.06.001
- * Röllig, M.; Priester, F.; Babutzka, M.; Bonn, J.; Bornschein, B.; Drexlin, G.; Ebenhöch, S.; Otten, E. W.; Steidl, M.; Sturm, M.
Activity monitoring of a gaseous tritium source by beta induced X-ray spectrometry.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1263–1266
DOI:10.1016/j.fusengdes.2012.11.001
- Rummel, T.; Moennich, T.; Buscher, K.-P.; Schauer, F.; Fietz, W.H.; Heller, R.
The current leads of the Wendelstein 7-X superconducting magnet system.
25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2013), San Francisco, Calif., June 10–14, 2013
- Scannapiego, M.; Day, C.; Hauer, V.
Consequences of plasma disruption mitigation by massive gas injection on the ITER torus cryopumping system.
11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT 2013),
Barcelona, E, September 16–20, 2013
- Schlösser, M.; Pakari, O.; Rupp, S.; Mirz, S.; Fischer, S.
How can Raman-inactive helium Be made visible in Raman spectra of tritium/helium gas mixtures?
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- Schlösser, M.; Bornschein, B.; Fischer, S.; James, T.M.; Kassel, F.; Rupp, S.; Sturm, M.; Telle, H.H.
Raman spectroscopy at the tritium laboratory Karlsruhe.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013

- Shu, W.M.; Cristescu, I.; Michling, R.; Demange, D.; Willms, R.S.; Glugla, M.
Highly tritiated water processing by isotope swapping.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- Sturm, M.; Niemes, S.; Michling, R.; Bornschein, B.
Determination of tritium concentration in water using beta induced x-ray spectrometry with a silicon drift detector.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- * Urbach, E.; Bagrets, N.; Weiss, K. P.
Implementation of a quality management system at the PHOENIX facility (CryoMaK).
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 2631–2635
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.04.052
- Varoutis, S.; Saglietti, C.; Luo, X.; Day, C.; Zanino, R.
Experimental and computational investigation of rarefied gas flows through bellows and very short tubes.
19th International Vacuum Congress (IVC 2013), Paris, France, September 9–13, 2013
- Varoutis, S.; Day, C.
Transient rarefied gas flow through short channels at arbitrary pressure ratios.
Frühjahrstagung DPG, Sektion Kondensierte Materie, Fachverband Vakuumphysik und Vakuumtechnik, Regensburg, 10.–15. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), VA 2.1
- * Vojenciak, M.; Grilli, F.; Stenvall, A.; Kling, A.; Goldacker, W.
Influence of the voltage taps position on the self-field DC and AC transport characterization of HTS superconducting tapes.
Cryogenics, 57(2013) S. 189–194
DOI:10.1016/j.cryogenics.2013.08.001
- * Vostner, A.; Pong, I.; Bessette, D.; Devred, A.; Sgobba, S.; Jung, A.; Weiss, K.-P.; Jewell, M.C.; Liu, S.; Yu, W.; Boutboul, T.; Hamada, K.; Park, S.-H.; Tronza, V.; Walsh, R.P.
Benchmarking of mechanical test facilities related to ITER CICC steel jackets.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 9500705/1–5
DOI:10.1109/TASC.2013.2243895
- Wagner, R.; Demange, D.; Fanghänel, E.; Le, T.L.; Schwarz, M.; Simon, K.-H.
Decommissioning of the PETRA experiment – Status and progress.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- * Weiss, K.-P.; Urbach, E.; Kraft, G.; Scheller, H.
Cryogenic mechanical testing of ITER prototype axial breaks.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 1533–1536
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.02.046
- Weiss, K.P.; Bayer, Ch.; Barth, Ch.
High temperature superconduction current leads: A necessary tool for superconducting applications.
Annual Meeting of the Deutscher Kaelte und Klimatechnischer Verein 2012 / Deutsche Kaelte-Klima-Tagung 2012, Würzburg, November 21–23, 2012
Proc.Vol.1 S.204
Red Hook, N.Y. : Curran Associates, 2013
ISBN 978-1-62748-271-4
- Weiss, K.-P.; Westenfelder, S.; Purr, B.; Boyer, C.; Foussat, A.
Mechanical fatigue testing of a TF-He-inlet prototype at cryogenic temperature.
International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013
- Weiss, K.-P.; Bayer, C.; Bagrets, N.
Mechanical properties of superconductor cable jacket and casing material for cryogenic magnet application.
Cryogenic Engineering Conf.and Internat.Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC),
Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- * Welte, S.; Cristescu, I.; Dittrich, H.; Lohr, N.; Melzer, R.; Michling, R.; Plusczyk, C.; Schäfer, P.
Setup and commissioning of a combined waer detritiation and isotope separation experiment at the Tritium Laboratory Karlsruhe.
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.03.061
- Welte, S.; Besserer, U.; Osenberg, D.; Wendel, J.
Tritium laboratory Karlsruhe (TLK): Administrative and technical framework for isotope laboratory operation.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013),
Nice, F, October 21–25, 2013
- * Yang, Y.; Marujama, S.; Kiss, G.; Ciattaglia, S.; Putvinski, S.; Yoshino, R.; Li, W.; Jiang, T.; Li, B.; Varoutis, S.; Day, C.
Concept desing of fusion power shutdown system for ITER.
Fusion Engineering and Design, 88(2013) S. 824–826
DOI:10.1016/j.fusengdes.2013.01.055
- Yoshida, K.; Murakami, H.; Tsuchiya, K.; Kizu, K.; Kamiya, K.; Koide, Y.; Philips, G.; Zani, L.; Wanner, M.; Barabaschi, P.; Decool, P.; Cucchiaro, A.; Fietz, W.H.; Heller, R.; Michel, F.
Mass production of the superconducting magnet system for the JT-60SA.
International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013

Veröffentlichungen

Programm „Rationelle Energieumwandlung“ (* Thomson Reuters referiert)

Blum, L.; Grohmann, S.; Haberstroh, Ch.; Lau, M.; Otte, W.; Reinhardt, M.; Schröder, C.H.; Süßer, M.
Vorstellung des DIN-Arbeitsausschusses NA 016-00-07AA (Überdruck-Absicherung von Heliumkryostaten).
Annual Meeting of the Deutscher Kaelte und Klimatechnischer Verein 2012 / Deutsche Kaelte-Klima-Tagung 2012, Würzburg, November 21–23, 2012
Proc.Vol.1 S. 1–16
Red Hook, N.Y.: Curran Associates, 2013
ISBN 978-1-62748-271-4

De Sousa, W.T.B.; Polasek, A.; Dias, R.; Matt, C.F.T.; Da Silva, F.A.; De Andrade, R.
Investigation of 2G coil SCFCL – Modeling and Testing.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013

Fink, S.; Kim, W.-S.; Noe, M.; Zwecker, V.
Withstand impulse voltage of liquid nitrogen in the presence of gas bubbles.
International Electrical Insulation Conference (INSUCON 2013), Birmingham, GB, May 29–31, 2013

* Fuchs, G.; Häßler, W.; Nenkov, K.; Scheiter, J.; Perner, O.; Handstein, A.; Kanai, T.; Schultz, L.; Holzapfel, B.
High trapped fields in bulk MgB₂ prepared by hot pressing of ball-milled precursor powder.
Superconductor Science and Technology, 26(2013) S. 122002/1-6
DOI:10.1088/0953-2048/26/12/122002

Gehring, M.; Amend, J.; Boffo, C.; Gehring, R.; Goldacker, W.; Revilak, P.; Scheller, H.; Steinmann, J.; Walter, W.; Wirth, I.; Zöller, H.
Design aspects of a large T solenoid to be used for testing superconductors.
International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013

Gehring, R.; Goldacker, W.
VATESTA – A new measurement setup for power and energy applications.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013

Goldacker, W.; Grilli, F.; Kario, A.; Vojenciak, M.; Nast, R.; Souc, J.; Gömory, F.
Coated conductor based low AC loss cable concepts for power applications.
26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), Tokyo, J, November 18–20, 2013

Goldacker, W.; Elschner, S.; Demencik, E.; Grilli, F.; Kudymow, A.; Vojenciak, M.; Zermeno, V.; Stemmler, M.; Noe, M.
Experimental 3-phase model of a superconducting AC power transmission cable for transport current and AC-loss investigations.
26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), Tokyo, J, November 18–20, 2013

Goldacker, W.; Kario, A.; Grilli, F.; Kling, A.; Vojenciak, M.; Kudymow, A.; Barth, C.; Ringsdorf, B.; Schlachter, S.I.
High current low loss 2G HTS ROEBEL- and Rutherford cables.
Materials Research Society Spring Meeting & Exhibit (MRS 2013), San Francisco, Calif., April 1–5, 2013

Goldacker, W.; Kario, A.; Vojenciak, M.; Kling, A.; Jung, A.; Brand, J.; Walschburger, U.
Properties of ROEBEL assembled coated conductor cables in the shape of solenoid and pancake coils.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013

Goldacker, W.
Supraleitung in der Windenergie – Keine Utopie.
Workshop 'Planung / Errichtung', Rostock, 2. September 2013

* Grilli, F.; Zermeno, V.; Vojenciak, M.; Pardo, E.; Kario, A.; Goldacker, W.
AC losses of pancake coils made of Roebel cable.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 5900205/1–5
DOI:10.1109/TASC.2013.2238987

* Grilli, F.; Brambilla, R.; Sirois, F.; Stenvall, A.; Memiaghe, S.
Development of a three-dimensional finite-element model for high-temperature superconductors based on the H-formulation.
Cryogenics, 53(2013) S. 142–147
DOI:10.1016/j.cryogenics.2012.03.007

Grilli, F.; Chervyakov, A.; Zermeno, V.; Marian, A.; Grasso, G.; Goldacker, W.; Rubbia, C.
Numerical modeling of MgB₂ conductors for high power transmission.
26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), Tokyo, J, November 18–20, 2013

Grohmann, S.; Süßer, M.
Conceptual design of pressure relief systems for cryogenic applications.
Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC), Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013

* Härö, E.; Stenvall, A.; Lecrevisse, T.; Fleiter, J.; Rey, J.M.; Sorbi, M.; Devaux, M.; Trophime, C.; Fazilleau, P.; Volpini, G.; Tixador, P.; Hornung, F.; Pes, C.
Quench consideration and protection scheme of a high field HTS dipole insert coil.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 4600104/1–4
DOI:10.1109/TASC.2012.2228890

Heidt, C.; Grohmann, S.; Schön, H.; Stamm, M.
Aufbau eines Versuchsstands zur Messung der Vorgänge in einem Flüssighelium-Behälter bei Zusammenbruch des Isoliervakuums.
Deutsche Kälte-Klima-Tagung,
Hannover, 20.–22. November 2013

Heidt, C.; Grohmann, S.; Süßer, M.
Modeling the pressure increase in liquid cryostats after failure of the insulating vacuum.
Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC),
Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013

Heidt, C.; Grohmann, S.; Süßer, M.
Modellierung des Druckanstiegs in einem Flüssighelium-Behälter bei Zusammenbruch des Isoliervakuums.
Annual Meeting of the Deutscher Kälte und Klimatechnischer Verein 2012 / Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2012, Würzburg, November 21–23, 2012
Proc. Vol. 1 S. 17–38
Red Hook, N.Y.: Curran Associates, 2013
ISBN 978-1-62748-271-4

Hellmann, S.; Noe, M.
Influence of different surface treatments on the heat flux from solids to liquid nitrogen.
International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013

* Hobl, A.; Goldacker, W.; Dutoit, B.; Martini, L.; Petermann, A.; Tixador, P.
Design and production of the ECCOFLOW resistive fault current limiter.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 5601804/1–4
DOI:10.1109/TASC.2013.2238288

Holzappel, B.
Epitaxial Ba-122 and 11 thin films and heterostructures basic properties and application aspects. (eingeladen)
26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), Tokyo, J, November 18–20, 2013

Holzappel, B.
Epitaxial Ba-122 and 11 thin films and heterostructures basic properties and application aspects. (eingeladen)
International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials (NS2 2013),
Tokyo, J, November 21–22, 2013

Hossain, M.S.A.; Motaman, A.; Kim, J.H.; Dou, S.X.; Rindfleisch, M.; Tomsic, M.; Cicek, O.; Kovac, P.; Melisek, T.; Kopera, L.; Kario, A.; Ringsdorf, B.; Runtsch, B.; Jung, A.; Goldacker, W.
Superior critical densities obtained in binary MgB₂ cables through various mechanical deformations.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013

* Kario, A.; Vojenciak, M.; Grilli, F.; Kling, A.; Ringsdorf, B.; Walschburger, U.; Schlachter, S.I.; Goldacker, W.
Investigation of a rutherford cable using coated conductor roebel cables as strands.
Superconductor Science and Technology, 26(2013) S. 085019/1–6
DOI:10.1088/0953-2048/26/8/085019

Kario, A.; Hossain, M.S.A.; Runtsch, B.; Jung, A.; Nast, R.; Rindfleisch, M.; Tomsic, M.; Kim, J.H.; Dou, S.X.; Goldacker, W.
Investigation of copper electroplated MgB₂ cables with different twist pitch made from mono and multifilament wires.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I,
September 15–19, 2013

Kario, A.; Vojenciak, M.; Kling, A.; Jung, A.; Brand, J.; Walschburger, U.; Goldacker, W.
Solenoid and pancake coils assembled from 5 m long roebel coated conductor cable.
Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC),
Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013

Kario, A.; Vojenciak, M.; Kling, A.; Ringsdorf, B.; Runtsch, B.; Jung, A.; Grilli, F.; Zermeno, V.; Schlachter, S.I.; Nast, R.; Goldacker, W.; Hossain, S.H.
Superconductivity activities towards application at Institute for Technical Physics.
Vortr.: Australian Institute for Innovative Materials (AIIM), Wollongong, AUS,
25. Februar 2013

Krüger, P.; Grilli, F.; Takayasu, M.
Computation of effective critical current density and transient behavior of twisted stacked tape high-current cable.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I,
September 15–19, 2013

Krüger, P.; Grilli, F.; Takayasu, M.
Computation of effective critical current density and transient behavior of twisted stacked taped high-current cable.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I,
September 15–19, 2013

Krüger, P.; Grilli, F.
Experimental results and finite-element simulation of superconductor/ferromagnet heterostructures exhibit potential for significant reduction of hysteretic losses.
Materials Research Society Spring Meeting & Exhibit (MRS 2013), San Francisco, Calif., April 1–5, 2013

* Krüger, P.; Grilli, F.; Vojenciak, M.; Zermeno, V.M.R.; Demencik, E.; Farinon, S.
Superconductor/ferromagnet heterostructures exhibit potential for significant reduction of hysteretic losses.
Applied Physics Letters, 102(2013) S. 202601/1–4
DOI:10.1063/1.4807136

- Kudymow, A.; Elschner, S.; Strauß, S.; Goldacker, W.
Investigation of current limiting characteristics and of thermal stability at varying fault conditions on different 2G HTS.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- Leys, P.; Kläser, M.; Schleissinger, F.; Schneider, T.
Analysis of the anisotropic critical current behaviour of HTS coated conductors.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- * Leys, P.; Kläser, M.; Schleissinger, F.; Schneider, Th.
Angle-dependent U(I) measurements of HTS coated conductors.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 8000604/1–4
DOI:10.1109/TASC.2012.2232700
- Leys, P.; Kläser, M.; Schneider, T.
Superconducting high field magnets.
VDI-Wissensforum 'Cryogenics', Karlsruhe, 9.–11. Oktober 2013
- Müller, R.; Schrank, M.; Süßer, M.
Optimizing the geometry of venturi tube flow meters.
Funaki, K. [Hrsg.]
Proc.of the 24th Internat.Cryogenic Engineering Conf., Internat.Cryogenic
Materials Conference 2012, Fukuoka, J, May 14–18, 2012
Tokyo : Cryogenics and Superconducting Society of Japan, 2013 S. 91–94
ISBN 978-4-9906959-0-3
- Näckel, O.; Noe, M.
Design and test of an air coil superconducting fault current limiter demonstrator.
International Conference on Magnet Technology (MT 2013), Boston, Mass., July 14–19, 2013
- Näckel, O.; Noe, M.
Design and test of an air coil superconducting fault current limiter demonstrator.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- 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.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- Neumann, H.
Einführung in die Kryotechnik.
Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen ; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 27. Februar – 1. März 2013
- Neumann, H.
Forum crogenics. Welcome and introduction.
VDI-Wissensforum 'Cryogenics', Karlsruhe, 9.–11. Oktober 2013
- Neumann, H.
Heat transfer to cryogenics – cooling techniques
VDI-Wissensforum 'Cryogenics', Karlsruhe, 9.–11. Oktober 2013
- Neumann, H.
Thermal insulation.
VDI-Wissensforum 'Cryogenics', Karlsruhe, 9.–11. Oktober 2013
- Neumann, H.
Thermische Isolation.
Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 27. Februar – 1. März 2013
- Neumann, H.
Thermodynamische Grundlagen.
Seminar Kryostatbau, Karlsruhe, 16.–18. Oktober 2013
- Neumann, H.
Vakuum- und Sicherheitstechnik.
Seminar Kryostatbau, Karlsruhe, 16.–18. Oktober 2013
- Neumann, H.
Wärmeübertragung an Kryogene. Kühltechniken.
Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 27. Februar – 1. März 2013
- Noe, M.; Goldacker, W.; Holzapfel, B.
From 2G conductors to practical conductors – What needs to be improved?
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15.–19, 2013
- Noe, M.
Opportunities of high-temperature superconducting power equipment.
Vortr.: Max-Planck-Institut für Festkörperphysik, Stuttgart, 9. Juli 2013
- Noe, M.
Superconductivity as a key technology from small electronics to large magnet applications.
Academy-Industry Matching Event on Superconductivity, Madrid, E, May 27–28, 2013
- Noe, M.
Supraleitende Betriebsmittel für die zukünftige Energieversorgung. Stand der Entwicklung und Perspektiven.
Institutskolloquium, Elektrotechnisches Institut des KIT, 18. November 2013
- Noe, M.
Supraleiter-Transformatoren. Mit hoher Effizienz und mehr Sicherheit in die Zukunft.
Leistungstransformatoren im täglichen Betrieb, Gelsenkirchen, 2.–3. Dezember 2013

- Noe, M.; Sarmiento, G.; Arlaban, T.; Manzanos, R.; Tropeano, M.; Funke, R.; Kovac, P.; Yang, Y.; Mondesert, B. Suprapower, a new project towards high power wind generators using superconductivity. 12th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems, London, October 22–24, 2013
- * Nürnberg, A.; Schneider, T. Lorentz angle measurements as part of the sensor R&D for the CMS tracker upgrade. Journal of Instrumentation, 8(2013) C01001 DOI:10.1088/1748-0221/8/01/C01001
- * Prikhna, T.; Eisterer, M.; Weber, H.W.; Gawalek, W.; Chaud, X.; Sokolovsky, V.; Moshchil, V.; Kozyrev, A.; Sverdun, V.; Kuznietsov, R.; Habisreuther, T.; Karpets, M.; Kovylaev, V.; Noudem, J.; Rabier, J.; Joulain, A.; Goldacker, W.; Basyuk, T.; Tkach, V.; Dellith, J.; Schmidt, C.; Shaternik, A. Pinning in MgB₂- and YBaCuO-based superconductors: Effect of manufacturing pressure and temperature. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 8001605/1–5 DOI:10.1109/TASC.2013.2237736
- Ramalingam, R.; Neumann, H. Characterization of fiber bragg grating sensor in a high speed rotating pipe. 20. Internationale Fachmesse für Sensorik, Mess- und Prüftechnik 'Sensor und Test', Nürnberg, 14.–16. Mai 2013
- Ramalingam, R.; Nast, R.; Neumann, h. Distributed torsional strain measurement using embedded fiber bragg gratings array in a 2nd generation high temperature superconductor tapes. Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC), Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- Ramalingam, R.; Neumann, H. Measurement of temperature distribution in multi-layer insulations between 77 and 300 K using fiber Bragg grating sensor. Iniewski, K. [Hrsg.] Smart Sensors for Industrial Applications Boca Raton : Taylor & Francis, 2013 (Devices, Circuits, and Systems) ISBN 978-1-4665-6810-5
- 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. Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC), Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- Ramalingam, R. Study of strain transmission of surface bonded FBG based long range displacement sensor for cryogenic application. Deutsche Kälte-Klima-Tagung, Hannover, 20.–22. November 2013
- Ramalingam, R. K.; Langhans, O.; Süßer, M. Robuste Pt1000-Temperaturfühler für kryogene Anwendungen in der Prozessmesstechnik. Annual Meeting of the Deutscher Kälte und Klimatechnischer Verein 2012 / Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2012, Würzburg, November 21–23, 2012 Proc. Vol. 1 S. 39–50 Red Hook, N.Y.: Curran Associates, 2013 ISBN 978-1-62748-271-4
- Ramalingam, R. K.; Langhans, O.; Süßer, M.; Boguhn, D. Untersuchung von Pt1000-Fühler für die Anwendung bei kryogenen Temperaturen. Verfahren und Geräte in der Temperatur und Feuchtemesstechnik (TEMPERATUR 2013), Berlin, 5.–6. Juni 2013
- Ramalingam, R.K.; Langhans, O.; Süßer, M. Untersuchung von PT1000-Fühler für die Anwendung bei kryogenen Temperaturen. Temperatur Tagung, Berlin, 5.–6. Juni 2013
- Ramalingam, R. K.; Langhans, O.; Süßer, M. Untersuchungen von Pt1000-Fühler für die Anwendung bei kryogenen Temperaturen. Verfahren und Geräte in der Temperatur und Feuchtemesstechnik: TEMPERATUR 2013, Berlin, 5.–6. Juni 2013 Tagungsband S. 79–83 Braunschweig: PTB, 2013
- Sander, M.; Gehring, R.; Neumann, H. LIQHYSMES – Spectral power distributions of imbalances and implications for the SMES. European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- Schlachter, S.I.; Brand, J.; Goldacker, W. HTS magnet and cryogenic system for radio blackout mitigation experiment. 25th Space Cryogenics Workshop, Girdwood, Alaska, June 23–25, 2013
- Schlachter, S.I.; Brand, J.; Goldacker, W.; Fillinger, H.; Kario, A.; Ringsdorf, B.; Walschburger, U. Radiation blackout mitigation experiment with HTS magnet. Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC), Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- Schneider, T. Supraleitende Hochfeldmagnete. Kryotechnik: Grundlagen und Arbeitstechniken, Entwicklungsstand, -tendenzen, Anwendungen; VDI-Wissensforum, Karlsruhe, 27. Februar – 1. März 2013
- Schneider, T.; Kläser, M. Temperaturabhängigkeit des kritischen Stroms technischer Supraleiter. Deutsche Kälte-Klima-Tagung, Hannover, 20.–22. November 2013

- Schrank, M.; Reiner, A.
Auslegung eines Gasanwärmers für kryogenes Helium.
Deutsche Kälte-Klima-Tagung,
Hannover, 20.–22. November 2013
- Schrank, M.; Süßer, M.
Compilation of an uncertainty budget for cryogenic temperature measurement.
Funaki, K. [Hrsg.]
Proc. of the 24th Internat. Cryogenic Engineering Conf., Internat. Cryogenic Materials Conference 2012, Fukuoka, J, May 14–18, 2012
Tokyo: Cryogenics and Superconducting Society of Japan, 2013 S. 307–310
ISBN 978-4-9906959-0-3
- Schrank, M.; Süßer, M.
Gasdurchflussmessung in der Kryotechnik.
Annual Meeting of the Deutscher Kaelte und Klimatechnischer Verein 2012 / Deutsche Kaelte-Klima-Tagung 2012, Würzburg, November 21–23, 2012
Proc. Vol. 1 S. 51–68
Red Hook, N.Y.: Curran Associates, 2013
ISBN 978-1-62748-271-4
- Sirois, F.; Grilli, F.; Laforest, M.; Wan, A.
Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices.
European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), Genova, I, September 15–19, 2013
- * Souc, J.; Gömöry, F.; Kovac, J.; Nast, R.; Jung, A.; Vojenciak, M.; Grilli, F.; Goldacker, W.
Low AC loss cable produced from transposed striated CC tapes.
Superconductor Science and Technology, 26(2013) S. 075020/1–5
DOI:10.1088/0953-2048/26/7/075020
- Stemmler, M.; Merschel, F.; Noe, M.; Hobl, A.
AmpaCity – Installation of advanced superconducting 10 kV system in city center replaces conventional 110 kV cables.
International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD2013), Beijing, China, October 25–27, 2013
- Stemmler, M.; Merschel, F.; Noe, M.; Hobl, A.
AmpaCity – Installation of advanced superconducting 10 kV system in city center replaces conventional 110 kV cables.
Proceedings of the International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD2013), Beijing, China, October 25–27, 2013
Piscataway, N.J. : IEEE, 2013 S. 323–326
ISBN 978-1-4788-0070-1
- Stemmler, M.; Merschel, F.; Noe, M.; Hobl, A.
AmpaCity project Advanced superconducting 10 kV system replaces conventional 110 kV cable system in city center.
2013 CIGRE Canada Conference, Calgary, CDN, September 9–11, 2013
- Stemmler, M.; Merschel, F.; Noe, M.; Hobl, A.
AmpaCity project – Worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a German city center.
International Electricity Conference & Exhibition (CIRED 2013), Stockholm, S, June 10–13, 2013
- * Stenvall, A.; Siahraang, M.; Grilli, F.; Sirois, F.
Computation of self-field hysteresis losses in conductors with helicoidal structure using a 2D finite element method.
Superconductor Science and Technology, 26(2013) S. 045011/1–10
DOI:10.1088/0953-2048/26/4/045011
- * Stenvall, A.; Grilli, F.; Lyly, M.
Current-penetration patterns in twisted superconductors in self-field.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) S. 8200105/1–5
DOI:10.1109/TASC.2012.2228733
- * Stenvall, A.; Tarhasaari, T.; Grilli, F.; Raunonen, P.; Vojenciak, M.; Pellikka, M.
Manifolds in electromagnetism and superconductor modelling: Using their properties to model critical current of twisted conductors in self-field with 2-D model.
Cryogenics, 53(2013) S. 135–141
DOI:10.1016/j.cryogenics.2012.06.005
- Süßer, M.
Druckabsicherung von He-Kryostaten oder welche Maßnahmen sind erforderlich um ein Druckentlastungssystem als eine sehr zuverlässige Sicherheitseinrichtung zu bewerten.
Vortr.: Helmholtz-Zentrum Berlin, 27. Februar 2013
- Süßer, M.
Kryogene Mess-, Regel- und Sicherheitstechnik.
Seminar Kryostatbau, Karlsruhe, 16–18. Oktober 2013
- Süßer, M.
Low temperature measurement and control technique.
VDI Wissensforum Cryogenics, Karlsruhe, 9.–11. Oktober 2013
- Süßer, M.
Massflow measurement in cryogenic facilities.
Vortrag am Le centre CEA de Saclay, Gif-sur-Yvette, F, June 13, 2013
- Süßer, M.
Messunsicherheit und Temperaturauflösung in der kryogenen Temperaturmessung.
Deutsche Kälte-Klima-Tagung, Hannover, 20.–22. November 2013
- * Vojenciak, M.; Grilli, F.; Stenvall, A.; Kling, A.; Goldacker, W.
Influence of the voltage taps position on the self-field DC and AC transport characterization of HTS superconducting tapes.
Cryogenics, 57(2013) S. 189–194
DOI:10.1016/j.cryogenics.2013.08.001

Veröffentlichungen

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

- Antoni, M.; KATRIN Collaboration
Kontinuierliche MMagnetfeldüberwachung am KATRIN-Hauptspektrometer mit einem Sensornetz.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 108.5
- Babutzka, M.; Bornschein, B.; Priester, F.; Röllig, M.; Schneck, F.
Tritium adsorption and desorption measurements using beta-induced x-ray spectroscopy for KATRIN.
19th Internat. Vacuum Congress (IVC-19), Paris, F, September 9–13, 2013
- Bornschein, B.; Sturm, M.; KATRIN Collaboration
Status of the tritium neutrino mass experiment KATRIN.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013), Nice, F, October 21–25, 2013
- Erhard, M.; KATRIN Collaboration
Ein Jahr Messungen am KATRIN Monitorspektrometer.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 66.4
- Fischer, S.; Schäfer, V.
COATEX: Testing optical coatings for resistance against tritium.
Frühjahrstagung DPG, Sektion AMOP, Fachverband Molekülphysik, Hannover, 18.–22. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), MO 18.8
- Fischer, S.
Status of the windowless gaseous tritium source of KATRIN.
15th International Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, I, March 11–15, 2013
- Gil, W.; Bolz, H.; Jansen, A.; Müller, K.; Steidl, M.; Hagedorn, D.
Test of by-pass diodes at cryogenic temperatures for the KATRIN magnets.
Cryogenic Engineering Conf. and Internat. Cryogenic Materials Conf. (CEC-ICMC), Anchorage, Alaska, June 17–21, 2013
- Glück, F.; KATRIN Collaboration
Chaotic motion of stored electrons in the KATRIN main spectrometer.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 99.2
- Görhardt, S.; KATRIN Collaboration
Ausheizphase des KATRIN Hauptspektrometers.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 108.8
- Grohmann, S.; KATRIN Collaboration
Sensitivitätsuntersuchungen zur Detektion von sterilen keV Neutrinos mit einem KATRIN-artigen Experiment.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 99.6
- * Grohmann, S.; Bode, T.; Hötzel, M.; Schön, H.; Süßer, M.; Wahl, T.
The thermal behaviour of the tritium source in KATRIN.
Cryogenics, 55–56(2013) S. 5–11
DOI:10.1016/j.cryogenics.2013.01.001
- Hag, M.; KATRIN Collaboration
Überblick über die Methoden der KATRIN Datenanalyse.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 102.6
- Harms, F.; KATRIN Collaboration
Betrieb des KATRIN Fokalebenendetektors.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 74.4
- Hausmann, N.; KATRIN Collaboration
Prozesssteuerung und Datenanalyse am Monitorspektrometer des KATRIN-Experiments.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 102.8

- * James, T. M.; Schlösser, M.; Fischer, S.; Sturm, M.; Bornschein, B.; Lewis, R.J.; Telle, H.H.
Accurate depolarization ratio measurements for all diatomic hydrogen isotopologues.
Journal of Raman Spectroscopy, 44(2013) S. 857–865
DOI:10.1002/jrs.4283
- * James, T. M.; Schlösser, M.; Lewis, R.J.; Fischer, S.; Bornschein, B.; Telle, H.H.
Automated quantitative spectroscopic analysis combining background subtraction, cosmic ray removal, and peak fitting.
Applied Spectroscopy, 67(2013) S. 949–959
DOI:10.1366/12–06766
- Jansen, A.; KATRIN-Collaboration
Verbessertes Design der Schutzdioden für supraleitende Magnete im KATRIN-Experiment.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 52.31
- Kraus, M.; KATRIN Collaboration
Stabilität und Verteilung der Präzisions-Hochspannung für die KATRIN Spektrometer.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 108.6
- Leiber, B.; KATRIN Collaboration
Testmessungen mit nicht-axialsymmetrischem Magnetfeld am KATRIN-Monitorspektrometer.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 66.5
- Murra, M.; Brown, E.; Rosendahl, S.; Cristescu, I.; Huhmann, C.; Fieguth, A.; Weinheimer, C.
Distillation column for XENON1T dark matter project.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 58.1
- * Priester, F.; Bornschein, B.
TriTop – a compatibility experiment with turbomolecular pumps under tritium atmosphere.
Vacuum, 98(2013) S. 22–28
DOI:10.1016/j.vacuum.2012.09.006
- Röllig, M.; KATRIN Collaboration
Tritiumnachweis per beta-induzierter Röntgenspektroskopie (BIXS).
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 43.4
- Rosendahl, S.; Brown, E.; Cristescu, I.; Fieguth, A.; Huhmann, C.; Murra, M.; Weinheimer, C.
Efficiency measurements of a pre-separation stage for the krypton distillation column for the XENON1T experiment.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 107.7
- Rovedo, P.; KATRIN Collaboration
Myon-induzierter Untergrund am KATRIN Hauptspektrometer.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8.März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 75.3
- 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.
10th International Conference on Tritium Science and Technology (TRITIUM 2013), Nice, F, October 21–25, 2013
- Rupp, S.; KATRIN Collaboration
Raman spectroscopy for the windowless gaseous tritium source of the KATRIN experiment.
14th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN 2013), Natal, BR, September 16–21, 2013
- Schams, S.; KATRIN Collaboration
Anwendung von Markov-Chain Monte Carlo Methoden in der KATRIN Datenanalyse.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 102.7
- Schlösser, M.; Rupp, S.; Seitz, H.; Fischer, S.; Bornschein, B.; James, T.M.; Telle, H.H.
A sample-free calibration method for quantitative raman spectroscopy of hydrogen isotopologues.
Frühjahrstagung DPG, Sektion AMOP, Fachverband Quantenoptik und Photonik, Hannover, 18.–22. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), Q 43.17
- * Schlösser, M.; Rupp, R.; Seitz, H.; Fischer, S.; Bornschein, B.; James, T.M.; Telle, H.H.
Accurate calibration of the laser raman system for the Karlsruhe tritium neutrino experiment.
Journal of Molecular Structure, 1044(2013) S. 61–66
DOI:10.1016/j.molstruc.2012.11.022
- * Schlösser, M.; James, T. M.; Fischer, S.; Lewis, R. J.; Bornschein, B.; Telle, H.H.
Evaluation method for Raman depolarization measurements including geometrical effects and polarization aberrations.
Journal of Raman Spectroscopy, 44(2013) S. 453–462
DOI:10.1002/jrs.4201

* Schlösser, M.; Seitz, H.; Rupp, S.; Herwig, P.; Alecu, C.G.; Sturm, M.; Bornschein, B.
In-line calibration of Raman systems for analysis of gas mixtures of hydrogen isotopologues with sub-percent accuracy.
Analytical Chemistry, 85(2013) S. 2739–2745
DOI:10.1021/ac3032433

Schönung, K.
Charakterisierung und Aufbau eines Calibration and Monitoring Systems (CMD) für das KATRIN Experiment und Durchführung erster Messungen.
Kolloquium der Carl-Zeiss Stiftung,
Oberkochen, 20.–21. November 2013

Schönung, K.
Entwicklung des Calibration and Monitoring Systems des KATRIN-Experiments zur Bestimmung der Neutrinomasse.
Jahresbericht der Carl-Zeiss-Stiftung für das Geschäftsjahr 2011/2012 (Februar 2013) S. 54

Schönung, K.; Babutzka, M.
Entwicklung und Durchführung von Testexperimenten für die Rear Section des KATRIN-Experiments.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik,
Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 99.7

Schwarz, J.; KATRIN Collaboration
Status des KATRIN Fokalebenendetektors am KIT.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Physik der Hadronen und Kerne, Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), HK 43.5

Stallkamp, N.; KATRIN Collaboration
Magnetfeldoptimierung des LFCS Luftspulensystems für das KATRIN Hauptspektrometer.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik,
Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 108.7

Sturm, M.
KATRIN, an experiment for determination of the ν -mass: status and outlook.
8th Internat. Workshop on the Dark Side of the Univers (DSU 2012), Armacao de Buzios, BR, June 10–15, 2012

Thümmeler, T.; KATRIN Collaboration
Inbetriebnahme und Testmessungen des KATRIN Spektrometer und Detektor Systems.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik,
Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 99.1

Thümmeler, T.; KATRIN Collaboration
Status and commissioning of the Karlsruhe tritium neutrino experiment KATRIN.
Fleming, B. [Hrsg.]
11th Conf. on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2012),
St. Petersburg, Fla., May 29 – June 3, 2012
Melville, N.Y.: American Institute of Physics, 2013
S. 94–98
(AIP Conference Proceedings; 1560)
ISBN 978-0-7354-1188-3

Trost, N.; KATRIN Collaboration
Untergrund durch gespeicherte Elektronen. Simulation und Messvorbereitung am KATRIN-Experiment.
77. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung, Fachverband Teilchenphysik,
Dresden, 4.–8. März 2013
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.48(2013), T 99.3

Veröffentlichungen

Eingeladene Vorträge

Beate Borschein

- B. Borschein, „Schreibbildung in der Physik – erste Erfahrungen am Schreiblabor des HoC“. Interdisziplinäre Tagung Wissenschaft schreiben, 09.–11. Oktober 2013, Universität Karlsruhe
- B. Borschein, „Das KATRIN Experiment“ 02.10.2013 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Stuttgart, Abteilung „Kernenergieüberwachung, Strahlenschutz“
- B. Borschein „Determination of Neutrino Mass – Seven Decades of Tritium Beta-Decay Experiments“ 06.12.2013, Gemeinsamen Seminar des Forschungsschwerpunkts Teilchenphysik des Instituts für Kernphysik der Universität Münster

Christian Day

- Chr. Day, „20 years of customized cryopumps in fusion research“, 24th National Symp. Cryogenics, Ahmedabad, Indien, Januar 2013.
- Chr. Day, „Non-cryogenic pumps for DEMO“, 21st Vacuum Congress, Catania, Italien, Mai 2013.
- Chr. Day, „Exhaust pumping of DT fusion devices – Current state-of-the-art and a potential roadmap to a power plant“, Symp. On Fusion Engineering, San Francisco, CA, US, Juni 2013.
- Chr. Day, „ITER – Der Weg zu einem Fusionskraftwerk“, Bad Honnefer Industriegespräche der DPG, Bad Honnef, Juli 2013.

Wilfried Goldacker

- W. Goldacker, Anna Kario, Francesco Grilli, Andrea Kling, Michal Vojenciak, Andrej Kudymow, Christian Barth, Bernd Ringsdorf, Sonja I Schlachter. „High Current Low Loss 2G HTS ROEBEL- and Rutherford Cables“, MRS-Tagung San Francisco, 1.–5.4.2013

Reinhard Heller

- R. Heller, „Representative device builder points of view – current leads“, special session at European Conference on Applied Superconductivity 2013, Genoa, 15.–19.9.2013

Bernhard Holzapfel

- B. Holzapfel „Supraleitende Materialien für die Energietechnik“, DGM Fachausschuss Werkstoffe der Energietechnik, Oktober 1st, Jülich
- B. Holzapfel „Epitaxial Ba-122 and 11 Thin Films and Heterostructures – Basic Properties and Application Aspects“, International Symposium on Superconductivity, November 19th, Tokio, Japan

- B. Holzapfel „Epitaxial Ba-122 and 11 Thin Films and Heterostructures – Basic Properties and Application Aspects“, International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013, November 21st, Tokio, Japan

Anna Kario

- A. Kario, M. Vojenciak, A. Kling, A. Jung, F. Grilli, V. Zermeno, B. Ringsdorf, R. Nast, U. Walschburger, J. Willms, S.I. Schlachter, W. Goldacker, S. H. Hossain, J. H. Kim (University of Wollongong, ISEM), „Superconductivity activities towards application at Supra group“, UOW Wollongong, 20.02.2013

Mathias Noe

- M. Noe, E. Marzahn „Hochtemperatur-Supraleiter Kabel“, 81. Kabelseminar, 26.–27. Februar 2013, Leibniz Universität Hannover
- M. Noe „European project SUPRAPOWER for HTS wind generator“, CIGRE WG D1.38 Workshop on High Temperature Superconductors (HTS) for Utility Applications, April 26th 2013, Peking, China
- M. Noe „Fault Current Limiter Concepts and Applications“, CIGRE WG D1.38 Workshop on High Temperature Superconductors (HTS) for Utility Applications, April 26th 2013, Peking, China
- M. Noe „High Temperature Superconductor Power Applications“, May 1st 2013, CERN Accelerator School, Erice, Italy
- M. Noe „Widerstand zwecklos – Supraleiter erobern Smart Grids“, May 22nd 2013, Talkkit, Karlsruhe
- M. Noe „Superconductivity as a key technology from small electronics to large magnet applications“, Academia – Industry matching event – Fostering collaborations in Superconductivity, May 27th–28th 2013, Madrid, Spain
- M. Noe „History and Prospects of Applied Superconductivity Technology for Fusion Magnets“, June 19th 2013, PhD Student Seminar, St. Martin, Germany
- M. Noe „Opportunities of High-Temperature Superconducting Power Equipment“, July 9th 2013, MPI Colloquium Stuttgart
- M. Noe „Status of Development of Superconducting Fault Current Limiters (SCFCL)“, European Summer School on Superconductivity 2013, July 29th – August 2nd, 2013, Karlsruhe, Germany
- M. Noe „Superconductivity in the power grid, worldwide: trials and opportunities“, High-temperature superconducting workshop at CIGRE D1 meeting, September 11th 2013, Brisbane, Australia

- M. Noe, W. Goldacker, B. Holzapfel „From 2G to Practical Conductors – What Needs to be Improved?“ European Conference on Applied Superconductivity EUCAS 2013, 15.–19. September 2013, Genova, Italy
- M. Noe „Supraleitende Betriebsmittel für die zukünftige Energieversorgung – Stand der Entwicklung und Perspektiven“ ETI Kolloquium, 18. November 2013, Karlsruhe
- M. Noe „Supraleiter-Transformatoren – Mit hoher Effizienz und mehr Sicherheit in die Zukunft“ Netzpraxis, 7. Fachtagung Energie, Leistungstransformatoren im täglichen Betrieb, 2. und 3.12. 2013, Gelsenkirchen

Matthieu Scannapiego

- M. Scannapiego, „R&D and design of the cryogenic vacuum pumps for ITER“, IUVSTA Workshop on large vacuum devices, Ahmedabad, Indien, März 2013.

Magnus Schlösser

- M. Schlösser, How one measures the neutrino mass and why one needs raman spectroscopy for it ...
Votr.: Instituto Pluridisciplinar, Universidad Complutense de Madrid, E, May 9, 2013

Stylianos Varoutis

- St. Varoutis, „Transient rarefied gas flow through short channels at arbitrary pressure ratios“, Frühjahrstagung DPG, Dresden, März 2013.

Veröffentlichungen

Schutzrechtsbestände

(* Neue Schutzrechtsanmeldungen in 2013)

** Schutzrechtserteilungen mit Wirkung für Deutschland in 2013)

Strombegrenzer mit elektrischen Ventilen zum Begrenzen des Kurzschlußstromes in einem elektrischen Leistungsstromkreis

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

Verfahren zur Steuerung der Netzgeräte zum Laden der Energiespeicher eines Leistungsmodulators und Leistungsmodulator zur Durchführung des Verfahrens

Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory
DE 10036519

Strombegrenzer zur Strombegrenzung im Fehlerfall

Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory; Noe, Mathias
DE 102004058633
EP 05791533.2-1231
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
EP 07723071.2-1231
US 8255023

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

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

Anlage zur supraleitenden magnetischen Energiespeicherung, elektrolytischen Wasserzerlegung und wassersynthetisierenden Strombegrenzer

Gehring, Rainer; Sander, Michael
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
WO PCT/EP2010/007837

Massenstromsensor und Verfahren zur Bestimmung des Massenstroms in einem Rohr

Neumann, Holger; Ramalingam, Rajini K; Süßer, Manfred
DE 102010012924.0-52 **
EP 11714215.8-2209
US 13/637,262

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

Neumann, Holger; Sander, Michael
DE 102011013577 **
EP 12712218.2-1556
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 PCT/EP2012/002847
KR PCT/EP2012/002847
US 14/130,708

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

Grohmann, Steffen

DE 102011120899.6
WO PCT/EP2012/005051

Supraleitende Magnetanordnung

Krüger, Philipp

DE 102012106211.0
WO PCT/EP2013/002026

**Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen
Wiederaufbereitung von Abgas eines Fusions-
reaktors**

Day, Christian; Giegerich, Thomas

DE 102013109778.2 *

**Axialer, kryotechnisch geeigneter Potential-
trenner**

Fink, Stefan; Friesinger, Günter

DE 1196711

**Verfahren zur Herstellung einer Verbindungs-
struktur 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

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

Haußelt, Jürgen; Piotter, Volker; Ruprecht, Robert; Finnah,
Guido; Johann, Thomas; Schanz, Gerhard; Holstein, Nils

EP 03790808.4

Kontakt

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

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

www.itep.kit.edu

Leitung

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

Stellvertretende Leitung

Dr. Walter Fietz (-24197)

Sekretariat

Marion Gilliar (-23501)
Melanie Bacher (-23527)

Professor a. D.

Prof. Dr. Peter Komarek (-22652)

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. Reinhard Heller (-22701)
Dr. Klaus-Peter Weiss (-23919)

Vakuumtechnik

Dr. Christian Day (-22609)

Koordination KATRIN im ITEP

Dr. Beate Bornschein (-23239)

Kontakt

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

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

www.itep.kit.edu

Herausgeber

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

Stand März 2014

www.kit.edu