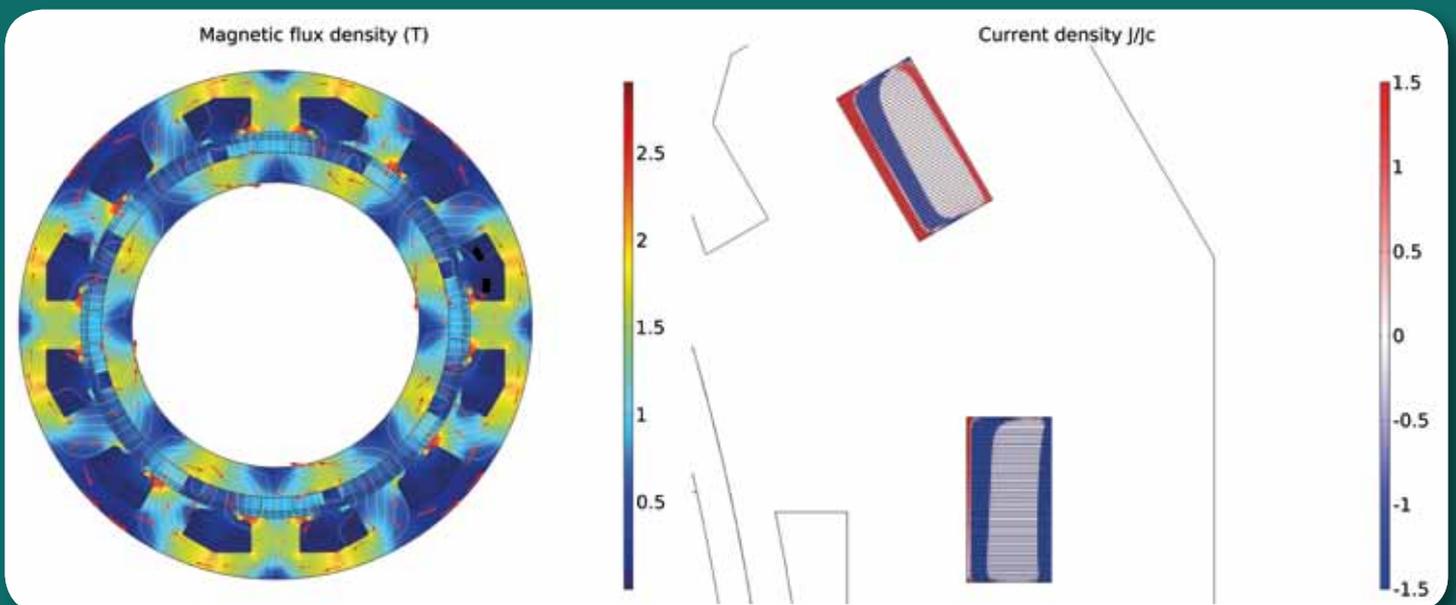


# ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung  
Jahresbericht 2019

INSTITUT FÜR TECHNISCHE PHYSIK



## Impressum

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

Telefon +49 721/608-23501

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



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001

### Texte:

Tabea Arndt, Christian Day, Walter Fietz, Jörn Geisbüsch, Thomas Giegerich, Francesco Grilli, Steffen Grohmann, Roland Gyuráki, Stefan Hanke, Jens Hänisch, Bernhard Holzapfel, Frank Hornung, Marion Kläser, Thomas M. Kochenburger, Ralph Lietzow, Ingeborg Meyer, Mathias Noe, Simon Otten, Alan Preuß, Sonja Schlachter, Stylianos Varoutis, Patabhi Vishnuvardhan-Gade, Klaus Weiss, Michael Wolf

### Fotos und Grafiken:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### Titelbild:

Gekoppelte elektromagnetische Auslegung einer vollsupraleitenden Maschine (links) und gleichzeitige genaue Berechnung der Magnetfeldverteilung in den einzelnen Bandleitern der Spule (rechts)

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

Druck: Systemedia GmbH, 75449 Wurmberg

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

April 2020

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Ergebnisse aus den Forschungsbereichen</b>	<b>6</b>
Supraleiter- und Kryo-Materialien	6
Energietechnische Anwendungen der Supraleitung	12
Supraleitende Magnettechnologie	18
Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes	28
<b>Preise und Auszeichnungen</b>	<b>36</b>
<b>Abgeschlossene Doktorarbeiten</b>	<b>38</b>
<b>Dr. Simon Otten:</b> Charakterisierung von REBCO Roebel Kabeln	38
<b>Dr. Pattabhi Vishnuvardhan Gade:</b> Konzeptionelles Design von Hochtemperatur-Supraleiter toroidalen Feldspulen für zukünftige Fusionskraftwerke	40
<b>Dr. Alan Preuss:</b> Entwicklung von hochtemperatur-supraleitenden Kabel für Hochstromanwendungen	41
<b>Dr. Roland Gyuráki:</b> Thermische Bildgebungsmethode zur Untersuchung von transienten Effekten in hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern und Spulen	42
<b>Dr. Thomas Markus Kochenburger:</b> Kryogene Gemischkältekreisläufe für Hochtemperatursupraleiter-Anwendungen	43
<b>Lehre und Bildung</b>	<b>44</b>
Vorlesungen, Seminare und Workshops	44
Doktorarbeiten – Masterarbeiten – Bachelorarbeiten	45
Fach- und Gastvorträge	48
<b>Zahlen und Daten</b>	<b>49</b>
Organigramm	49
Personalstand	49
Personalveränderungen	50
Studentische Hilfskräfte	51
Gastwissenschaftler	52
Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien	53
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>55</b>
Veröffentlichungen „Fusion“	55
Veröffentlichungen „Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen“	58
Veröffentlichungen „Speicher und vernetzte Infrastrukturen“	58
Eingeladene Vorträge	64
Schutzrechtsbestände	65
<b>Kontakt</b>	<b>67</b>

# Vorwort

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

- Supraleiter- und Kryomaterialien
- Energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- Supraleitende Magnettechnologie
- Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

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

Zur Bearbeitung seiner komplexen und meist multidisziplinären Aufgaben verfügt das ITEP über einzigartige große Versuchseinrichtungen und Labors mit den entsprechenden technischen Infrastrukturen. Dazu gehören unter anderem ein Labor zur Entwicklung supraleitender Energietechnikkomponenten, ein Technikum zur Entwicklung supraleitender Materialien, das Hochfeldmagnetlabor zur Entwicklung von supraleitenden Magneten für hohe Felder, das kryogene Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe sowie die kryogenen Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei sehr tiefen Temperaturen.

Auch im Jahr 2019 erzielte unser Institut beachtliche wissenschaftliche Ergebnisse, bearbeitete erfolgreich etliche Entwicklungsprojekte und meisterte einige besondere Herausforderungen. Wir gehen im Folgenden genauer darauf ein. Zwei bedeutende Entwicklungen möchten wir voranstellen.

Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) wurde nach über elf Jahren Zugehörigkeit zum ITEP im April 2019 dem Institut für Kernphysik (IKP) des KIT zugeordnet. Da das TLK seine inhaltlichen Schwerpunkte auf das Projekt KATRIN gelegt hat und die Finanzierung gesichert ist, unterstützen alle Beteiligten diese Neuordnung. Wir wünschen dem TLK und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern weiterhin alles Gute und viel Erfolg.

Im Rahmen einer Helmholtz-Rekrutierungsinitiative wurde am ITEP eine neue Professur Supraleitende Mag-

nettechnologie kompetent und langfristig mit Dr. Tabea Arndt von Siemens Corporate Technology besetzt. Damit sind nun alle wichtigen Anwendungsfelder der Supraleitung durch Professuren abgedeckt. Das ITEP kann mithin die gesamte Wertschöpfungskette von Materialien bis zu Hochstromanwendungen erforschen, was in Europa einzigartig ist. Professorin Tabea Arndt ist Mitglied der kollegialen Institutsleitung des ITEP.



*Abb. 1: Tabea Arndt hat am ITEP die neue Professur Supraleitende Magnettechnologie inne.*

Im Forschungsfeld **Supraleiter- und Kryomaterialien** bildet die Untersuchung und Weiterentwicklung von  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Bandleitern einen wichtigen Schwerpunkt. 2019 wurde die Abhängigkeit kritischer Größen von der Sauerstoffbeladung grundlegend erforscht. In einem großen Parameterbereich wurden optimale Einstellungen bei diesem wichtigen Prozessschritt ermittelt. Im Rahmen eines Enabling Research Projekts der Fusion wurden für Strukturmaterialien für Magnete gezielte Produktionsprozesse und ausgewählte Legierungen untersucht, die eine höhere Festigkeit und verbessertes Bruchverhalten für die Anwendung in Magneten bei kryogenen Temperaturen erlauben. Durch gezieltes Kalt- und Warmumformen wurden erste Materialien mit verbesserten mechanischen Eigenschaften bei kryogenen Temperaturen hergestellt. Eine neue Phasengleichgewichtsanlage CryoPHAEQTS zur Untersuchung von Gemischkältekreisläufen wurde erfolgreich in Betrieb genommen; erste Gemische wurden bis zu einer Temperatur von 85 K untersucht. Bei der Entwicklung von Hochstromleitern wurden 40 kA in einer Anordnung mit zwölf CrossConductors erreicht. Weiterhin

wurde für das am ITEP patentierte Herstellungsverfahren die Hochskalierung der Fertigung verbessert. Erstmals wurden längere Proben in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren gefertigt.

Im Forschungsfeld **Energietechnische Anwendungen der Supraleitung** startete ein neues Verbundprojekt zur Entwicklung einer supraleitenden Industriestromschiene mit einer Stromstärke von 200.000 A. Das ITEP hat unter anderem die Planung, Vorbereitung und Durchführung von Tests an skalierten Komponenten übernommen. Bei der Modellierung und Simulation von Hochtemperatur-Supraleitern wurde im Rahmen eines EIU-Projekts erstmals eine detaillierte elektromagnetische Simulation einer voll supraleitenden Maschine mit einer Detailsimulation des Supraleiters zur genauen Bestimmung der Wechselstromverluste gekoppelt. Berechnungszeit und Genauigkeit werden dadurch deutlich verbessert (siehe Titelseite). Im Verbundprojekt TELOS zur Entwicklung von elektrischen Flugzeugen wurde eine supraleitende Stromschiene weiterentwickelt; dabei wurde besonders die Kontaktierung deutlich verbessert. Als wesentlicher Bestandteil des Energy Lab 2.0 wurde das neue Gebäude 668 übergeben; die Laborinfrastruktur wurde aufgebaut. Zu dieser gehören unter anderem ein 1 MVA-Power-Hardware-in-the-Loop-Teststand und ein 60 kW-Schwungmassenspeicher.

Eine wichtige Aufgabe im Forschungsfeld **Supraleitende Magnettechnologie** besteht in der Entwicklung hochtemperatur-supraleitender Magnete. Dazu wurde das am ITEP patentierte Verfahren zur Herstellung von hochstromtauglichen Kreuzleitern weiterentwickelt. Erstmals wurde die Fertigung von Rolle zu Rolle demonstriert, ein Hochstromdemonstrator wurde bei 40 kA erfolgreich getestet. Weiterhin wurde in der Testanlage HOMER II bei einem Einsatz von Hochfeldspulen mit einer Lagenwicklung aus YBCO-Bandleitern in einem Hintergrundfeld von 20 T ein Maximalfeld von 26,5 T erzielt. Im Rahmen eines von der DFG geförderten deutsch-chinesischen Projekts wurden für einen supraleitenden Windkraftdemonstrator mit Gleichstrom mehrere nicht isolierte Spulen gefertigt und bei ihrem Betriebspunkt von 30 K erfolgreich getestet.

Im Forschungsfeld **Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs** entwickelt das ITEP grundlegend neue Vakuumtechnologien sowie Verfahren zur Tritiumextraktion

und -rückgewinnung. Mit einem Industriepartner wurde die bisher weltweit größte NEG-Pumpe, die mit einem neuen Gettermaterial arbeitet, entwickelt und am ITEP getestet. Eine neue Anlage zur Materialcharakterisierung für den Prozess der Temperatur-Schwingungs-Absorption zur Konzentrationsverschiebung zwischen verschiedenen Wasserstoff-Isotopologen in einer Mischung wurde erfolgreich in Betrieb genommen; erste Ergebnisse zeigen das Absorptionsverhalten von Wasserstoff in Palladium bei verschiedenen Bedingungen. Weiterhin wurden alle derzeit diskutierten Divertorkonfigurationen mit einem einheitlichen Ansatz untereinander verglichen. Berechnet wurde dabei der Extraktionswirkungsgrad bei variiertem Pumpenwirkungsgrad. Die Ergebnisse zeigen, dass neue Divertorgeometrien einen deutlich höheren Wirkungsgrad besitzen als die bisher vorgeschlagenen Referenzen für ITER und DEMO. Weltweit erstmals wurde eine tritiumkompatible Quecksilber-Flüssigkeitsringpumpe charakterisiert. Die am ITEP aufgebaute, für hohe Drücke optimierte Quecksilber-Diffusionspumpe ging in Betrieb und funktioniert ausgezeichnet.

In der **Ausbildung** betreuten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP 2019 insgesamt 36 Doktoranden und elf Masteranden.

Unser ganz besonders herzlicher Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ITEP sowie allen Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie für die ausgesprochen vertrauensvolle und erfolgreiche Zusammenarbeit im Jahr 2019.

Herzlichst

Ihre Institutsleitung



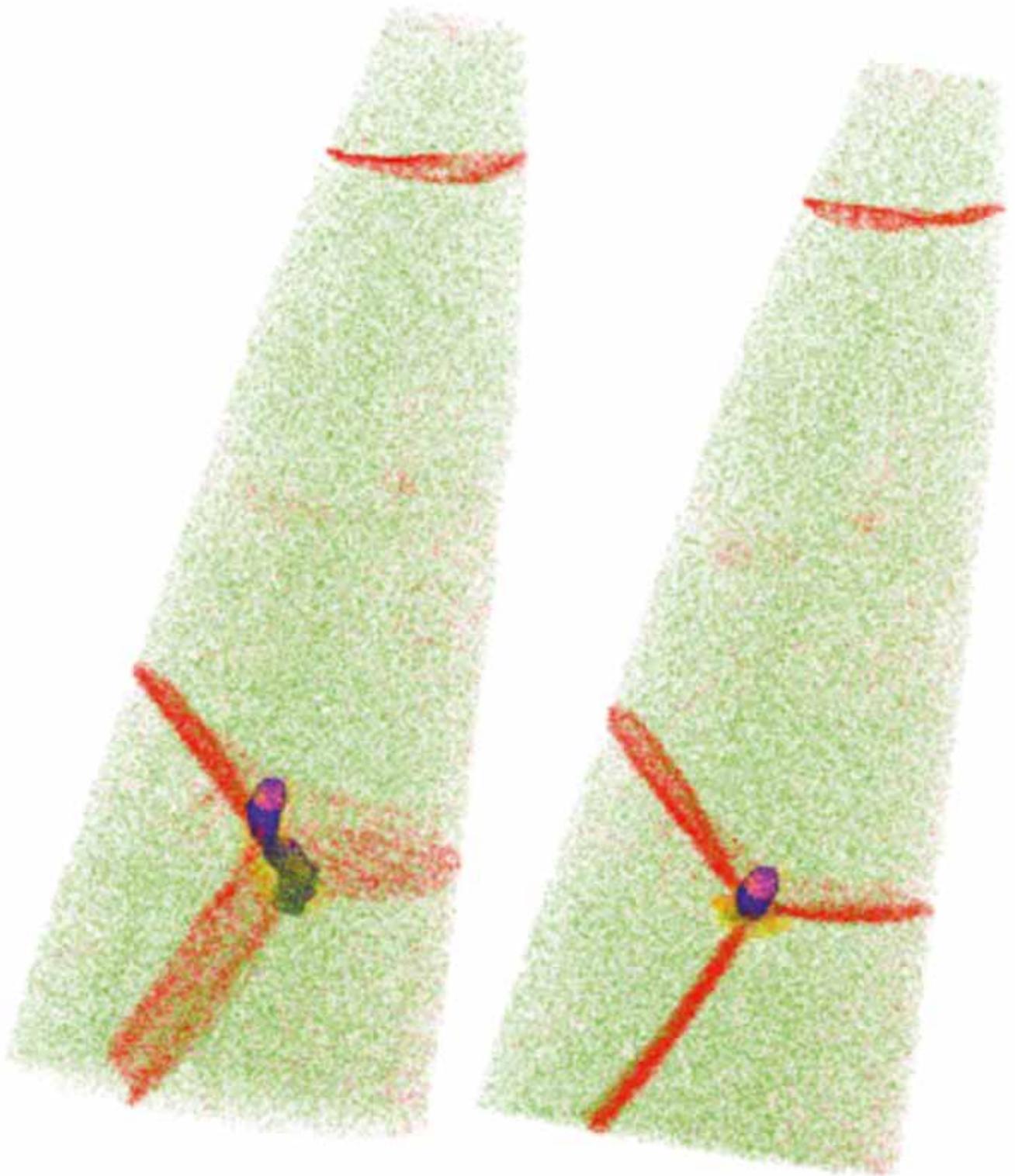
Mathias Noe



Bernhard Holzapfel



Tabea Arndt



Atomsondentomographie eines intern oxidierten Nb<sub>3</sub>Sn Niedertemperatursupraleiters gefertigt nach dem Powder-in-tube-Verfahren (PIT). Grün: Supraleitende Matrix, rot: Cu-Segregation an den Korngrenzen. Entlang der Schnittlinie dreier Korngrenzen wurden oxidische Ausscheidungen (gelb und violett) durch Umhüllen mit einer Iso-Fläche hervorgehoben. Die Probendimensionen betragen ca. 80 nm x 200 nm. Probe und Auswertung bereitgestellt durch BRUKER EAS, ITEP und KNMF

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleiter- und Kryo-Materialien

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

Das Verständnis supraleitender Materialien und die Charakterisierung von Materialeigenschaften bei kryogenen Temperaturen sowie die Realisation von Leiterstrukturen bilden die Grundlage jeder supraleitenden Energie- oder Magnetanwendung. Daher bearbeitet das ITEP im Forschungsfeld Supraleiter- und Kryomaterialien aktuell folgende Forschungsthemen:

- Supraleitende Materialien
- Kryo-Strukturmaterialien
- Kryogene Stoffeigenschaften
- Leiterentwicklung

### Supraleitende Materialien

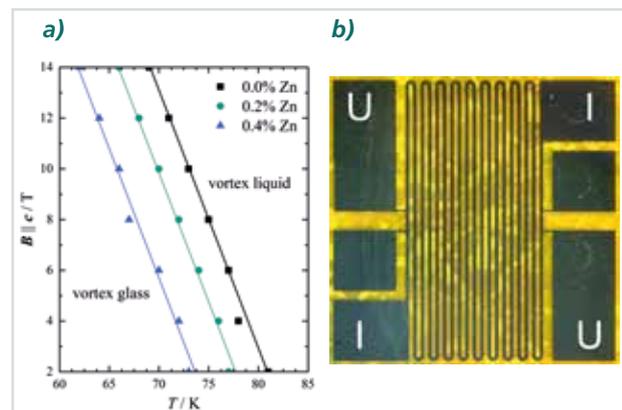
Zu den Schwerpunkten dieses Forschungsthemas gehören sowohl grundlegende materialwissenschaftliche Fragen, wie die Verbesserung der elektrischen Transporteigenschaften etablierter Supraleitermaterialien, als auch anwendungsorientierte Untersuchungen an vielversprechenden Supraleitern sowie die industriennahe technologische Weiterentwicklung der HTS-Bandleiterherstellung.

### Materialforschung

**Hochtemperatur-Supraleiter.** Der Sauerstoffgehalt von  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Schichten (RE – Seltene Erde) stellt einen wesentlichen Parameter für die Güte der supraleitenden Eigenschaften dar. 2019 wurde deshalb der Sauerstoffbeladungsvorgang für Schichten mit verschiedener Mikrostruktur – gewachsen mit chemischer Lösungsabscheidung (CSD) und gepulster Laserdeposition (PLD) – im Detail untersucht. Zum Optimieren dieses Prozesses wurden elektrische Relaxationsmessungen an CSD-Proben durchgeführt, um die Kinetik der Sauerstoffdiffusion zu messen. Die Sauerstoffdiffusion erfolgt in zwei klar unterscheidbaren Regimen – hohe und niedrige Temperaturen – mit unterschiedlichen Aktivierungsenergien. Die Übergangstemperatur zwischen beiden Regimen hängt charakteristisch von der Seltenen Erde und eventuellen Nanopartikelzusätzen ab. Sie lässt sich mit dem sogenannten Ortho-I-Ortho-II-Übergang zwischen verschiedenen Sauerstoffordnungsstrukturen korrelieren. Diese Informationen können weiterhin dazu dienen, den Sauerstoffbeladungsprozess so kostengünstig und schnell wie möglich zu gestalten.

Nicht nur der Sauerstoffgehalt in der Schicht, sondern auch die Details des Beladevorgangs bestimmen entscheidend die supraleitenden Eigenschaften, da während der Sauerstoffbeladung, abhängig von Sauerstoffdruck, Temperatur und Haltezeit, unterschiedliche Defektstrukturen, unter anderem Stapelfehler und  $\text{RE}_2\text{O}_3$ -Partikel, eingebaut werden. Dies wurde an mit gepulster Laserde-

position gewachsenen  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-2.5\text{wt}\%}\text{BaHfO}_3$ -Nanokompositen untersucht. Bei diesen wurde durch die Optimierung der Sauerstoffbeladung die kritische Stromdichte um den Faktor 2 gesteigert.

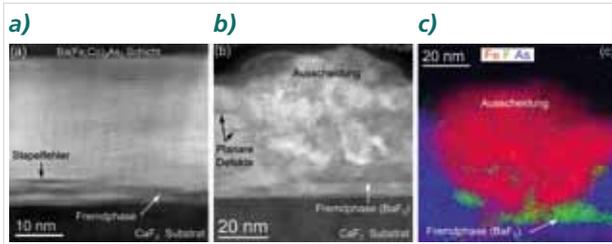


**Abb. 1: (a) Glas-Liquid-Übergang von  $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{O}_{6+\delta}$ -Schichten in Abhängigkeit vom Zn-Gehalt. (b) Mäanderstruktur für die höher aufgelösten elektrischen Transportmessungen.**

Magnetanwendungen erfordern speziell für tiefe Temperaturen ausgelegte Pinninglandschaften in  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ -Bandleitern. Da die Kohärenzlänge  $\xi_{\text{GL}}$  in diesem Temperaturbereich besonders klein ist, sind atomare Defekte äußerst vielversprechend, um die Pinningkraftdichten weiter zu erhöhen. Um die zugrundeliegenden Pinningeffekte besser zu verstehen, wurden Glas-Liquid-Phasenübergänge (Abbildung 1a) und Pinningkraftverteilungen von  $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{O}_{6+\delta}$ -Schichten untersucht [Ackermann et al., J. Phys. Conf. Ser. 2020]. Die etwa 250 nm dicken Schichten wurden dafür mäanderförmig strukturiert (Abbildung 1b) und elektrisch charakterisiert. Durch die Zn-Dotierung verringerte sich  $T_c$  um etwa 15 K/%, was gut mit Literaturwerten vergleichbar ist. Die Pinningkraftverteilung in diesen Schichten war weitgehend temperaturunabhängig. Die Aktivierung der Pinningzentren geschieht demnach ausschließlich in einem schmalen Temperaturbereich knapp unterhalb von  $T_c$ .

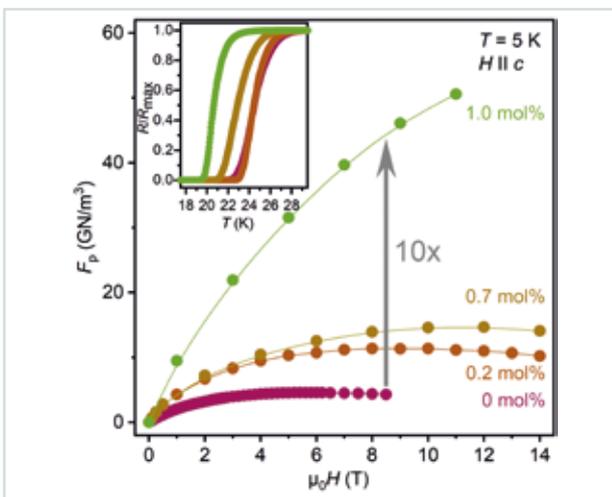
**Fe-basierte Supraleiter.** Die Mikrostruktur von  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ -Schichten, hergestellt durch gepulste Laserdeposition, wurde anhand von Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM) an Querschnittsproben untersucht (Abbildung 2). Die supraleitenden Schichten wachsen im Fall von  $\text{CaF}_2$  epitaktisch auf dem Substrat und bilden eine homogene Schichtdicke (Abbildung 2a). Planare Defekte, meist Stapelfehler, sind als dunkle horizontale Linien erkennbar und könnten die supraleitenden Eigenschaften durch Abbau von Verspannungen verbessern. Zusätzlich formen sich eisenreiche

Ausscheidungen und andere Fremdphasen (beispielsweise  $\text{BaF}_2$ ) in den Schichten (Abbildung 2b). Die Zusammensetzung wurde aus hochaufgelösten STEM-Bildern sowie mithilfe energiedispersiver Röntgenspektroskopie ermittelt (Abbildung 2c). Diese Ausscheidungen, deren Wachstum stark von den Depositionsparametern abhängt, wurden ebenfalls in Röntgenbeugungsuntersuchungen detektiert und bestimmt und zeigten sich in oberflächentopographischen Aufnahmen mit Rasterkraftmikroskopie.



**Abb. 2: STEM-Querschnittsaufnahmen einer  $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$ -Schicht. (a) Epitaktisches Wachstum der Schicht auf dem Substrat mit Defekten und Fremdphasen an der Grenzfläche. (b) Lokal größere Ausscheidungen in der Schicht, bestehend hauptsächlich aus Eisen, wie durch eine chemische Analyse mit STEM-EDXS (c) nachgewiesen. Das Arsenisignal markiert die  $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$ -Hauptphase.**

Für Untersuchungen zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit wurden 35 nm bis 110 nm dicke  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ -Nanokompositschichten mit  $\text{BaHfO}_3$ -Nanopartikeln durch Quasimultilagenteknik in gepulster Laserdeposition hergestellt [Meyer et al., et al., J. Phys. Conf. Ser. 2020]. Dabei wechseln sich vollständige  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ -Lagen und unvollständige  $\text{BaHfO}_3$ -Lagen ab. Die kritischen Temperaturen fallen mit wachsendem  $\text{BaHfO}_3$ -Gehalt leicht von 23 K auf 19 K. Die kritische Stromdichte  $J_c$  hingegen steigt mit wachsendem  $\text{BaHfO}_3$ -Gehalt signifikant an und erreicht beinahe  $10^6 \text{ A/cm}^2$  im Eigenfeld beim höchsten untersuchten  $\text{BaHfO}_3$ -Gehalt von 1 mol%. Die Pinningkraftdichten  $F_p$  erhöhen sich ebenfalls auf das Zehnfache und erreichen  $50 \text{ GN/m}^3$  bei 11 T und 1 mol%  $\text{BaHfO}_3$  (Abbildung 3).

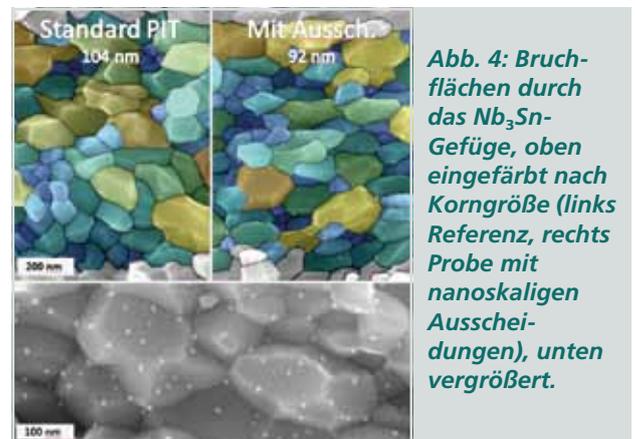


**Abb. 3: Magnetfeldabhängigkeit der Pinningkraftdichte von  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ - $\text{BaHfO}_3$ -Nanokompositschichten für verschiedene  $\text{BaHfO}_3$ -Konzentrationen.**

$\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ -Schichten, wie auch eine  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - $\text{BaHfO}_3$ -Nanokompositschicht, wurden ebenfalls in gepulsten Feldern bis 65 T im Hochfeldlabor Los Alamos hinsichtlich der kritischen Felder und der kritischen Stromdichten untersucht. Dafür wurden ähnliche Mäander wie in Abbildung 1b strukturiert, jedoch auf kleinerer Fläche. Strom-Spannungs-Kennlinien wurden während des Magnetpulses nach einer neuartigen in Los Alamos entwickelten Technik [Leroux et al. Phys. Rev. Appl. 11, 054005 (2019)] gemessen. Weitere Messreisen für diese Untersuchungen sind für 2020 geplant.

In „HiperFBS“, einem DFG-geförderten bilateralen Projekt mit dem Institut für Elektrotechnik der Chinesischen Akademie der Wissenschaften Peking, das im April 2019 startete, werden Bänder und Drähte aus Fe-basierten Supraleitern für Hochfeldanwendungen entwickelt. In diesem Rahmen wurden mehrere Bänder des Kooperationspartners hinsichtlich Mikrostruktur und Stromtragfähigkeit vermessen. Weitere bilaterale Kooperationen zu Fe-basierten Supraleitern laufen mit der Gruppe Kazumasa Iida an der Universität Nagoya und der Gruppe Xiaoli Dong am Institut für Physik der Chinesischen Akademie der Wissenschaften Peking. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde die Anisotropie der elektrischen Transporteigenschaften von  $\text{NdFeAs}(\text{O},\text{F})$ - bzw.  $(\text{Li},\text{Fe})\text{OHFeSe}$ -Schichten in Magnetfeldern bis 14 T im Detail untersucht.

**$\text{Nb}_3\text{Sn}$ .** In einer Forschungskooperation zwischen Bruker, dem CERN und dem KIT zu  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Niedertemperatur-Supraleitern lag 2019 der Schwerpunkt auf der gezielten Erzeugung und Charakterisierung von nanoskaligen Ausscheidungen (Abbildung 4) in der supraleitenden Phase. Dabei zeigte sich, dass diese Ausscheidungen als künstliche Pinningzentren wirken und das Potenzial haben, die Stromtragfähigkeit von bestehenden Leiterkonzepten um mehr als 70 % zu steigern [Bühler et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 2020]. Das entstehende Gefüge wurde mit Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie sowie Atomsondentomografie analysiert. Parallel dazu wurden Prototypen neuartiger Leiterkonzepte für die Auswertung hergestellt, die zusätzlich zur Erzeugung von feinen Ausscheidungen auf eine Kornfeinung im  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Gefüge abzielen.



**Abb. 4: Bruchflächen durch das  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Gefüge, oben eingefärbt nach Korngröße (links Referenz, rechts Probe mit nanoskaligen Ausscheidungen), unten vergrößert.**

## Technologieentwicklung

**HTS-Bandleiterherstellung.** In einem Kooperationsprojekt mit der Deutschen Nanoschicht GmbH wurden 2019 durch Umbauten und Optimierung des Reel-to-Reel-Ofens Beschichtung und Pyrolyse gegenüber 2018 er-

heblich verbessert. Die Röntgenanalyse nach der Kristallisation zeigte, dass die Probe 2019 deutlich höhere Intensitäten der gewünschten (001)-Orientierung und zugleich wesentlich weniger fehlorientierte (200)- und (103)-Anteile aufwies als 2018. Somit ist es nun erstmals gelungen, den gesamten CSD-Prozess zur kontinuierlichen Herstellung von supraleitenden YBCO-Bandleitern zu realisieren. Die noch sehr geringen Werte für die kritische Stromdichte machen allerdings weitere Optimierungen zwingend notwendig.

**Charakterisierung.** Im Rahmen mehrerer EU-Projekte wie ASuMED und SuperWind sowie bilateraler Kooperationen wurde die Stromtragfähigkeit von  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Bandleitern verschiedener Hersteller (THEVA, SuperOx, SuperPower, Shanghai Creative SC) in Feldern bis 6 T und Strömen bis 1000 A [Lao et al., Rev. Sci. Instr. 90, 015106 (2019)] gemessen. Weiterhin wurden neuartige THEVA-Bandleiter mit reduzierter Substratdicke von 50  $\mu\text{m}$  im Hochfeldlabor in Grenoble in Feldern bis 20 T getestet. Dabei zeigte sich, dass die supraleitenden Eigenschaften mit denen der dickeren Bänder vergleichbar sind, bis auf Feldorientierungen parallel zu den ab-Ebenen, was sich durch die großen Lorentzkräfte erklären lässt. Im Rahmen des EU-Projekts FastGrid wurden an THEVA-Bandleitern, die für supraleitende Fehlerstrombegrenzer optimiert worden waren, Biegeversuche bei 77 K durchgeführt. Minimal mögliche Biegeadien von 1,25 cm (Zug) und 0,5 cm (Druck) ohne Degradation sind vielversprechend.

Kontakt: Jens.Haenisch@kit.edu

## Kryo-Strukturmaterialien

Hochfeste Strukturmaterialien für kryogene Magnetanwendungen sind grundlegend für die Fusionstechnologie und werden im Rahmen eines Enabling Research Projekts gefördert. Die additive Fertigung besitzt enormes Potenzial für kryogene Anwendungen. 2019 wurden die bisherigen Arbeiten durch Ermüdungstests an additiv hergestellten 316LN-Proben ergänzt. Grundlegende Untersuchungen zum Verständnis der Verformungsmechanismen bei kryogenen Temperaturen von speziellen Senkov-Legierungen werden innerhalb eines DFG Projekts weitergeführt.

**Enabling Research Projekt „High Strength Materials“.** Das in diesem Forschungsthema erfolgreich eingeworbene Projekt wird von EUROfusion gefördert und startete im Januar 2019. Wesentlicher Hintergrund ist die Verbesserung der kryogenen mechanischen Eigenschaften austenitischer Stähle – in diesem Fall 316LN – durch spezifische Umformungsprozesse. Die Arbeiten werden im CryoMaK Labor unter der Federführung des ITEP durchgeführt und sind in drei Arbeitspakete aufgeteilt. Im ersten Arbeitspaket wird die Möglichkeit der Mikrostrukturbeeinflussung durch sukzessives kaltes und heißes Schmieden untersucht. Stahlproben wurden bei der Firma COMTES in Tschechien hergestellt. Durch die gezielte Variation der Prozessparameter wurde die Korngröße erfolgreich von anfangs rund 80  $\mu\text{m}$  auf rund 19  $\mu\text{m}$  reduziert. Damit wurden die mechanischen Eigenschaften bei 77 K gegenüber den Raumtemperaturwerten signifikant erhöht. Für eine umfassende Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften sind weitere Experimente in Vorbereitung, wie Zugversuche bei flüs-

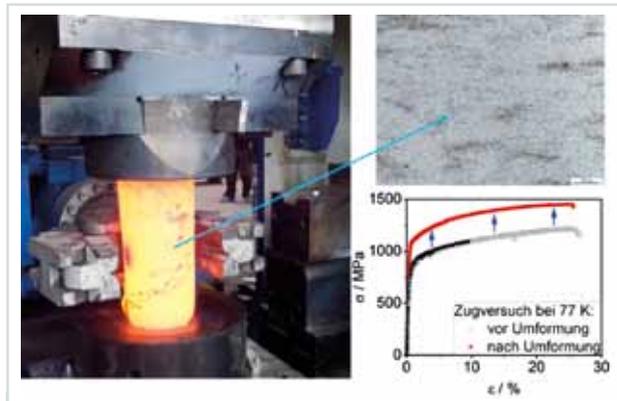


Abb. 5: Geschmiedetes 316LN; Mikrostruktur (Korngröße ca. 20  $\mu\text{m}$ ) und mechanischer Zugtest.

sigem Helium sowie bruchmechanische Untersuchungen. Im zweiten Arbeitspaket wird das Potenzial des kryogenen Walzens als Umformungsprozess zur gezielten Einstellung der Mikrostruktur betrachtet. Dieser Prozess wurde bei der Technischen Universität Kosice in der Slowakei durchgeführt. Platten mit einer Dicke von 15 mm wurden durch Walzen um 30 % und 50 % verformt. Der Prozess wurde mit ungekühlten Platten bei Raumtemperatur sowie auf 77 K vorgekühlten Platten durchgeführt; die Ergebnisse wurden verglichen. Erste Ergebnisse zeigen einen deutlichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften bezüglich der Festigkeit in Walzrichtung. Speziell die auf 77 K vorgekühlten Platten zeigen eine enorme Erhöhung der Streckgrenze um nahezu 100 %. Derzeit laufen Untersuchungen, um die Effekte der Walzumformung auf die Mikrostruktur zu beschreiben. Ebenso sind weitere kryogene Tests bezüglich bruchmechanischer Eigenschaften vorgesehen. Im Rahmen des dritten Arbeitspakets sollen 2020 die geschilderten Umformungsprozesse auf alternative Legierungen übertragen und das Potenzial für die Herstellung von Komponenten für kryogene Anwendungen analysiert werden.

**Additive Fertigung von 316L.** Nach der erfolgreichen Herstellung durch Powder Bed Fusion und ersten Zugversuchen bei kryogenen Temperaturen wurden die bruchmechanischen Eigenschaften untersucht, speziell das Ermüdungsverhalten bei tiefen Temperaturen. Diese Tests zeigen deutlich eine Problematik des Herstellungsprozesses: Beim Verschmelzen des Pulvers durch einen Laser werden verteilt Fehlstellen in der Grö-

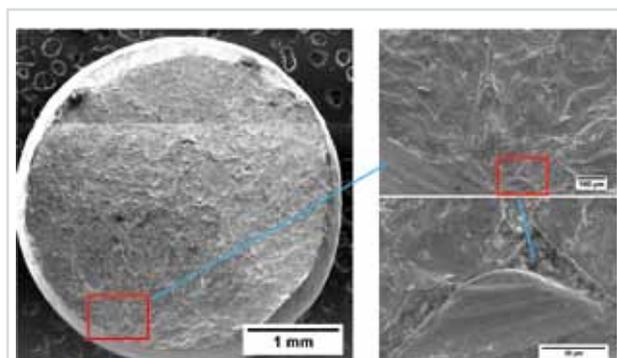
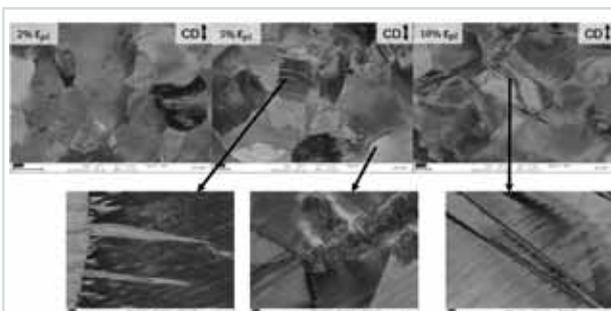


Abb. 6: Bruchfläche nach Ermüdungstest von additiv hergestelltem 316L. Versagen initiiert bei gezeigter Fehlstelle.

Benordnung des Durchmessers der Pulverpartikel – ca. 40  $\mu\text{m}$  – erzeugt. Bei Ermüdungsversuchen führt dies zu einem frühzeitigen Versagen unter zyklischer Last. Detaillierte Untersuchungen dieser makroskopischen Fehler werden nun zusammen mit dem Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde (IAM-WK) des KIT vorgenommen. Der Herstellungsprozess soll für dieses Material angepasst werden.

**DFG-Projekt „High Entropy Alloys“.** Nach der erfolgreichen Synthese der kubisch raumzentrierten High-Entropy-Legierung HfNbTaTiZr, auch Senkov Legierung genannt, wurden weiterführende Untersuchungen zum Ursprung der Tieftemperatureigenschaften vorgenommen. Mechanische Kompressionsexperimente wurden bei kryogenen Temperaturen durchgeführt; die Entwicklung der Mikrostruktur wurde analysiert. Dabei zeigten sich Bandstrukturen in den Körnern, deren Winkelabweichung weiterer Analyse bedarf, um einen Verformungsmechanismus beschreiben zu können. Zusammen mit dem Institut für Angewandte Materialien (IAM-WK) des KIT werden in 2020 diese Arbeiten fortgeführt.



**Abb. 7: Senkov-Proben nach schrittweiser Verformung durch Kompression (2 %, 5 %, 10 %), Entwicklung von Bandstrukturen innerhalb der Körner.**

Kontakt: Klaus.Weiss@kit.edu

## Kryogene Stoffeigenschaften

Im Rahmen der Technologieentwicklung kryogener Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles – CMRC) für HTS-Anwendungen wurde in Kooperation mit dem Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) des KIT eine erste Doktorarbeit abgeschlossen [1]. Grundlage der Technologie sind die physikalischen Eigenschaften und die Einsatzgrenzen kryogener Stoffgemische, die bisher nicht ausreichend untersucht wurden. Dafür wurde die Versuchsanlage CryoPHAEQTS (Cryogenic Phase Equilibria Test Stand) in Betrieb genommen, mit der künftig die Eigenschaften aller kryogenen Stoffgemische bei Temperaturen bis 15 K und bei Drücken bis 150 bar untersucht werden können. Die experimentellen Daten bilden die Grundlage für die Entwicklung von Zustandsgleichungen, die das reale Stoffverhalten der Gemische für die Prozessauslegung und -optimierung beschreiben.

Im Rahmen weiterer Doktorarbeiten wurde die Entwicklung der Modellumgebung zur Auslegung von CMRC-Wärmeübertragern abgeschlossen und wurden erste Prototypen von mikrostrukturierten CMRC-Wärmeübertragern, die in Kooperation mit dem Institut für

Mikroverfahrenstechnik (IMVT) des KIT entwickelt worden waren, erfolgreich getestet.

Kontakt: Steffen.Grohmann@kit.edu

[1] Kochenburger, T.: Kryogene Gemischkältekreisläufe für Hochtemperatursupraleiter-Anwendungen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2019, isbn: 978-3-8439-3987-4.

## Leitertechnologie

Zum Forschungsthema Leitertechnologie wurde 2019 die Weiterentwicklung der HTS CrossConductor (HTS CroCo)-Fertigung durch ein Technologietransfer-Vorprojekt signifikant verbessert. Neue Fertigungsansätze wurden erfolgreich erprobt. In weiteren Testkampagnen des supraleitenden Hochstrom-Demonstrators (Supra-DC-Demonstrator) wurde ein Konstantstrombetrieb bei 36 kA über einen Zeitraum von über 39 Minuten demonstriert. Für eine Vielzahl von Projekten zu unterschiedlichen Forschungsthemen wurden spezielle Probengeometrien laserstrukturiert und weitere Roebel-Kabel für das CERN gefertigt.

**Technologietransfer-Vorprojekt „CroCo4Industry“.** Dieses Projekt verfolgte das Ziel, durch mehrere Detailverbesserungen den Reifegrad der HTS CroCo-Fertigung zu erhöhen und bisher nicht verfolgte Ansätze zu testen, die als unverzichtbar für einen Markteintritt gelten. Zunächst wurde die Fertigungsanlage an einen neuen, dauerhaften Standort in Bau 408 umgezogen; die Fertigungstoleranzen wurden signifikant reduziert. Abbildung 8 zeigt Schliffbilder an im Rahmen dieses Projekts entstandenen Proben aus 2 mm und 3 mm breiten Bändern. Diese Maße entsprechen den derzeit geringsten kommerziell erhältlichen REBCO-Bandleiterbreiten. Entsprechend fallen absolute Toleranzen in der Fertigung relativ betrachtet besonders deutlich ins Gewicht. Die Geometrie des Kreuzes und die Rundheit des Lotmantels sind hervorragend ausgeprägt, Abweichungen von der idealen Form liegen im Bereich von weniger als 0,1 mm. Messungen des kritischen Stroms im Flüssigstickstoffbad bestätigen die erwarteten und aus den Banddaten berechneten kritischen Ströme.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts lag auf der Realisierung eines Testaufbaus zur Fertigung von nicht gewickelten HTS CroCos im Rolle-zu-Rolle-Verfahren, das heißt, die Bandleiter werden von Vorratsspulen abgewickelt, zum HTS CroCo geformt und dieser anschließend wieder auf einer Haspel aufgespult. Aus Kostengründen wurden nur Leiter mit zwei bis vier supraleitenden Bändern hergestellt; der Rest des Bandmaterials bestand aus Kupfer. Abbildung 9 zeigt eine Momentaufnahme



**Abb. 8: Schliffbild eines HTS CroCos aus 2 mm und 3 mm breiten Bändern. Die Kreuzgeometrie und die runde Lothülle sind nahezu perfekt ausgebildet.**

eines Fertigungslaufs: Im Vordergrund ist die Haspel mit einigen Windungen bereits gefertigten HTS CroCos zu sehen, im Hintergrund sind die Bandleiter-Vorratsspulen zu erkennen.

**Supra-DC-Demonstrator.** Am supraleitenden Hochstrom-Kabel-Demonstrator wurden 2019 zwei Testkampagnen durchgeführt. Nach Verbesserung der Anschlüsse wurde ein kritischer Strom von 33 kA erreicht. Die elektrischen Felder der einzelnen zwölf HTS CroCos wurden gemessen und mit den berechneten Erwartungswerten verglichen. Die Messung am Supra-DC-



Abb. 9: Fertigung von HTS CroCos im Rolle-zu-Rolle-Verfahren.

Kabel und die zuvor berechneten Erwartungswerte stimmen sehr gut überein, wie in Abbildung 10a dargestellt ist. Darüber hinaus wurde die Stabilität des Demonstrators bei Konstantstrombetrieb untersucht; der Demonstrator wurde dabei mit einem Strom von 36 kA für mehr als 39 Minuten beaufschlagt, ohne dass es zum

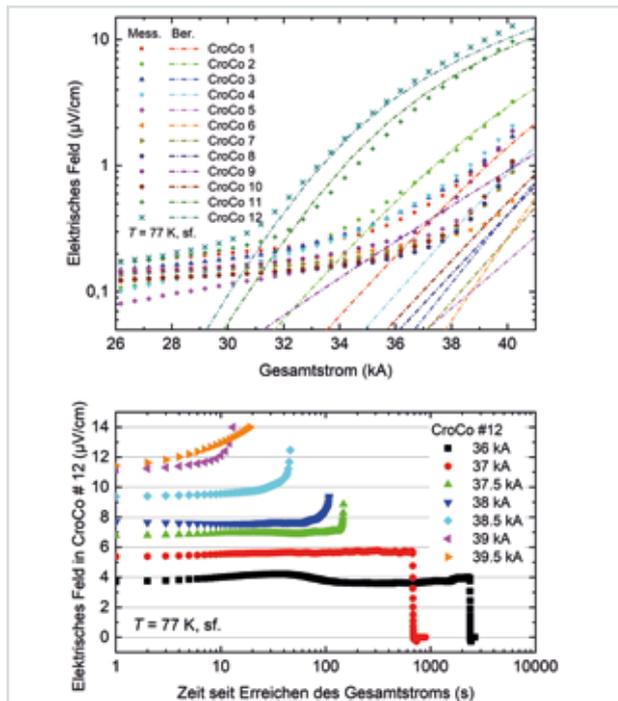


Abb. 10: (a) Verlauf des elektrischen Felds in den zwölf HTS CroCos des Supra-DC-Kabel-Demonstrators bei einer Stromrampe bis 40 kA. (b) Zeitlicher Verlauf des elektrischen Felds in HTS CroCo #12 für verschiedene Stromstärken.

Quench des Kabels, das heißt zum Zusammenbruch der Supraleitung durch eine sich selbst verstärkende Temperaturerhöhung kam. Für Ströme von mehr als 37 kA wurde kein stabiler Betrieb mehr erreicht, und nach einer stromabhängigen Zeitspanne wurde eine fortschreitende Zunahme der Spannung in einzelnen Leitern beobachtet, die dann zur Stromabschaltung führte. Abbildung 10b zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung in HTS CroCo # 12, dem CroCo mit der höchsten Spannung in allen HTS CroCos.

Anhand eines neu entwickelten Anschlusskonzepts wurde in einer weiteren Testkampagne ein anwendungsnäheres Kabeldesign untersucht. Dabei wurden alle HTS CroCos in einen gemeinsamen Kontaktblock gelötet, der dann mit dem Netzgerät verbunden wurde. Damit wurde der Vorwiderstand in jedem einzelnen Teilleiter des Supra-DC-Kabels um etwa eine Größenordnung gegenüber dem vorangegangenen Test reduziert. Durch die resultierende verbesserte Stromaufteilung zwischen den einzelnen Teilleitern wurde der kritische Strom des Demonstrators erst bei 38 kA erreicht, und der Übergang zur Normalleitung geschah bei einem geringeren Stromintervall. Dies ist in Abbildung 11 dargestellt.

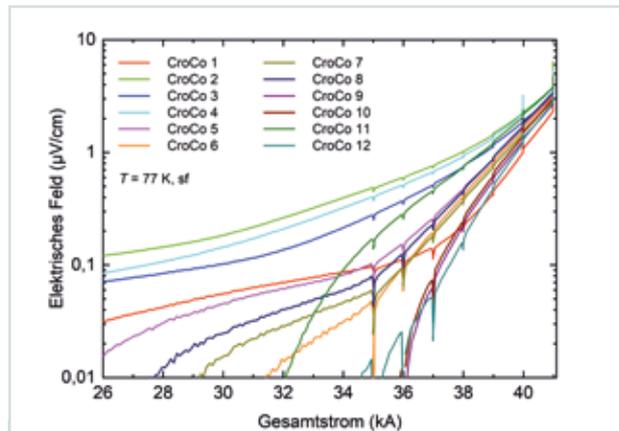


Abb. 11: Verlauf des elektrischen Felds in den zwölf HTS CroCos des Supra-DC-Kabel-Demonstrators mit anwendungsnäherem Anschlusskonzept bei einer Stromrampe bis 41 kA.

**Roebel-Kabel für „EuCARD2-FUM“.** Für dieses Projekt wurden zunächst verschiedene von der Firma Bruker gefertigte REBCO-Bandleiter in Roebel-Geometrie gestanzt. Anschließend wurden die Bänder von Bruker versilbert und rundherum elektrolytisch mit Kupfer beschichtet. Mit einer halbautomatischen Verseilmaschine wurden die Roebel-Strands anschließend am ITEP zu Roebel-Kabeln verseilt und an das CERN geliefert. Die FEATHER.M2.3-4 Testspule, die am CERN aus einem solchen Roebel-Kabel gewickelt wurde, erreichte ein Feld von 4,2 T bei 4,5 K.

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu



Installation eines 60 kW-3,6 kWh-Schwungmassenspeichers für das Energy Lab 2.0 am KIT.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Energietechnische Anwendungen der Supraleitung

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

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

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

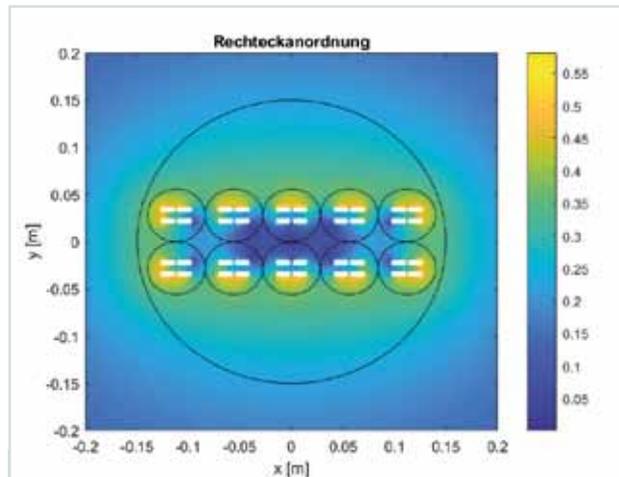
### Supraleitende Netzkomponenten

Der Schwerpunkt im Thema Supraleitende Netzkomponenten liegt auf der Entwicklung neuartiger Betriebsmittel für Elektroenergiesysteme. Dazu erzielten die Forscher im Jahr 2019 die folgenden Ergebnisse.

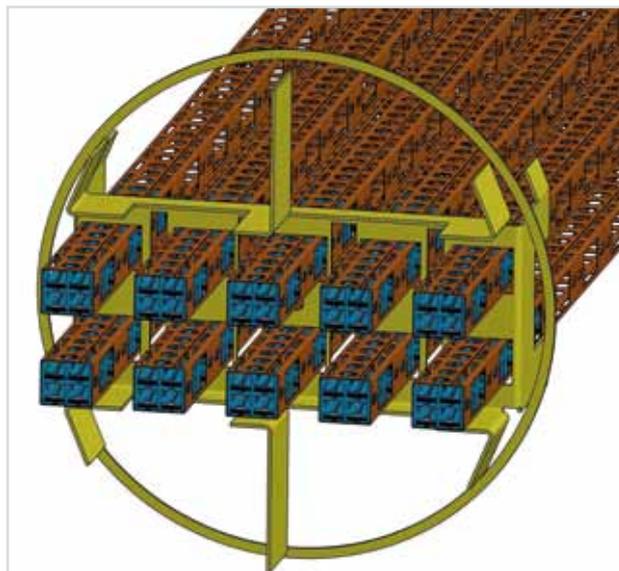
**EU-Projekt FASTGRID.** Dieses Projekt ([www.fastgrid-h2020.eu](http://www.fastgrid-h2020.eu)) zielt darauf, supraleitende Bandleiter für die Anwendung in DC-Strombegrenzern deutlich weiterzuentwickeln, hin zu höheren Schaltleistungen und höheren Strömen. Gegenüber dem gegenwärtigen Stand der Technik sind dazu Modifikationen in der Leitergeometrie erforderlich. Das ITEP führte 2019 zahlreiche Experimente und Simulationen des Schaltverhaltens durch. Das AC- und das DC-Schaltverhalten des supraleitenden Bandleiters wurden gegenübergestellt, der Unterschied wurde ermittelt, die Notwendigkeit einer ausreichenden Leiterstabilisierung wurde demonstriert. Trotz umfangreicher Untersuchungen und Modifikationen an Leiter und Testaufbau konnten die anvisierten hohen Schaltleistungen bis jetzt noch nicht reproduzierbar erreicht werden.

Weiterhin wurde im Rahmen des Projekts in einer gemeinsam mit dem Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT betreuten Doktorarbeit eine umfassende Lebenszyklusanalyse für die Herstellung eines supraleitenden Bandleiters vorgenommen. Dabei wurde der Herstellprozess detailliert erfasst und analysiert, um daraus verschiedene Umwelteinflussfaktoren abzuleiten. Die Untersuchung zeigt den großen Einfluss des Substrats. Da die meisten Hersteller derzeit die Substratdicke weiter reduzieren, wird dieser Anteil weiter abnehmen. Im Vergleich zu Kupfer und Aluminium ergeben sich bei der Herstellung von supraleitenden Bandleitern geringere Umwelteinflüsse.

**BMW-Verbundprojekt DEMO200.** Am 1. Juli 2019 startete das vom BMWi geförderte Verbundprojekt DEMO200. Gemeinsam mit den Partnern Vision Electric Superconductors, Messer, Trimet, d-nano und Theva verfolgt das ITEP das Ziel, die Technologie für eine kompakte und effiziente Industriestromschiene mit einer Stromstärke von 200.000 A zu entwickeln und ihre Funktionsfähigkeit in einem Test zu demonstrieren.



**Abb. 1: Magnetfeldberechnung zur Anordnung von rund 500 supraleitenden Bändern für eine Stromschiene mit 200 kA.**



**Abb. 2: Konstruktive Anordnung von zehn 20 kA-Modulen für eine supraleitende 200 kA-Stromschiene**

Das ITEP hat innerhalb des Projekts die Aufgabe übernommen, die supraleitenden Bandleiter zu charakterisieren, die grundlegende Geometrie und die Kontakte mit zu entwickeln und einen Test an einem skalierten Stromschienelement durchzuführen. Abbildung 1 zeigt Magnetfeldrechnungen zur Optimierung der Anordnung und des Supraleiterbedarfs. Um 200 kA zu erreichen, müssen derzeit etwa 500 Bandleiter parallel geschaltet werden. Abbildung 2 stellt eine Möglichkeit der Anord-

nung der Leiter dar, bei der die Stromschiene in zehn Submodule mit je 20 kA unterteilt ist.

Kontakt: Mathias.Noel@kit.edu

## Neue Anwendungen der Supraleitung

Die Schwerpunkte dieses Forschungsthemas liegen vor allem auf elektrischen bzw. hybridelektrischen Flugzeugantriebssystemen. Dabei arbeitet das ITEP im BMWi-Projekt TELOS mit Partnern wie Airbus und Siemens zusammen und kooperiert im Rahmen zweier Doktorarbeiten eng mit Siemens. Inhaltlich erstrecken sich die Arbeiten des Forschungsthemas von der Entwicklung eines Tools zur analytischen Auslegung und Optimierung hybridelektrischer Luftfahrtantriebe über das Design und die Konstruktion einer rotierenden elektrischen Maschine basierend auf supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid bis hin zur Entwicklung eines Leistungsverteilungssystems auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern im BMWi-Projekt TELOS. Im Rahmen des EU-Projekts ASUMED entwickelt das ITEP darüber hinaus Methoden für eine 2D-Modellierung von einzelnen Windungen in einer Motorwicklung und für die 3D-Modellierung von Motorkomponenten. Diese Arbeiten beziehen sich zwar inhaltlich ebenfalls auf elektrische Flugzeugantriebe, sind formal aber dem Forschungsthema Modellierung von Supraleitern und Komponenten zugeordnet. Im Folgenden werden die 2019 durchgeführten Arbeiten im Einzelnen vorgestellt.

Für rotierende elektrische Maschinen auf der Basis von supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid wurde ein detailliertes Motordesign erstellt. Dafür wurden ein transientes elektromagnetisches FEM-Modell, ein thermisches CFD-Modell sowie ein strukturmechanisches Modell des Motors entwickelt. Zur Evaluation der Eigenschaften von  $MgB_2$ -Leitern wurden kommerzielle 114-Filament-Leiter hinsichtlich ihrer Stromtragfähigkeit bei verschiedenen Temperaturen und Magnetfeldern charakterisiert.

Im Rahmen des BMWi-Verbundprojekts TELOS lief die Entwicklung eines zweipoligen DC-HTS-Kabels für hybridelektrische Flugzeugantriebssysteme mit einer Leistung im Bereich von 40 MW weiter. Das Kabel wird als Busbar-System ausgeführt, wobei den Kontakten und den Abzweigen besondere Aufmerksamkeit gilt. Für die einzelnen Elemente des Busbar-Systems wurde eine 3D-gedruckte Trägerstruktur aus einem nicht leitfähigen Polyamid entwickelt und getestet, die in Verbindung mit dem Kühlmedium für eine ausreichende elektrische Isolation sorgt. Darüber hinaus kann die Trägerstruktur thermische Längenänderungen von 5 mm pro m Kabellänge kompensieren und die hohen Lorentzkräfte abfangen, die bei Strömen oberhalb von 10 kA auf die Supraleiter wirken.

Für die Verbindung der Busbars wurden im TELOS-Projekt Kontakte für Supraleiterbandstapel entwickelt, die eine niederohmige Umverteilung des Stroms zwischen den einzelnen Bändern der Stapel ermöglichen sollen. Sie wurden hinsichtlich der Stromtragfähigkeit und der Längs- bzw. Querwiderstände getestet. Die Längswiderstände innerhalb einer Supraleiterebene liegen bei Zehnerstapeln aus 12 mm breiten Bändern für Überlappungen von 24 mm bei etwa 30 nΩ (Abbildung 3 und Tabelle 1). Die Querwiderstände zwischen der ersten und



Abb. 3: Schematische Darstellung eines Kontakts zweier Bandstapel mit je zwölf REBCO-Bändern.

der zehnten Ebene liegen trotz des Bandaufbaus mit isolierenden Pufferschichten bei Werten im Bereich von nur 200 nΩ. Für die Gesamtwiderstände solcher Kontakte wurden Werte im Bereich von 5 nΩ oder weniger gemessen, sodass die Verluste für Ströme von 13,3 kA weniger als 1 W betragen.

from \ to	SL01+	SL01-	SL02+	SL02-	SL05+	SL05-	SL10+	SL10-
SL01+		33,0 nΩ	23,9 nΩ	46,7 nΩ	109,5 nΩ	92,9 nΩ	169,2 nΩ	198,2 nΩ
SL01-			55,8 nΩ	77,4 nΩ	131,9 nΩ	116,3 nΩ	195,9 nΩ	218,5 nΩ
SL02+				26,8 nΩ	94,0 nΩ	77,4 nΩ	154,1 nΩ	184,1 nΩ
SL02-					73,1 nΩ	55,7 nΩ	140,4 nΩ	167,2 nΩ
SL05+						26,7 nΩ	97,6 nΩ	124,0 nΩ
SL05-							112,1 nΩ	140,3 nΩ
SL10+								35,5 nΩ
SL10-								

Tab. 1: Elektrischer Widerstand zwischen REBCO-Bändern zweier kontaktierter Bandstapel aus je zehn Bändern innerhalb einer Stapelebene ( $SLi+ \leftrightarrow SLi-$ , grün unterlegt) und zwischen verschiedenen Stapelebenen ( $SLi+/- \leftrightarrow SLj+/-$ ).

Für leitungsgekühlte Stromzuführungen von 300 K bis 20 K wurden Verlustrechnungen durchgeführt. Diese zeigten, dass die Stromzuführungen bei geeigneter Materialwahl aufgrund des stark variierenden Lastprofils während des Flugs nicht für den Maximalstrom ausgelegt werden müssen. Durch eine Reduktion des Querschnitts sinken nicht nur die Gesamtverluste; auch das Gewicht lässt sich erheblich reduzieren.

Da der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur im Rahmen des aktuellen TELOS-Projekts aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich ist, wird im Bereich der CuLTka-Anlage ein KRYO-Demonstrator aufgebaut, mit dem sich auf der Basis von gasförmigem Helium Erkenntnisse zu Temperatur- und Druckverhältnissen sowie zu Strömungswiderständen gewinnen lassen. Für diesen Demonstrator wurden nach Abschluss der Designphase Konstruktionszeichnungen erstellt und verschiedene Komponenten gefertigt bzw. extern beschafft. Im Bereich der CuLTka-Anlage wurde das Trägergestell für den KRYO-Demonstrator aufgebaut. Parallel zu diesen Arbeiten wurden die inneren Kryostatrohre mit der Trägerstruktur und den vorgesehenen Dummy-Bändern bestückt und hinsichtlich ihrer Spannungsfestigkeit getestet. Mehrere Tests zeigten, dass es bei Spannungen bis etwa 4 kV nicht zu Überschlüssen zwischen den beiden Polen des Kabels bzw. zwischen den Polen und dem geerdeten Kryostatrohr kommt.

Zur Auslegung und Optimierung des gesamten Antriebsstrangs eines hybridelektrischen Antriebssystems wurde zunächst ein analytisches Komponentenmodell für die Antriebseinheit inklusive der Leistungselektronik erstellt. Dieses wird derzeit um Modelle für Leistungsverteilung, Propeller/Fan, Getriebe, Batterie und Kühleinheit erweitert,

sodass die Wechselwirkungen der einzelnen Systeme bei der Gesamtoptimierung berücksichtigt werden können.

Kontakt: Sonja.Schlachter@kit.edu

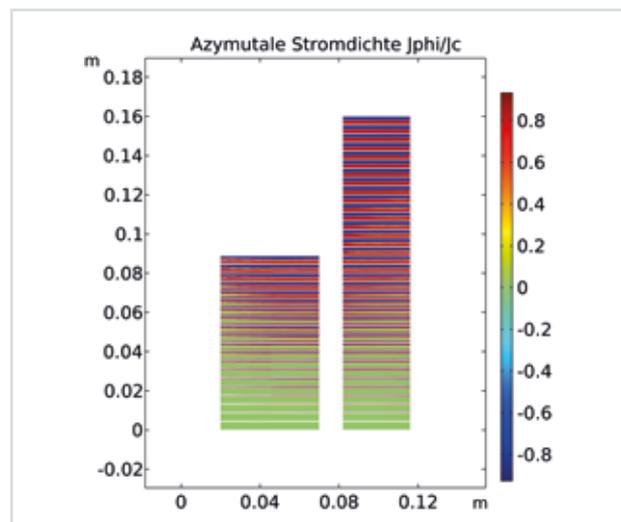
## Modellierung von Supraleitern und Komponenten

In diesem Forschungsthema geht es um die experimentelle Untersuchung des elektrothermischen Verhaltens von Pancake-Spulen beim Auftreten lokaler Erwärmungen. Dafür wurden zwei Pancake Spulen gefertigt, eine mit und eine ohne elektrische Isolierung zwischen den Windungen. Bei konstantem Strom unterhalb des kritischen Stroms wurde ein lokaler Defekt nachgebildet, indem ein Heizwiderstand auf der Oberfläche der Spulen angebracht wurde. Mithilfe des Heizwiderstands wurde durch lokale Erhöhung der Temperatur des Supraleiters ein Bereich mit reduzierter kritischer Stromdichte geschaffen. Neben den elektrischen Messungen von Spulenanschlussspannung, -strom und entwickeltem Magnetfeld wurde die fluoreszierende Wärmebildtechnik über die gesamte Spulenoberfläche eingesetzt, um Temperaturänderungen und Stromumverteilungen zu analysieren. Abbildung 4A stellt die Temperaturverteilung in der isolierten Spule nach Auftreten eines lokalen Defekts dar. Die mit einem Übergang zur Normalleitung verbundene Temperaturerhöhung trat nur in denjenigen Windungen auf, die direkt mit dem Defekt in Kontakt standen, da es keinen elektrischen Alternativpfad gab und die Wärmeleitfähigkeit durch die Kapton-Isolationsschicht reduziert wurde. In einer ähnlichen Messung an der in Abbildung 4B dargestellten nicht isolierten Spule war eine wesentlich längere Heizdauer erforderlich, um die Spule zu destabilisieren. In dieser Spule verursachte die lokale Wärmezufuhr eine Umverteilung der Ströme innerhalb der Spule – durch den vergleichsweise geringen Übergangswiderstand zu benachbarten Windungen – und führte schließlich zum normalen Übergang von der Mitte der Spule aus. Bei der Konstruktion war dies der schwächste Punkt der Spule, da an ihm sowohl ein stärkeres Magnetfeld als auch eine ohmsche Stromführung dazu beitragen, die kritische Stromdichte der Supraleiter lokal zu reduzieren.

Um die zeitvariablen Eigenschaften und das Überstromverhalten zu untersuchen und zu verstehen, wurde in MATLAB ein Multiphysik-Modell auf der Basis eines verteilten Schaltungsmodells erstellt und implementiert, das den lokalen Kontaktwiderstand, die Eigen- und Gegen-

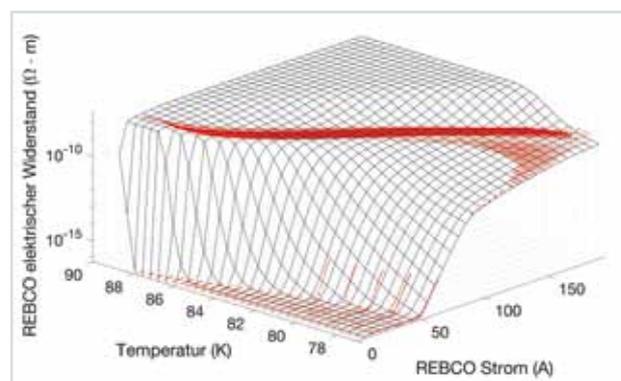
induktivität und den Widerstand des Supraleiterbands im normalleitenden Zustand berücksichtigt.

Im Rahmen des EU-Projekts ASUMED wurde ein Finite-Element-Methodenmodell auf der Basis der T-A-Formulierung in COMSOL Multiphysics implementiert und zur Berechnung der Verluste in den Statorwicklungen von voll supraleitenden Maschinen verwendet. Das Modell ermöglicht die Berechnung der zeitabhängigen Magnetfeldverteilung in der gesamten Maschine sowie zugleich der Details der Stromdichtenentwicklung in den einzelnen supraleitenden Windungen. Die T-A-Formulierung, in ihrer Form mit homogenisierten Leitern, wurde angewendet, um die Abschirmströme und die Felddrift in großen HTS-Magneten zu berechnen, beispielsweise im 32 T-Magneten des National High Magnetic Field Laboratory, dessen HTS-Einsatz aus Zehntausenden von Windungen besteht (Abbildung 5).

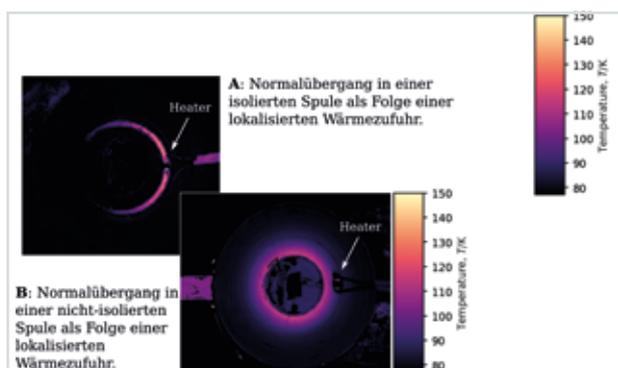


**Abb. 5: Abschirmströme im HTS-Insert des 32 T-NHMFL-Magneten, berechnet mit der homogenisierten T-A-Formulierung.**

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der EPF Lausanne verwendete das ITEP eine Kombination aus schnellen gepulsten Hochstrommessungen und numerischen Simulationen, um den spezifischen Widerstand der REBCO-Schicht aus HTS-beschichteten Leitern für Stromdichten, die  $J_c$  bei verschiedenen Temperaturen übertreffen, zu extrahieren.



**Abb. 6: Typische  $p(I,T)$ -Oberfläche für das REBCO-Material eines kommerziellen Bandleiters, rekonstruiert aus experimentell gemessenen Datenpunkten (rote Punkte) mithilfe einer Regularisierungsmethode (Gitter).**



**Abb. 4: Wärmebildverfahren zur Visualisierung und Berechnung von Temperaturen in HTS-Spulen.**

Ziel ist zu beurteilen, ob und inwieweit sich statt des bekannten Power-Law-Modells eine einfachere Beschreibung des REBCO-Widerstands zur Simulation von HTS-Bändern in überkritischen Situationen verwenden lässt. Abbildung 6 stellt eine typische  $p(I,T)$ -Oberfläche für das REBCO-Material eines kommerziellen Bandleiters dar, rekonstruiert aus den experimentell gemessenen Datenpunkten mithilfe eines Regularisierungsverfahrens.

Kontakt: Francesco.Grilli@kit.edu

## Echtzeit-Systemintegration

Im Forschungsthema Echtzeit-Systemintegration ergaben sich 2019 weitreichende Entwicklungen beim Infrastruktur- und Laborumgebungsaufbau sowie zu Sektorkopplung, angewandter Supraleitung, Energiespeichersystemen und Netzstudien.

Der Aufbau der MVA-Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Laborumgebung ist nahezu abgeschlossen. Alle 200 kVA-Module sind geliefert, aufgestellt und in Betrieb genommen. Versorgung und Primärverteilung wurden schon Anfang 2019 abgenommen, das Kühlsystem folgte bald. Die Ausgangsverteilung wurde aufgebaut. Zudem wurde eine steuerbare resistive Last angeschafft, die bei Bedarf die Gesamtleistung des Systems aufnehmen kann. Die Auslegungen induktiver und kapazitiver Lasten und weiterer Betriebsmittel wurden abgeschlossen und in Auftrag gegeben. Die Komponenten des Echtzeitsystems und der Messtechnik wurden ebenfalls erfolgreich ins System integriert. Ende 2019 gelang ein erster Closed-Loop-Betrieb von Teilen der Anlage (Abbildung 7). Die Gruppe arbeitet mit Industriepartnern intensiv daran, alle Betriebsmodi der PHIL-Anlage 2020 baldmöglichst einsatzbereit zu machen.

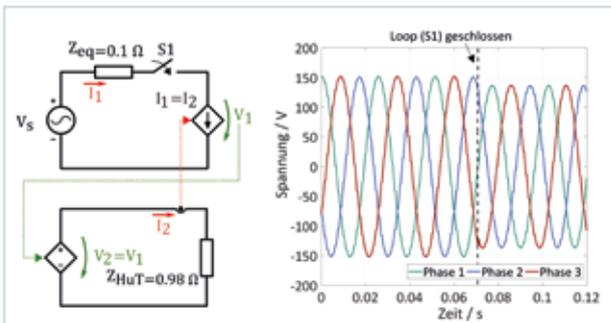


Abb. 7: PHIL Versuchsaufbau: Erster Closed-Loop-Betrieb eines 200 kVA-Moduls im MVA-PHIL-Labor.

Innerhalb des BMWi-Verbundprojekts FlyGrid, das Einsatzmöglichkeiten eines 500 kW-Schwungmassenspeichers in Verteilnetzen vorbereitet, untersuchte das ITEP Vorteile des Systems in einer Studie im Netz eines großen süddeutschen Verteilnetzbetreibers, um den optimalen Einsatz des Betriebsmittels am Aufstellort zu gewährleisten. Dafür wurde eine Untersuchung der Spannungs-Sensitivitäten basierend auf Lastflussberechnungen des Gesamtsystems mit 1264 Knoten erstellt. Anhand von lokalen Messdaten wurden die Ergebnisse mit Methoden der Datenanalytik verifiziert. So wurde das Korrelationsmaß der Mutual Information zur Abschätzung des Zusammenhangs von Spannung und Leistung verwendet. Echtzeitsimulationen der lokalen Netzum-

gebung mit einer Zeitauflösung von  $< 50 \mu\text{s}$  wurden erstellt, um transiente Effekte im PHIL-Labor zu testen. Aufstellung und Anbindung des fertigen Betriebsmittels im Energy Lab 2.0 werden zurzeit vorbereitet. Abbildung 8 zeigt die Netzdienlichkeit des Betriebsmittels am gewählten Aufstellort.

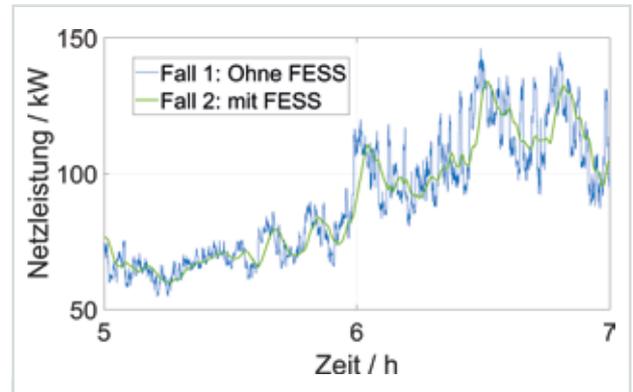


Abb. 8: FlyGrid Schwungmassenspeicher: Anwendung zur Glättung der Netzleistung für verbesserte Einbringung regenerativer Erzeugung.

Ein modulares Schwungmassen-Energiespeichersystem aus zunächst einer Einheit mit 60 kW Leistung und einer Gesamtenergiespeicherkapazität von 3,6 kWh wurde aufgestellt und ist betriebsbereit. Um in Zukunft die Aggregation von Speichern zu studieren, wurden weitere Speicherkomponenten beschafft, wie Batteriesysteme und Superkondensatoren. Hardware elektrischer Speicherkomponenten lässt sich mithilfe eines vorhandenen Systems von Imperix im Labor einbinden.

Im BMBF-Verbundprojekt Sektorkopplung (SEKO) hat das ITEP die Aufgabe, Versuchsstände mit einer Mikrogasturbine und mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) aufzubauen. Ein passendes BHKW wurde bereits beschafft. Der Aufbau des Versuchsstands des Mikrogasturbinensystems kam 2019 weit voran. Physikalische Detailsimulationen von Komponenten wie Turbine, Verbrennungsmotor und Generator sowie Untersuchungen zur Regelung der Systeme wurden erstellt. Diese Simulationen werden im nächsten Schritt auf eine Echtzeitplattform portiert.

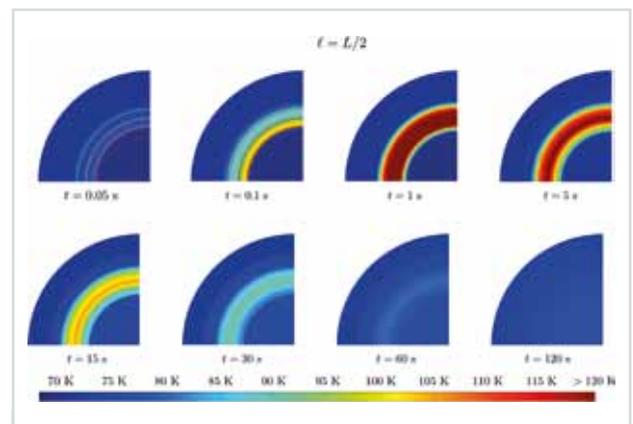


Abb. 9: Simulation eines konzentrischen dreiphasigen Kabels, bestehend aus HTS-Bändern: Temperaturen im Kabelinneren zu verschiedenen Zeiten bei der halben Kabellänge  $l = L/2 = 500 \text{ m}$ .

Innerhalb der Phase 1 des Kopernikus-Projekts ENSURE wurde die Bewertung des Einsatzes eines supraleitenden 380 kV-Kabels abgeschlossen. Diese Studie nimmt eine detaillierte Auslegung für die Anwendung im 380 kV-Drehstromnetz vor. Sie erläutert allgemeine Aspekte des Einsatzes und vergleicht die Supraleitungstechnologie unter vielen verschiedenen Kriterien mit anderen Technologien. Zur Unterstützung solcher Studien wurden detailreiche physikalische Simulationen der Betriebsmittel implementiert, die auf Hochtemperatur-Supraleitung (HTS) basieren, wie Kabel und Strombegrenzer (Abbildung 9), und auch in Echtzeit ausgeführt.

Kontakt: Joern.Geisbuesch@kit.edu

### Highlight: Fertigstellung des Gebäudes 668 und erste Inbetriebnahme des 1 MVA-Power-Hardware-in-the-Loop-Teststands

Nach zweijähriger Bauzeit wurde im Juni 2019 ein neues Laborgebäude (Abbildung 10) am KIT Campus Nord an das ITEP und das Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI) übergeben. Die Halle beherbergt das Smart Energy System Simulation and Control Center (SEnS-SiCC) für das Energy Lab 2.0. Wesentliche Bestandteile sind ein Datenanalyse- und Simulationslabor, ein modular aufgebautes Microgrid und ein vom ITEP betriebener 1 MVA-Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Teststand.



Abb. 10: Außensicht des neuen Laborgebäudes 668 für das Microgrid und die Power-Hardware-in-the-Loop-Testanlage.

Die Leistung von 1 MVA wird durch fünf 200 kVA-Module erzielt, die im Lauf des Jahres 2019 von der Firma Egston installiert wurden. Ein wichtiger Meilenstein der Inbetriebnahme wurde mit dem ersten geschlossenen Kreis im November 2019 erreicht. Das mit dem Netzsimulator von OPAL RT ausgestattete PHIL-Labor steht somit für zahlreiche Netzuntersuchungen zur Verfügung, wobei zunächst Speicherintegration und Sektorkopplung im Vordergrund stehen.

2019 ging ein 60 kVA-Schwungmassenspeicher in Betrieb (Abbildung 11). Im Frühjahr 2020 werden umfangreiche Untersuchungen im PHIL-Labor folgen. Zudem werden derzeit ein Mikro-BHKW sowie eine Mikro-Gasturbine aufgebaut; 2020 werden sich erste Untersuchungen anschließen. Die Arbeiten zielen vor allem darauf, validierte und echtzeitfähige Modelle der Komponenten bereitzustellen und die Netzintegration inklusive netzdienlicher Regelungen zu erarbeiten.

Kontakt: Joern.Geisbuesch@kit.edu



Abb. 11: Installation eines 60 kW-3,6 kWh-Schwungmassenspeichers im Energy Lab 2.0 am KIT.



*HTS-Einsatzspule beim Einkrannen in HOMER II.*

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleitende Magnettechnologie

**Koordination: Dr. Walter Fietz**

Auf der Basis des in zahlreichen Großexperimenten, wie dem Bau und Test der ITER-Modellspule TFMC, erworbenen Know-how haben sich im Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie folgende aktuelle Themen ausgebildet:

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

Um die NMR-Technik in Richtung höherer Auflösung weiter voranzutreiben, konzentriert sich das Forschungsthema Spulentechnologie auf die Realisation höchster Magnetfelder. Dazu wurde eine Einsatzspule aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) entwickelt, die im Hintergrundfeld der Hochfeldexperimentieranlage HOMER II ein Magnetfeld von über 26 T in einer Bohrung von 68 mm bereitstellt.

Im Forschungsthema HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen geht es vor allem um die Anwendung von HTS-Materialien in künftigen Fusionsmagnetsystemen. Neben der Auslegung solcher Magnete für künftige Tokamaks und Stellaratoren stehen auch Entwicklung und Test von HTS-Hochstromleitern im Fokus.

Im Forschungsthema Rotierende Maschinen werden supraleitende Statorsysteme für effiziente Windturbinen konzipiert sowie verschiedene Spulenvarianten entwickelt und hergestellt. Parallel dazu werden voll supraleitende Motoren für künftige elektrische Flugzeuge modelliert.

Im Forschungsthema Industrieanwendungen wird die Umsetzung des im Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie gewonnenen Know-how vorangetrieben. Beispiele dafür sind Kooperationen zu NMR sowie die Entwicklung von Induktionsheizern.

### Spulentechnologie

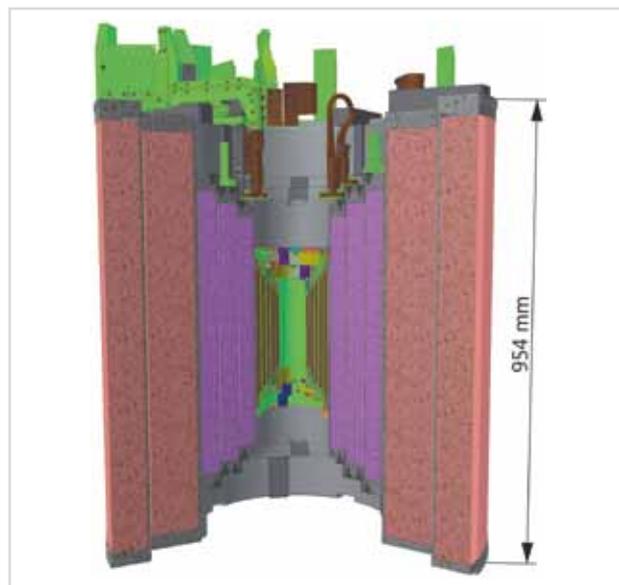
Die Arbeiten im Institutsbereich Supraleitende Hochfeldmagnete waren 2019 geprägt von der erfolgreichen Inbetriebnahme der ausgebauten supraleitenden Hochfeldexperimentieranlage HOMER II (siehe Highlight). Damit gelang der Transfer der Technologieentwicklung von Hochfeld-Einsatzspulen aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) der zweiten Generation (2G-HTS) in die Praxis.

Die seit 2006 betriebene Anlage HOMER II stellt in ihrer Basis-Magnetkonfiguration, bestehend aus den metallischen Supraleitern NbTi und NbSn, ein Magnetfeld von 20 T in einer vergleichsweise großen Bohrung von 185 mm im Durchmesser bereit. Erklärtes Ziel war, die Feldstärke durch Hinzufügen eines zusätzlichen supraleitenden

Einsatzmagneten, der aufgrund der hohen Feldstärke aus HTS bestehen muss, auf mindestens 25 T zu erhöhen. Im Unterschied zu fast allen anderen Labors weltweit realisierte das ITER für den HTS-Einsatz ein technisch anspruchsvolles Design aus fünf ineinander geschichteten und in Lagentechnik gewickelten Einzelsektionen (Abbildung 1). Diese Wahl erfolgte mit Blick auf den Technologietransfer an unseren langjährigen industriellen Partner Bruker BioSpin, der derartig aufgebaute HTS-Einsatzspulen zur Weiterentwicklung seiner weltweit führenden Hochfeld-NMR-Spektrometer benötigt (siehe auch Industrieanwendungen).

Insgesamt wurden für die fünf elektrisch seriell verbundenen Sektionen der HTS-Einsatzspule knapp 1,6 km 2G-HTS-Bandleiter vom Typ REBCO verwickelt. Die für Experimente im Hochfeld verfügbare freie Bohrung ist mit 68 mm im Durchmesser vergleichsweise groß.

Sämtliche Testläufe wurden problemlos ohne Quench, Degradation oder andere unerwünschte Ereignisse absolviert. Der Feldbetrag der HTS-Einsatzspule ist übrigens kraftbegrenzt, das heißt, die Stromtragfähigkeit des HTS ist bei Weitem nicht ausgereizt. Jedoch beträgt die mechanische Spannung durch die elektromagnetische Lorentzkraft im HTS bei 26,5 T Feldstärke 510 MPa, das heißt, der HTS-Bandleiter mit einer Querschnittsfläche



**Abb. 1: Querschnitt durch das komplette Magnetensystem der ausgebauten HOMER II Experimentieranlage, bestehend aus zwei NbTi- und drei NbSn-Magnetsektionen (von außen nach innen) sowie einer Einsatzspule aus fünf REBCO-HTS-Sektionen (innen) mit einer freien Bohrung von 68 mm im Durchmesser.**

von 1 mm<sup>2</sup> wird umgerechnet mit einer Masse von 51 kg belastet. Mit den erreichten 26,5 T in einer Bohrung von 68 mm gehört HOMER II zu den führenden rein supraleitenden Hochfeldexperimentieranlagen weltweit.

Zum weiteren Ausbau vom HOMER II in Richtung 30 T wurden abschließend zwei Optionen als machbar demonstriert: erstens die Aufrüstung des jetzigen HTS-Einsatzes mit zwei weiteren Sektionen und einer verbleibenden freien Bohrung von 30 mm im Durchmesser, zweitens – bei Verfügbarkeit größerer HTS-Stücklängen – der Aufbau eines neuen HTS-Einsatzes, bestehend aus drei Sektionen in Lagenwicklung mit einer freien Bohrung von 68 mm im Durchmesser.

Kontakt: Frank.Hornung@kit.edu

## HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen

Vergleich einer Eignung von Nb<sub>3</sub>Sn und REBCO als Supraleiter für HELIAS. Im Rahmen der EUROfusion Roadmap wird das Konzept HELIAS (helical-axis advanced stellarator) als mögliche langfristige Alternative zum Tokamak-Fusionsreaktor untersucht. Die komplexe dreidimensionale Form der Magnetspulen bringt einige technische Herausforderungen mit sich. Da das Magnetfeld in HELIAS wesentlich höher sein wird als in W7-X, lässt sich die verfügbare NbTi-Technologie nicht direkt übertragen. Vielmehr muss ein anderes Supraleitermaterial eingesetzt werden, das heißt Nb<sub>3</sub>Sn oder der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) REBCO. Daher befassten sich Forscherinnen und Forscher am ITEP 2019 mit einem Vergleich der Vor- und Nachteile einer Spulenkonfiguration mit Nb<sub>3</sub>Sn bzw. REBCO, mit einer Diskussion möglicher Wicklungs- und Kühloptionen – Pancake-Wicklung gegenüber Lagenwicklung – sowie mit einem ersten Grobdesign eines Spulenleiters mit Nb<sub>3</sub>Sn und REBCO. In dieses Design flossen zwei Leiterkonzepte ein: CORC und CroCo. Als Referenzparameter für die HELIAS-Spulen dienten frühere Untersuchungen des IPP.

Wegen der 3D-Form des Wicklungspakets der Magnetspulen empfiehlt sich eine quadratische oder runde Form des Leiters. Im Fall einer Lösung mit Nb<sub>3</sub>Sn ist zu berücksichtigen, dass der Supraleiter einer Glühbehandlung bedarf, die entweder vor (react&wind – RW) oder nach (wind&react – WR) dem Wickeln geschehen muss, was zu Problemen mit der mechanischen Belastung (für RW) oder mit dem Aufbringen der elektrischen Isolation (für WR) führt. Eine Lösung mit REBCO bietet die Vorteile, dass keine Glühbehandlung erforderlich ist und dass das Material nicht empfindlich auf mechanische

Belastung (Strain) reagiert. Eine weitere Herausforderung betrifft die Quenchedetektion, die bei HTS aufgrund der niedrigen Quenchausbreitungsgeschwindigkeit ein generelles Problem darstellt.

Erste Entwürfe für Leiterkonzepte mit Nb<sub>3</sub>Sn sowie REBCO wurden ausgearbeitet (Abbildung 2) und bezüglich Stabilität und Hotspot-Temperatur während eines Quenchs bewertet. Dabei zeigte sich, dass die Nb<sub>3</sub>Sn-Option eine ähnliche Sicherheitsmarge hat, wie sie bei ITER realisiert wird. Für die REBCO-Option stellte sich heraus, dass die CORC-Variante mit zu wenig Kupfer ausgelegt ist, was zu extrem hohen Hotspot-Temperaturen führt. Die CroCo-Variante liegt im Fall eines Hotspots näher an der anvisierten Grenze, allerdings wird wahrscheinlich das Strainlimit überschritten. Abbildung 3 zeigt die erwartete Temperatur im Supraleiterkabel und in der Stahlhülle für die Nb<sub>3</sub>Sn-Lösung sowie die REBCO-Lösungen CORC und CroCo während eines detektierten Quenchs und anschließender Sicherheitsentladung als Funktion der Zeit. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, auch was die Realisierbarkeit dieser HELIAS-Spulen betrifft.

**Design und Quenchanalyse von CroCo-Triplett-Proben für ein Quench-Experiment.** Im Rahmen einer europäisch-chinesischen Zusammenarbeit wird unter anderem das Quenchverhalten von HTS-Leitern in einem externen Magnetfeld untersucht. Dazu werden von drei europäischen Labors Proben ausgelegt und gebaut; diese

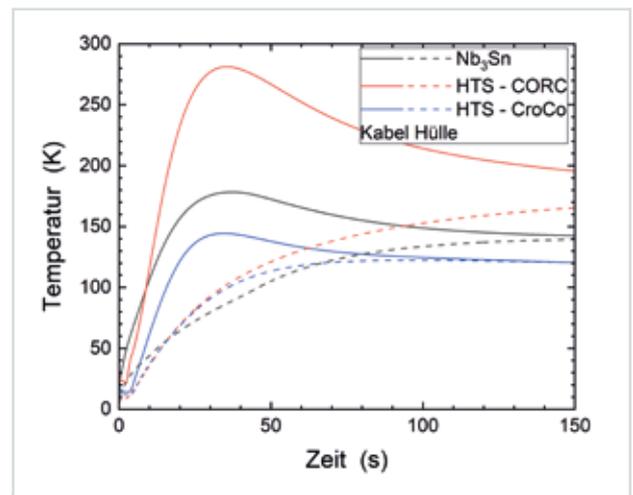


Abb. 3: Temperatur im Supraleiterkabel und in der Stahlhülle für die Nb<sub>3</sub>Sn-Lösung sowie die REBCO-Lösungen CORC und CroCo während eines detektierten Quenchs und anschließender Sicherheitsentladung als Funktion der Zeit.

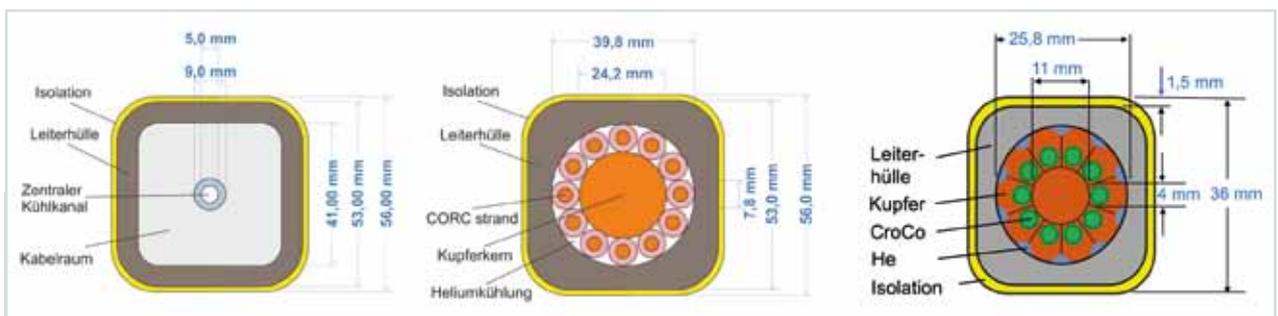


Abb. 2: Vorentwürfe für Leiterkonzepte: Nb<sub>3</sub>Sn (links) sowie REBCO-CORC (Mitte) und REBCO-CroCo (rechts).

werden dann in der Testanlage SULTAN am SPC in der Schweiz getestet. Das ITEP plant, drei verschiedene Leiterdesigns beizusteuern. Sie bestehen aus je drei CroCo-Strands, die in eine Edelstahlhülle eingebettet sind und mit überkritischem Helium bei 4,5 K gekühlt werden, unterscheiden sich jedoch in der Menge an stabilisierendem Kupfer und im geometrischen Aufbau. Während mit der Konstruktion der zu testenden Proben begonnen wurde, liefen Quenchrechnungen mit dem Rechencode THEA, um die unterschiedlichen Designs miteinander zu vergleichen. In allen Designs trägt ein CroCo-Strand maximal 5 kA. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau der drei CroCos.



Abb. 4: Schematische Darstellung dreier CroCo-Konzepte für ein Quenchexperiment in SULTAN: Referenzdesign (links), Design mit geringem Kupferanteil (Mitte) und Design mit Kupferprofilen (rechts).

Leiteroption 1 als Referenz mit einer 2 mm dicken Kupferhülle um jeden CroCo-Strand hat eine Stromdichte im Kupfer von ca. 118 A/mm<sup>2</sup>. Leiteroption 3 mit CroCo-Strands ohne Kupferhülle und in Kupferprofilen eingelötet führt zur niedrigsten Temperatur im Fall eines Quenchs sowie zur kleinsten Temperaturdifferenz zwischen Strand und Leiterhülle, was durch die bessere thermische Anbindung zwischen Kupfer und Hülle bedingt ist. Bei Leiteroption 2 mit 1 mm dicker Kupferhülle um jeden CroCo-Strand steigt die Temperatur sehr schnell an, weil wenig Stabilisierungskupfer vorhanden ist. Verschiedene THEA-Modelle wurden verwendet, um unter anderem den Einfluss einer Stromumverteilung auf den Quenchverlauf zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass einfache Modelle, die die CroCo-Strands als ein Element behandeln, das Temperaturverhalten hinreichend gut wiedergeben, während die detaillierten

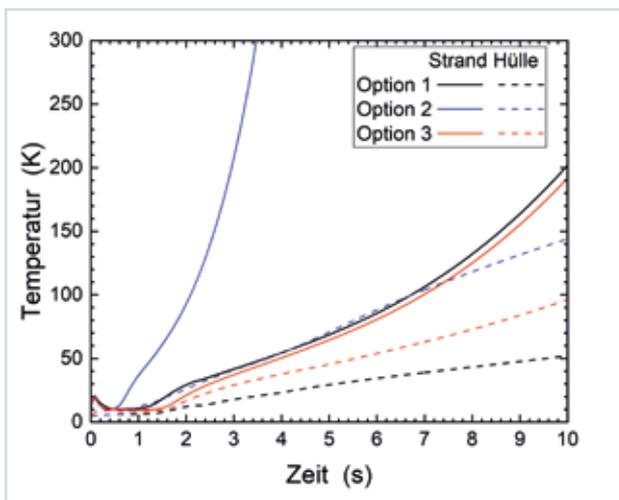


Abb. 5: Temperaturverlauf für CroCo-Strand und Leiterhülle als Funktion der Zeit bei den drei Leiteroptionen.

Modelle genauere Informationen über die Stromumverteilung liefern. Abbildung 5 zeigt den Temperaturverlauf für CroCo-Strand und Leiterhülle als Funktion der Zeit bei den drei Leiteroptionen.

**Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstands zwischen gepressten Kupfer-Kupfer-Flächen und Kupfer-Edelstahl-Flächen für HTS-CICC-Hochstrom-Leiter.** Eines der Hauptgebiete der aktuellen Forschung ist die Untersuchung des Quenchverhaltens von Hochstrom-HTS-Leitern. Zu den Schlüsselparametern gehört der thermische Kontaktwiderstand, der den Wärmeübertrag zwischen HTS-Strands sowie zwischen Strands und Edelstahlhülle

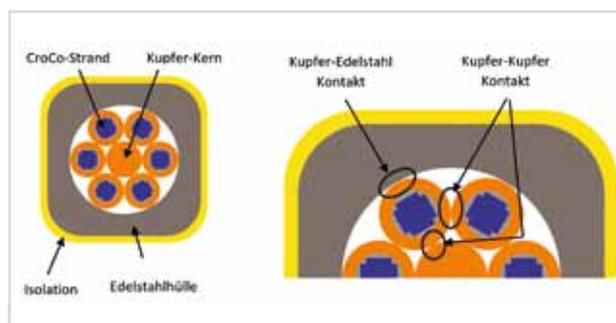


Abb. 6: Schematische Darstellung der in einem HTS-CICC vorhandenen Kontakte.

bestimmt. Abbildung 6 zeigt schematisch die Kontakte, die in einem HTS-CICC vorhanden sind. Der thermische Kontaktwiderstand wurde durch Messung der Wärmeleitung über den Kontakt bestimmt, wobei zur Erhöhung der Messgenauigkeit quadratische Kupfer- bzw. Edelstahlplättchen aufeinandergestapelt wurden.

Vom Messergebnis wurden die Wärmeleitungswerte der Kupfer- bzw. Edelstahlplättchen abgezogen, um letztendlich den thermischen Kontaktwiderstand zu erhalten. Abbildung 7 zeigt den resultierenden thermischen Widerstand  $R_{th}$  eines 1 mm breiten Kontakts als Funktion der Temperatur für Kupfer-Kupfer- und Kupfer-Edelstahl-Kontakte.

Besonders die Temperaturabhängigkeit des thermischen Widerstands stimmte gut mit den in der Theorie erwar-

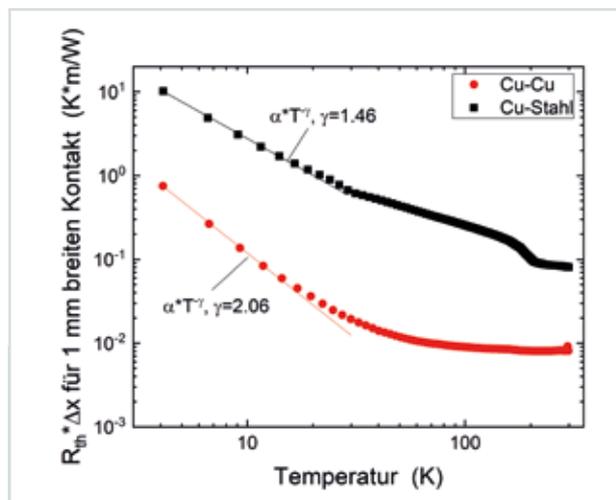


Abb. 7: Thermischer Widerstand  $R_{th}$  eines 1 mm breiten Kontakts als Funktion der Temperatur für Kupfer-Kupfer- und Kupfer-Edelstahl-Kontakte.

teten Werten überein. Dennoch bedarf es weiterer Untersuchungen, vor allem was die Abhängigkeit des thermischen Widerstands vom Anpressdruck betrifft.

Kontakt: Walter.Fietz@kit.edu

**HTS CrossConductor für Fusionsmagnete.** Der am KIT entwickelte HTS CrossConductor (HTS CroCo) wurde im Rahmen eines Technologietransferprojekts weiterentwickelt (siehe auch Forschungsthema Supraleiter- und Kryomaterialien Leitertechnologien). Für eine Nutzung in Fusionsmagneten ist es wichtig zu demonstrieren, dass der HTS CroCo gewickelt werden kann, ohne zu degradieren. Abbildung 8 zeigt mehrere HTS-CroCo-Windungen, die aus Cu- und HTS-Bändern von 3 mm und 2 mm Breite hergestellt und auf eine Trommel mit einem Durchmesser von 100 cm gewickelt wurden. Solche HTS CroCos wurden anschließend auf einen Durchmesser von 60 cm gewickelt und in flüssigem Stickstoff gemessen (Abbildung 9). Der HTS CroCo zeigte keine Degradation – auch mehrfaches Geraderichten und Wiederaufwickeln des Leiters führte nicht zu einer Schädigung. Damit wurde ein Meilenstein auf dem Weg zu einem verseilten HTS-CroCo-Fusionsleiter erreicht.

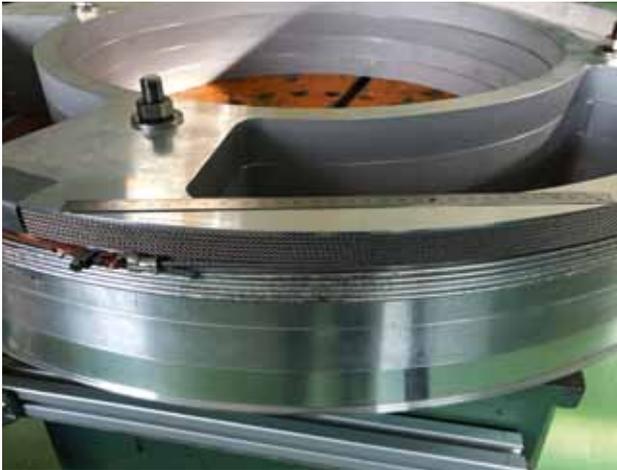


Abb. 8: Mehrere Windungen von HTS CroCos aus 2 mm und 3 mm Cu- und HTS-Bändern auf einer Trommel mit 100 cm Durchmesser.

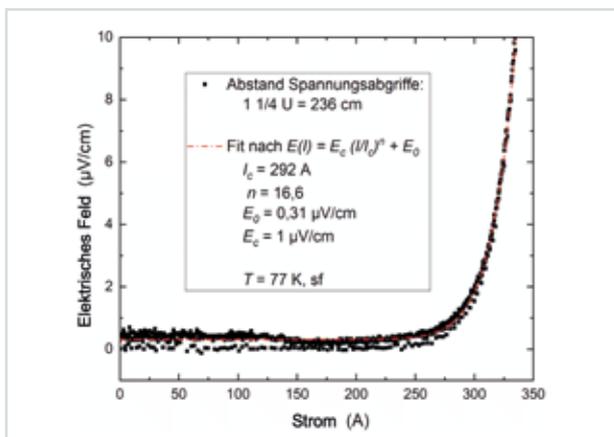


Abb. 9: Elektrisches Feld als Funktion des Stroms eines HTS CroCo, gewickelt auf einen Durchmesser von 60 cm.

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu

**Kryogener Komponententest für Fusionsmagnete.** Fusionsmagnete werden in starken magnetischen Feldern und mit großen elektrischen Stromstärken betrieben. Dadurch wirken starke Lorentzkräfte auf den Leiter im Magneten. Aufgrund ihrer exzellenten Eigenschaften in hohen magnetischen Feldern wurden Fusionsmagnetleiter aus dem Hochtemperatur-Supraleitermaterial REBCO vorgeschlagen. Ein solcher Leiter besteht aus Anordnungen von HTS CroCos, einem am ITEP entwickelten Hochstrom-Kabelkonzept, wie in den Abbildungen 2 und 4 dargestellt. Zur vereinfachten experimentellen Untersuchung der Auswirkung der Lorentzkräfte auf die Leiter wurden transversale Druckversuche mit HTS-CroCo-Triplets, die das kleinste relevante Kabel darstellen, im CryoMaK Labor durchgeführt. Untersucht wurde die Degradation des Triplets unter der einwirkenden Kraft. Die Druckkräfte wurden bei der Siedetemperatur des Stickstoffs mithilfe einer MTS 100 Prüfmaschine aufgeprägt. Nach jeder Kraftsteigerung wurde der kritische Strom jedes CroCos bestimmt. Abbildung 10 zeigt den im Stickstoffbad platzierten Probenhalter.

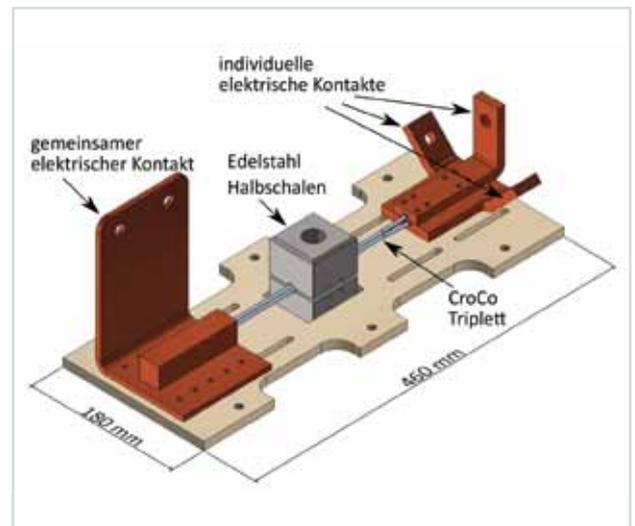


Abb. 10: Probenhalter für die Transversaldruckuntersuchungen mit der MTS 100 Prüfmaschine.

Untersucht wurden vier Probenkonfigurationen, abgeleitet aus den zwei möglichen Extrema der Bandanordnung: mit aufeinanderdrückenden Bandkanten und aufeinanderdrückenden Bandflächen. Jede dieser Anordnungen wurde jeweils mit und ohne Kupferummantelung zur mechanischen und elektrischen Stabilisierung untersucht. Die vier Probenkonfigurationen sowie die zugehörigen Messergebnisse sind in Abbildung 11 visualisiert. Wie die Ergebnisse deutlich erkennen lassen, reagieren die Triplets mit aufeinanderdrückenden Bandkanten erwartungsgemäß deutlich sensibler auf transversale Belastungen als die Proben mit aufeinanderdrückenden Bandflächen. Die Ummantelung mit Kupfer wirkt sich in beiden Fällen positiv aus, sowohl auf die maximal tolerierbare Kraft als auch in einer weniger steil abfallenden Degradation. Somit ist bei diesem Kabellayout eine Kupferummantelung für den Hochstrombetrieb in starken Magnetfeldern unerlässlich. Durch angepasste Geometrien der Ummantelung lässt sich eine Überlastung durch Punktkontakte oder eine Akkumulierung der einzelnen elektromagnetischen Kräfte auf den am Rand liegenden Leiter verhindern. Dies erhöht die Toleranzgrenze gegen

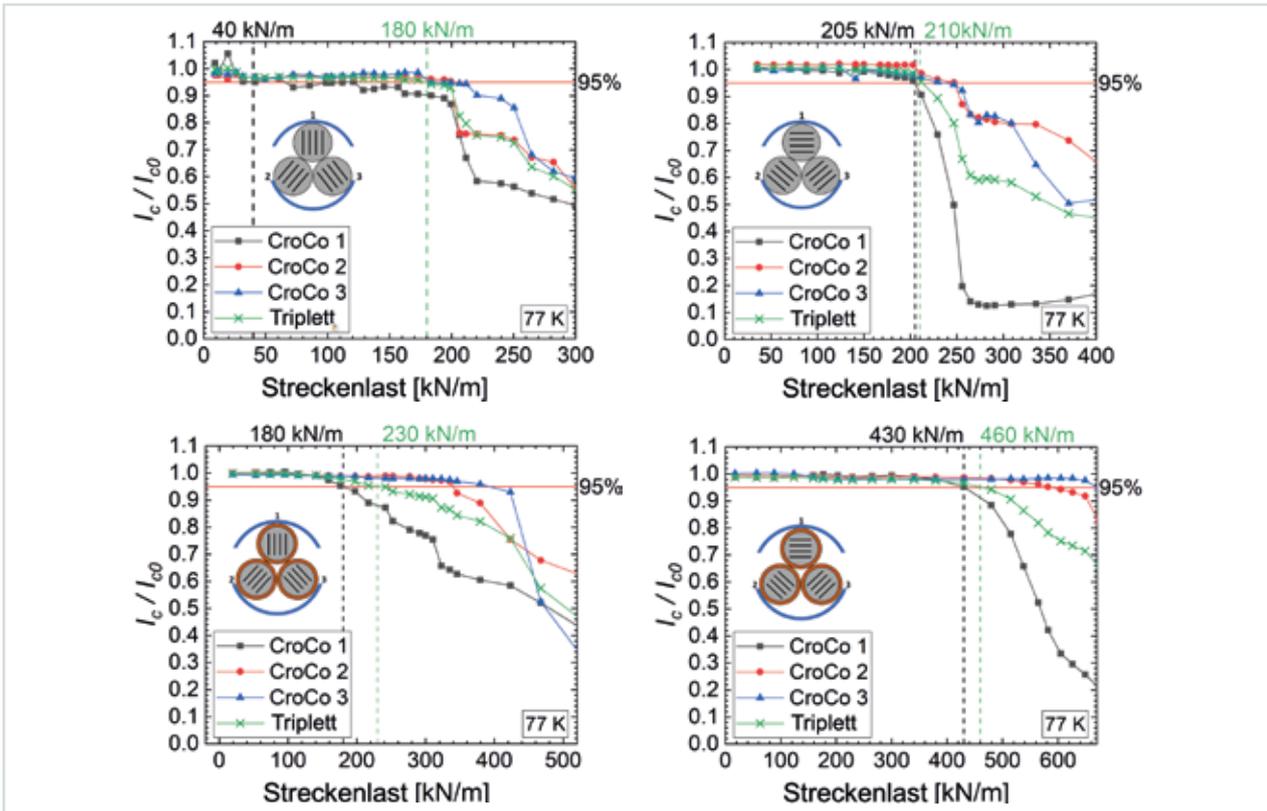


Abb. 11: Probenkonfigurationen und zugehörige Messergebnisse der Transversaldruckversuche.

transversale Druckkräfte weiter. Ein Beispiel für ein solches Profil ist in Abbildung 4 zu sehen.

Kontakt: Klaus-Peter.Weiss@kit.edu

### Rotierende Maschinen

Internationale Forschungsaktivitäten zu rotierenden Maschinen sind aktuell besonders ausgeprägt in Bezug auf Anwendungen für das elektrische Fliegen und für Windturbinen. Beim elektrischen Fliegen geht es sowohl um Generatoren großer Umdrehungsgeschwindigkeiten, beispielsweise der 10 MW-Klasse, als auch um schnelldrehende Antriebsmotoren, typischerweise der 1 MW-Klasse. Bei Windturbinen sind deutlich geringere Umdrehungsgeschwindigkeiten, dafür aber größere Polzahlen erforderlich. Das ITEP ist mit Entwicklungen für beide Anwendungsbereiche befasst.

Supraleitende Generatoren für Windturbinen. Generatoren für den Einsatz in Offshore-Windkraftanlagen müssen robust, leicht, effizient und zuverlässig in der Leistungsklasse 10 MW+ sein – möglichst direkt angetrieben, um wartungsintensive Getriebe zu vermeiden. Die hohen Stromdichten der Supraleiter ermöglichen kompakte und leichte Maschinen. Allerdings stellt die im Vergleich zur konventionellen Technik anspruchsvoll erscheinende kryogene Kühltechnik häufig eine – nicht rationale – Hürde beim Einstieg dar. Die niedrigen Umdrehungsgeschwindigkeiten und Frequenzen in einer Windturbine legen jedoch den Einsatz von Supraleitern auch im Stator nah, was eine einfachere Kühltechnik (ohne kalte Rotationsdurchführung) erlaubt. Deshalb entwarf das ITEP im Projekt SuperWind in enger Kooperation mit den Partnern ein supraleitendes Statorsystem, entwickelte und fertigte einige Spulenvariationen.

Die Spulen (Abbildung 12) wurden in der Non-Insulation-Technik hergestellt und charakterisiert.

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass sich diese Spulentechnik wie antizipiert verhält. Die Zeitkonstante aufgrund des radialen Widerstands zwischen den nicht iso-

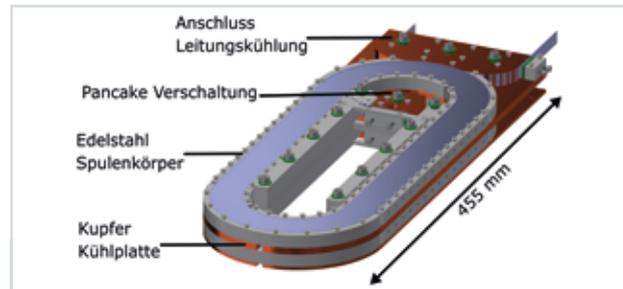


Abb. 12: Paket aus zwei Einzelspulen für einen Stator-Pol.

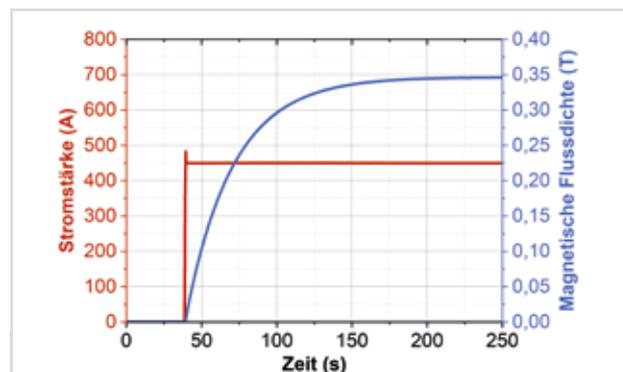
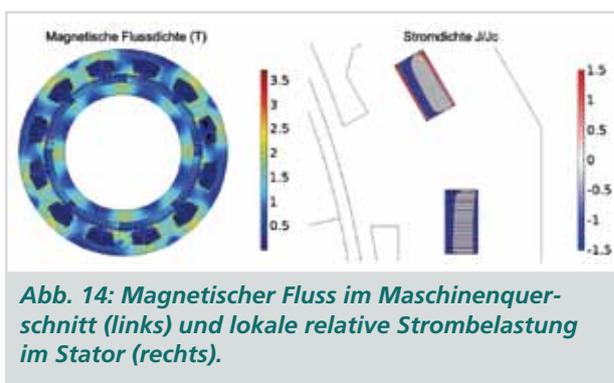


Abb. 13: Erregungsvorgang einer nicht isolierten Doppelspule.

lierten Windungen bestimmt den Anstieg des Magnetfelds nach Erreichen des Betriebsstroms von 450 A (Abbildung 13). Die Spulentechnik übersteht auch transiente Vorgänge – Überströme und Temperaturvariationen –, ohne Schaden zu nehmen.

**Supraleitende Motoren für das elektrische Fliegen.** Angesichts der hohen Anforderungen der Luftfahrt an das Leistungsgewicht aller Komponenten – bei Motoren und Generatoren möglichst  $>20$  kW/kg – empfiehlt sich ein voll supraleitendes Design des Motors. Deshalb wurde ein numerisches Modell entwickelt, das einen solchen Motor vollumfänglich in elektromagnetischer Hinsicht modelliert. Das umfasst auch die lokalen Strombelegungen der einzelnen Supraleiterbänder (Abbildung 14). Diese Modellierungskompetenz liefert die notwendige Voraussetzung für das finale Design eines solchen Antriebsmotors und den Aufbau des Prototyps 2020 im Rahmen des Projektes ASuMED bei den Projektpartnern.



**Abb. 14: Magnetischer Fluss im Maschinenquerschnitt (links) und lokale relative Strombelastung im Stator (rechts).**

Kontakt: Tabea.Arndt@kit.edu

## Industrieanwendungen

**NMR-Magnettechnologie** – Kooperation mit Bruker BioSpin AG Schweiz. Die Zusammenarbeit zwischen dem ITEP und der Firma Bruker BioSpin hat eine lange Tradition – sie reicht zurück bis 1985. Gemeinsam entwickelten die Partner die Magnetsysteme der hochauflösenden NMR-Spektrometer mit 750 MHz, 800 MHz, 900 MHz und 1000 MHz. Bei ihnen wurden Tieftemperatur-Supraleiter (LTS) eingesetzt. Beim 1200 MHz-Projekt wurde die Magnetentwicklung aufgrund der physikalischen Eigenschaften der LTS auf Hochtemperatur-Supraleiter der zweiten Generation (2G-HTS) ausgeweitet. In einem ergänzenden Projekt zur NMR-Magnettechnologie unterstützt das Hochfeldmagnet-Team des ITEP den Projektpartner durch flankierende Maßnahmen bei der Qualitätssicherung, Optimierung und weltweiten Markteinführung der NMR-Spektrometer. Im Zentrum stehen Charakterisierung und Qualifizierung sowohl von kommerziellen technischen Supraleitern als auch von Prototypsupraleitern durch hochauflösende E(I)-Messungen in den Experimentieranlagen JUMBO und HOMER I bei Magnetfeldstärken bis 20 T und Temperaturen von 4,2 K und 2,2 K sowie winkelabhängige Untersuchungen von Hochtemperatur-Supraleitern. Weitere Schwerpunkte liegen auf Untersuchungen der supraleitenden Eigenschaften der aus den Leitern hergestellten supraleitenden Verbindungen und der Optimierung ihrer Restresistivität im  $p\Omega$ -Bereich abhängig vom externen Magnetfeld und Transportstrom. Tests an neuartigen, von Bruker gefertigten 2G-HTS-Wicklungen

(Leiterlängen über 100 m) in der Experimentieranlage HOMER I des Hochfeldlabors bis an die Einsatzbedingungen einer HTS-Spule in einem 1200 MHz-Magnetsystem zeigten das Potenzial dieser Leiter und Wicklungen. Die Ergebnisse des ITEP flossen in die NMR-Magnetsystementwicklung mit Frequenzen über 1000 MHz ein. Bruker lieferte im Sommer 2019 das weltweit erste 1100 MHz-NMR-Spektrometer an das St. Jude's Children Research Hospital in Memphis/Tennessee aus. Die 1200 MHz-Systeme haben ihr Sollfeld erreicht und stehen kurz vor der Auslieferung.

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

Kontakt: Marion.Kläser@kit.edu

**BMW Projekt RoWaMag – Robuster und wartungsarmer Magnetheizer.** Gemeinsam mit dem HTS-Bandleiterhersteller THEVA GmbH und dem Familienunternehmen Bültmann GmbH hatte das ITEP 2018 die Förderung des Projekts RoWaMag beim BMWi beantragt. Nach der Bewilligung fand das Kick-Off-Meeting mit allen beteiligten Projektpartnern und dem BMWi am 9. Mai 2019 bei der Bültmann GmbH statt.

Die Warmumformung ist ein weitverbreitetes Verfahren zur Herstellung von Metallhalbzeugen und Metallprodukten, beispielsweise beim Strangpressen, Schmieden oder Warmwalzen. Sie nutzt die niedrigere Warmfestigkeit temperierter metallischer Werkstoffe. Weil Wärme und Umformungsenergie eingebracht werden müssen, gehört die Warmumformung zu den energieintensivsten Verfahren. Die induktive Erwärmung von Materialien über konventionelle Kupfertechnologie hat einen Wirkungsgrad von nur 50 %. Magnetheizer auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) hingegen weisen einen deutlich höheren Wirkungsgrad von mehr als 70 % auf. So lässt sich mit einem HTS-Magnetheizer deutlich Energie einsparen, was auch die  $CO_2$ -Bilanz verbessert.

Im ersten Arbeitspaket des Projekts legte Bültmann die Randbedingungen für den HTS-Magnetheizer fest. Neben dem zu erreichenden Magnetfeld am Erwärmungsort, den geometrischen Randbedingungen sowie den Betriebs- und Wartungsbedingungen gingen unter anderem auch die Kosten für den HTS-Magneten inklusive Kryosystem in das Design mit ein. Aufgrund dieser Daten nahm THEVA erste Berechnungen für den Spulenaufbau vor. Anhand des Spulenaufbaus wurde der Wärmeeinfall für unterschiedliche Konzepte des Kryosystems berechnet. Daraus ergab sich ein bevorzugtes Designkonzept für das Kryosystem, das auch ein späteres Upscaling des Prinzips für größere Magnetheizer erlaubt.

In Abbildung 15 ist das Konzept dargestellt. Der HTS-Magnet ist von einem Kühlschilde umgeben und wird in einen Vakuumbehälter eingebaut. Zur Kühlung wird ein zweistufiger Kleinkühler eingesetzt. Die erste Stufe

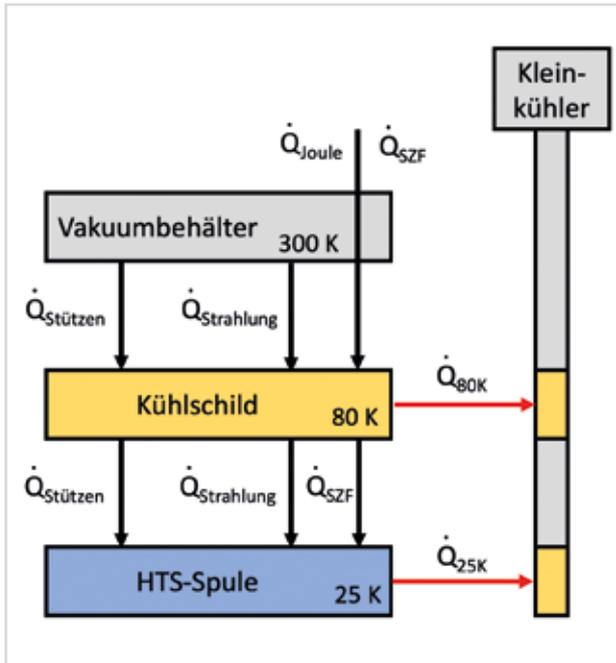


Abb. 15: Designkonzept für die Kühlung der HTS-Spule.

des Kleinkühlers ist mit dem Kühlschild verbunden und führt die Wärme aufgrund der Stützstruktur und der Wärmestrahlung der Vakuumbehälterwand ab. Die Wärme der Stromzuführungen, aufgrund von Wärmeleitung und Produktion joulescher Wärme durch den Betriebsstrom von ca. 500 A, wird ebenfalls auf der ers-

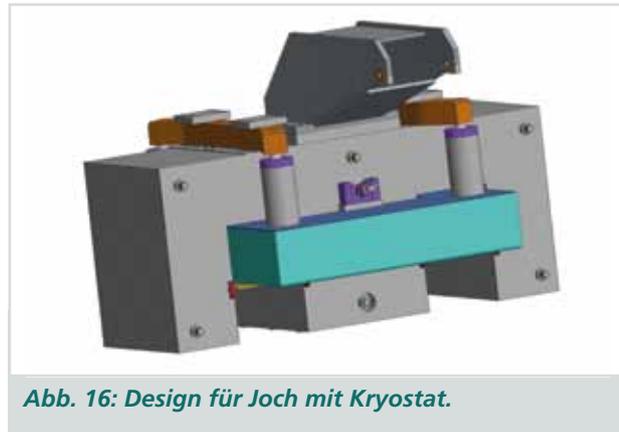


Abb. 16: Design für Joch mit Kryostat.

ten Stufe des Kleinkühlers bei ca. 80 K abgeführt. Die zweite Stufe kühlt den HTS-Magneten. Sie führt die Wärme der Stützstruktur zwischen Kühlschild und Magnet, die Wärmestrahlung vom Schild und die Wärme des Strombusses zur Spule auf einem Temperaturniveau von ca. 25 K ab.

Als Nächstes wird das Design in die Konstruktion eines Magnetsystems umgesetzt. Neben der prinzipiell notwendigen Funktionalität und Robustheit des Systems besteht die Hauptherausforderung in der Zukunftssicherheit: Das Produkt soll später wirtschaftlich konkurrenzfähig sein und sich mindestens zehn Jahre lang sicher und zuverlässig betreiben lassen. Abbildung 16 zeigt einen ersten Entwurf.

Kontakt: [Ralph.Lietzow@kit.edu](mailto:Ralph.Lietzow@kit.edu)



## Highlight: Mit einer HTS Einsatzspule wurden im Magnetsystem des HOMER II 26,5, Tesla erreicht.

Zur Inbetriebnahme wurden zunächst die fünf bereits 2018 gefertigten HTS-Einzelsektionen zusammengebaut und verdrahtet. Besondere Aufmerksamkeit galt der Quenchdetektion, das heißt der Erfassung eines (beginnenden) spontanen und unerwünschten Übergangs des supraleitenden Magnetstroms in die Normalleitung. Ein entsprechendes Überwachungssystem wurde aufgebaut (Abbildung 17).



Abb. 17: Neu aufgebautes Kontrollsystem zur Magnetüberwachung mit Quenchdetektion für die drei unabhängigen Stromkreise der NbTi-, NbSn- und HTS-Magnet-Teilsysteme.

Wird ein Quench in einer der Spulensektionen detektiert, erfolgt die sichere Entladung des kompletten Magneten mithilfe dreier Schaltanlagen und externer Entladungswiderstände. Abbildung 18 zeigt die vorbereitete HTS-Einsatzspule beim Einkranchen in den HOMER II-Kryostaten, in dem sich bereits die Basis-Magnetkonfiguration befindet.

Nachdem Vortests die Funktionsfähigkeit des Aufbaus und der Sicherungssysteme bestätigt hatten, erfolgte die mehrtägige Inbetriebnahme der aufgerüsteten HOMER II Experimentieranlage in folgenden Schritten:

- Zunächst wurde bei einer Helium-Badtemperatur von 1,8 K das gesteckte Ziel von 25 T angefahren. Dazu wurden die Ströme der drei einzelnen Magnetstromkreise schrittweise auf die jeweiligen Sollwerte erhöht und beim maximalen Feldwert von 25,1 T gehalten. Anschließend wurde das System wieder entladen. Dabei trug das Basis-Magnetsystem 20 T, der HTS-Einsatz 5,1 T zum Gesamtfeld bei.
- Im zweiten Experimentierzyklus wurden bei 1,8 K 26,1 T (20 T + 6,1 T) erreicht.
- Die Tests bei 1,8 K erfolgten im superfluiden Heliumbad, das aufwendig bereitgestellt werden musste. Daher wurde im dritten Testlauf das Magnetsystem in normalfluidem Helium bei 4,4 K betrieben. Bei dieser höheren Badtemperatur sind die kritischen Ströme der metallischen NbTi- und NbSn-Teilsysteme signifikant reduziert, sodass ein Feld von 24 T (17,6 T + 6,4 T) angefahren wurde.

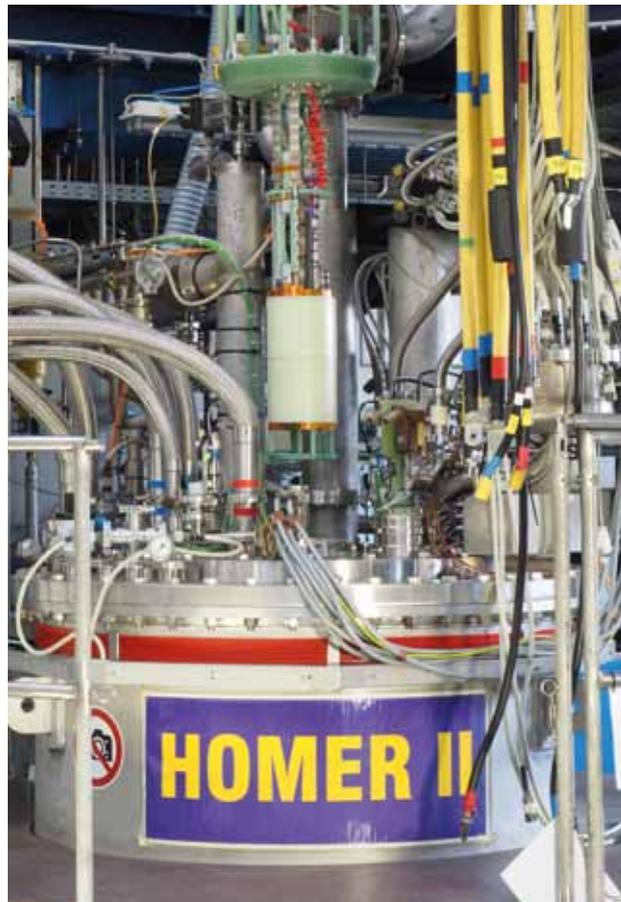


Abb. 18: HTS-Einsatzspule beim Einkranchen in den HOMER II-Kryostaten, in dem sich bereits das Basis-Magnetsystem aus NbTi und NbSn befindet. Die Einsatzspule hat eine freie Bohrung von 68 mm, eine Höhe von 35 cm und einen äußeren Durchmesser von 184 mm.

- Im letzten Testzyklus wurde wieder bei 1,8 K Badtemperatur das Maximalfeld weiter auf 26,5 T (20 T + 6,5 T) gesteigert. Abbildung 19 zeigt die dabei schrittweise erhöhten Einzelströme in den drei Magnetstromkreisen zusammen mit dem resultierenden Gesamtfeld.

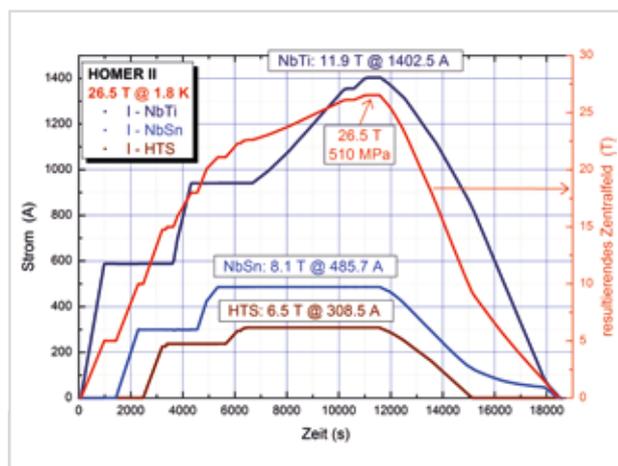
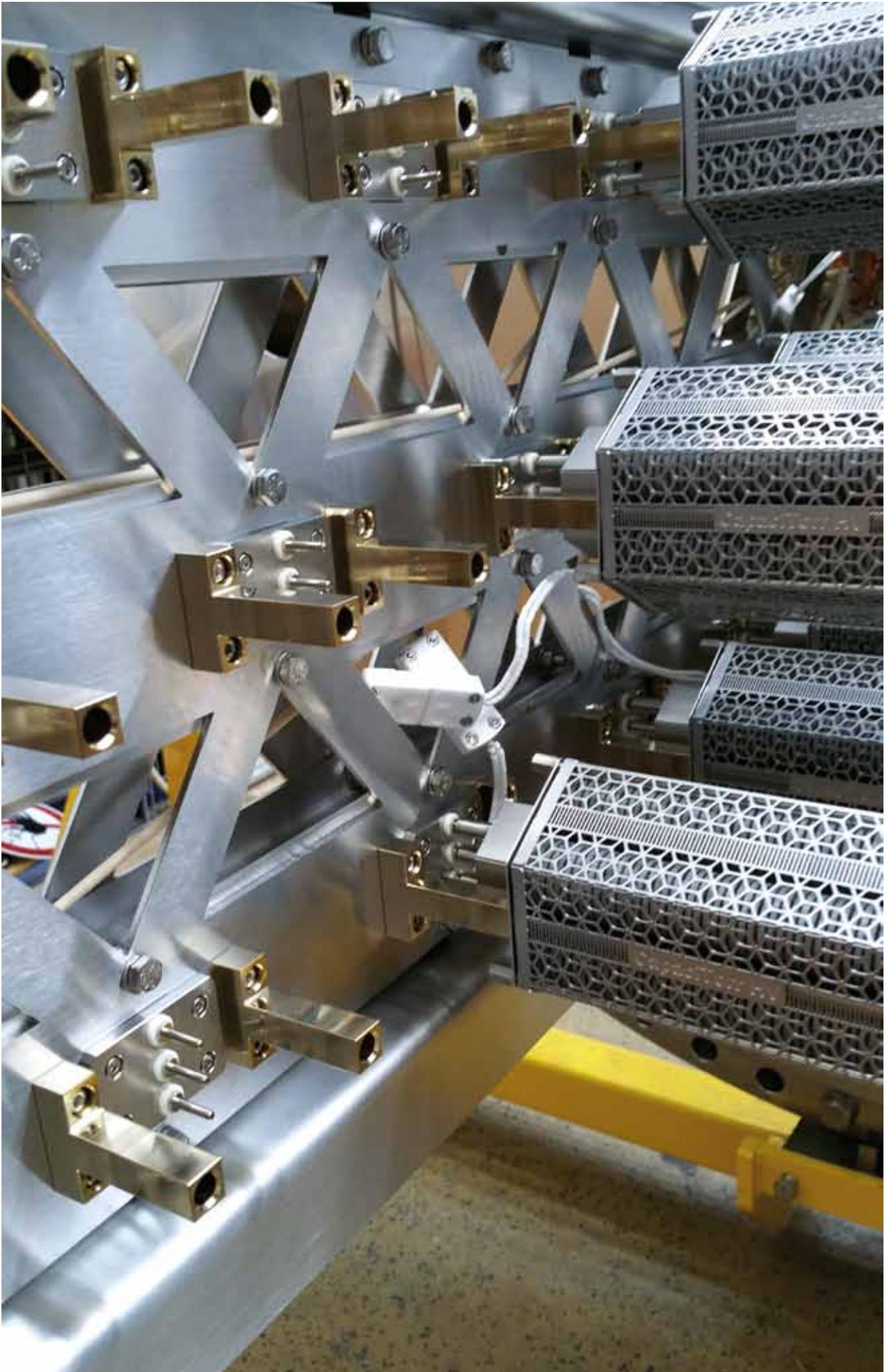


Abb. 19: Einzelströme in den drei Magnetstromkreisen und resultierendes Gesamtfeld beim schrittweisen Anfahren des Maximalfelds von 26,5 T.



Montage der weltweit größten Getterpumpe für Anwendungen in der Fusion.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes

*Koordination: Dr. Christian Day*

Im Forschungsfeld Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes entwickelt das ITER neuartige Technologien, um den Brennstoffkreislauf und die damit verbundenen Nachbarsysteme eines zukünftigen Fusionskraftwerks effizienter zu machen und dadurch sicherzustellen, dass der in situ erzeugte Brennstoff Tritium optimal ausgenutzt wird. Das Forschungsfeld deckt alle drei Schlüsseltechnologien des Brennstoffkreislaufs ab: Materiejektion, Vakuumtechnik und Tritiumtechnologie. Die am Institut entwickelte neue Architektur des Brennstoffkreislaufs sieht drei Teilkreisläufe vor: Der erste führt direkt aus den Vakuumpumpen unverbrannten Brennstoff an die Pelletinjektoren zurück, der zweite ist ein quasi kontinuierlich betriebener Bypass des Restgases mit Isotopenseparation innerhalb der Tritumanlage, der dritte schließlich ist der mit Kryodestillation und Wasserdetriitierung ausgerüstete Umlauf, der die verbleibenden Wasserstoff-Isotopologe in die reinen Wasserstoff-Isotope überführt, um sie dann abzuspeichern oder an die anderen Kreisläufe abzugeben. Diese Arbeiten sind fest im Europäischen Fusionsprogramm EUROfusion verankert. Nahziel ist die Entwicklung eines in sich konsistenten vorkonzeptionellen Designs. Vor diesem Hintergrund haben sich im Forschungsfeld die folgenden aktuellen Forschungsthemen herausgebildet:

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

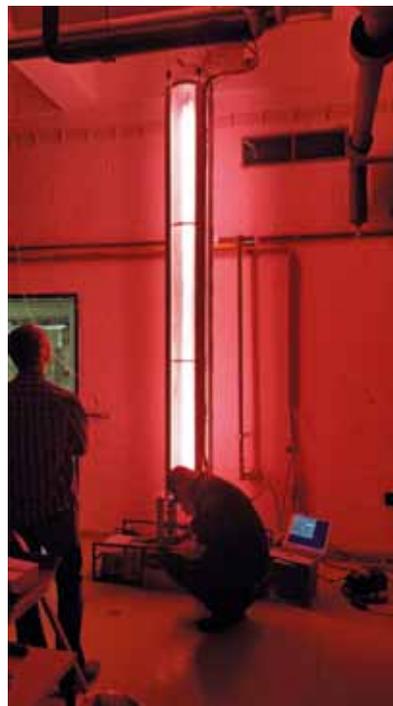
Für 2020 sind eine Reihe von europäischen Reviews angesetzt, welche die Forschungsergebnisse kritisch evaluieren. Danach werden die Arbeiten im nächsten Europäischen Forschungsrahmenprogramm 2021 bis 2027 fortgeführt.

### Vakuumtechnologie und Prozessintegration

Dieses Forschungsthema adressiert alle vakuumtechnischen Fragen rund um eine Fusionsanlage. Die Aktivitäten gehen über die Entwicklung der für die entsprechenden Teilsysteme des Brennstoffkreislaufs relevanten Technologien hinaus und umfassen auch die Vakuumsysteme außerhalb des klassischen Brennstoffkreislaufs, beispielsweise die Plasmakammer mit Ausgasung und Gasspeicherung. Auch Vakuumtechnologien für andere Großanlagen in der Fusion, wie für die europäische Neutronenquelle IFMIF-DONES oder die derzeit gebaute Maschine JT-60SA in Japan, werden abgedeckt. Das für das europäische Demonstrationsfusionskraftwerk DEMO in den vergangenen Jahren entwickelte neue Vakuumkonzept des Brennstoffkreislaufs arbeitet im Gegensatz zu den Kryovakuumpumpen für ITER kontinuierlich und ohne Kryogen. Es besteht aus drei Pump-

stufen. Zur Separation des unverbrannten Brennstoffs DT sollen in einer ersten Stufe superpermeable Metallfolien verwendet werden. Dies ermöglicht gleichzeitig eine Separation von hochreinem Wasserstoff aus dem Fusionsabgas und auch eine Kompression. Zur Entwicklung einer funktionalen Pumpe auf der Basis der Metallfolien hat der Institutsbereich eine auf mehrere Jahre angelegte systematische Technologieentwicklung begonnen. Dazu wurde ein umfassendes F&E-Programm aufgesetzt.

Um gepumpt werden zu können, muss der Wasserstoff in einen energetischen Zustand überführt werden. Für diese Aufgabe wird eine Mikrowellenplasmaquelle entwickelt, die einen hohen Energetisierungsgrad erreichen und in Kombination mit einem weiteren Magnetfeld die Resonanzbedingung erfüllen soll. Diese Entwicklungsarbeit findet auf der Basis einer industriellen Plasmaquelle – Duo-Plasmaline von Muegge – in Zusammenarbeit mit der Industrie statt (Abbildung 1). Zur Skalierung der Ausbeute an energetischen Wasserstoffteilchen auf die Anwendungsgröße in DEMO laufen parametrische elektrodynamische Rechnungen mit dem Software-Paket COMSOL-Multiphysics.



**Abb. 1:**  
Die drei  
Meter lange  
Duo-Plasmaline  
im Betrieb.

Die Wirkung der Metallfolie ist nur dann sichergestellt, wenn an der Oberfläche eine passivierende Deckschicht vorhanden ist. Zum Verständnis der Wechselwirkung der ankommenden energetischen Teilchen mit der Deckschicht werden komplexe molekulardynamische Simulationen mit dem VASP-Code durchgeführt.

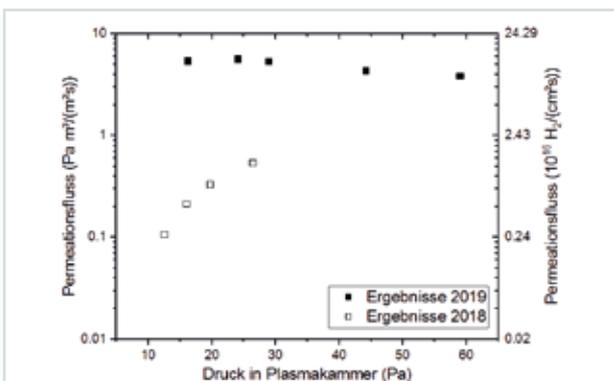
Schließlich muss gewährleistet sein, dass die Deckschicht über lange Zeit stabil bestehen bleibt bzw. falls erforderlich durch Dotierungsverfahren in situ nachgebildet werden kann.

Zu den besonderen Anforderungen von DEMO gehört auch der Betrieb der Metallfolienpumpe in einem magnetischen Feld hoher Feldstärke von ca. 1 T. Auch dieser Aspekt wird in einem speziell dafür aufgebauten Versuchsstand untersucht (Abbildung 2), der im Dezember 2019 in Betrieb ging. Diese Aktivität geschieht in Kollaboration mit dem Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie der Universität Stuttgart.



**Abb. 2:** Inbetriebnahme des Testaufbaus zur Untersuchung der Plasmaquelle im äußeren Magnetfeld – Stefan Hanke, Yannick Kathage, Stefan Merli (von links).

Zur Charakterisierung des integrierten Aufbaus mit Quelle und Folie liefen im Berichtszeitraum ausführliche Messkampagnen in der Anlage HERMESplus. Abbildung 3 zeigt, wie die Leistungsdaten der Folie im Vergleich zum letzten Jahr um mehr als eine Größenordnung gesteigert wurden.



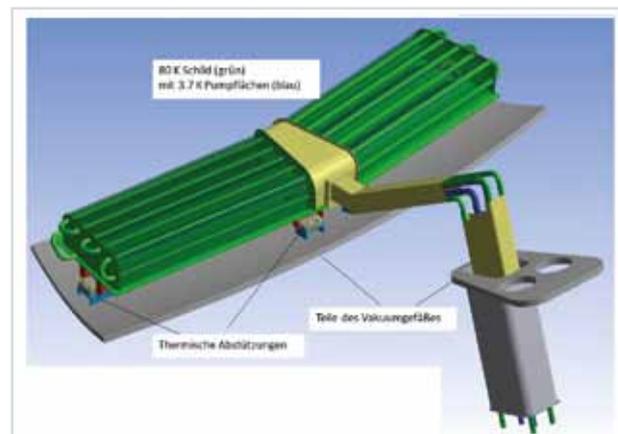
**Abb. 3:** Leistungsdaten von Wasserstoff durch eine Niob-Folie mit 800°C bei 2 kW Mikrowellenleistung.

Eine weitere Vakuumtechnologie, die an verschiedenen Stellen des Brennstoffkreislaufs eingesetzt wird, basiert auf Gettermaterialien (NEG). Die auf diesem Gebiet führende Firma SAES Getters hat in den vergangenen Jahren ein neues Material mit dem Verkaufsnamen ZaO entwickelt, das in Form von Scheiben mit einem Durchmesser von 25 mm hergestellt wird. Zum besseren Verständnis der Skalierung verschiedener Scheibenanordnungen organisierte das ITEP in Zusammenarbeit mit SAES und Consorzio-RFX ein mehrstufiges F&E-Programm, das Scheibenanordnungen auf verschiedenen

Skalen experimentell untersuchte: rohe Metalllegierung; Einzelscheibe; 12/31 Scheiben in Stapelanordnung mit einem zentrale axialen Heizer; 270 Scheiben – sechs Stapel à 45 Scheiben – in einem Hexagon-Modul mit zentralem Heizer. Darauf aufbauend wurde 2019 eine Testpumpe mit mehr als 9000 Einzelscheiben gebaut, in der Versuchsanlage TIMO installiert, in Betrieb genommen und vermessen (siehe Highlight).

Der Bereich Vakuumtechnik arbeitet seit vielen Jahren mit dem japanischen Tokamak JT-60SA zusammen, der 2020 in Betrieb gehen wird. Nach einer ersten Experimentierkampagne wird die Maschine 2021 wieder geöffnet und mit weiteren Einbauten komplettiert. Dazu gehört ein leistungsfähiges Kryopumpensystem, das direkt in den Divertor integriert wird. Das ITEP wurde beauftragt, dafür das komplette Design zu entwickeln und die Herstellung des Systems in der Industrie zu überwachen. Abbildung 4 zeigt den derzeitigen Stand des Designs, das dem bewährten, am Institut entwickelten Kryosorptionspumpenkonzept folgt, die Kryoflächen modular aus hydrogeformten Panels – zwei Stück pro Pumpenflügel – aufzubauen.

Für die Materialtestanlage IFMIF-DONES, die ab 2020 gebaut werden soll, wurden umfangreiche Vakuummodellierungen durchgeführt. DONES ist ein Beschleuni-



**Abb. 4:** Design einer von zehn Kryopumpen für das Plasmagefäß von JT-60SA.

ger, der an einem Flüssiglithium-Target ein fusionstypisches Neutronenspektrum erzeugt, mit dem sich Materialien für Anwendungen in der Fusion prüfen lassen.

Ebenfalls 2019 wurde die Anlage TRANSFLOW für weitere Messungen der Leitwerte an Mikrokanälen mit verschiedenen Oberflächenfunktionalisierungen eingesetzt. Diese Messungen finden in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien (UFT) der Universität Bremen im Rahmen eines DFG-Projekts statt.

Kontakt: Christian.Day@kit.edu

## Tritiumextraktion und -rückgewinnung

Hauptaufgabe des Brennstoffkreislaufs in der Fusion ist, das Abgas in seine Bestandteile aufzureinigen und das Fusionsplasma mit neuem Brennstoff zu füttern. Durch die Fusionsreaktion verbrauchtes Deuterium wird dabei

von außen zugeführt, während das Tritium innerhalb des Plasmagefäßes in den sogenannten Brutblankets selbst erzeugt und nach einem weiteren Extraktionsschritt über den Brennstoffkreislauf nachgeliefert wird. Ein wesentliches Ziel des Projekts zum Bau eines Demonstrationskraftwerks besteht darin, die Realisierung dieser Tritium-Selbstversorgung zu zeigen. Je geringer das Tritium-Inventar im Kreislauf, desto einfacher ist das. Die entwickelte Architektur des Brennstoffkreislaufs ist daher so ausgelegt, dass sie nur noch kontinuierlich arbeitende Technologien verwendet. Damit vor allem befasst sich das Forschungsthema Tritiumextraktion und -rückgewinnung.

Für die Bereitstellung des Brennstoffs in der gewünschten Zusammensetzung ist es erforderlich, das D:T-Verhältnis genau äquimolar einzustellen. Dazu bedarf es einer Technologie, die innerhalb der vorhandenen Wasserstoff-Isotopologe Konzentrationsverschiebungen einstellen und das für die Plasmareaktion ungünstige H extrahieren kann. Das ITEP erarbeitete ein neues Konzept, das verschiedene Wasserstoff-Metall-Wechselwirkungen ausnutzt. Das Gasmisch wird dabei portionsweise in einem semikontinuierlichen Prozess zwischen zwei Kolonnen zyklisch hin und her bewegt, wodurch nach einer bestimmten Zyklenzahl – abhängig von der gewünschten Konzentrationsverschiebung im höheren zweistelligen Bereich – eine Anreicherung der Isotope an den jeweiligen Enden der Kolonne erfolgt (Abbildung 5).

Zur thermodynamischen Charakterisierung der Materialien – Wasserstofflöslichkeiten als Funktion von Tempe-

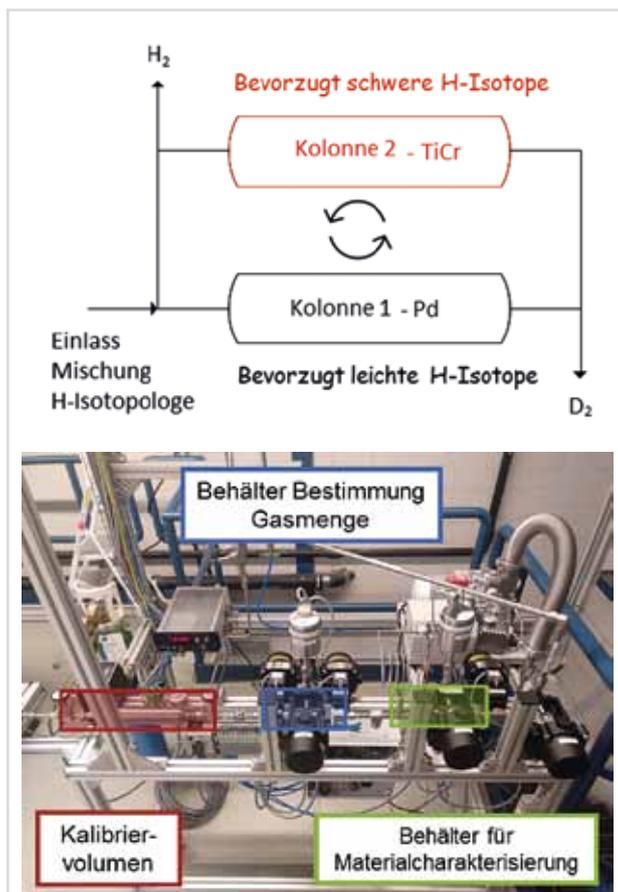


Abb. 5: Die Temperaturwechselabsorption. Funktionsprinzip (oben). Foto der Testanlage (unten).

ratur und Druck – wird derzeit in einem Versuchsaufbau Palladium untersucht; als Gegenstück mit inversem Isotopieeffekt kommt TiCr infrage. Sobald über die Materialcharakterisierung eine erfolgversprechende Materialpaarung gefunden worden ist, wird der gesamte Prozess in der derzeit aufgebauten neuen Anlage HESTIA demonstriert.

Kontakt: Christian.Day@kit.edu

## Strömung verdünnter Gase

Zur Auslegung von komplexen Vakuumsystemen wie im Fusionsbrennstoffkreislauf ist es unerlässlich, verdünnte Gasströmungen quantitativ zu berechnen. Dies geschieht exakt durch Lösen der Boltzmann-Gleichung, welche die Strömung im gesamten Bereich der Verdünnung beschreibt. Dazu wurde über viele Jahre im Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP der DSMC-Algorithmus weiterentwickelt, ein statistisches Verfahren, das gegenüber deterministischen Methoden den Vorteil hat, auch komplexe Geometrien vernünftig beschreiben zu können.

Dieses Forschungsthema konzentriert sich vor allem auf die Physik des Teilchenabtransports im Divertor eines Tokamaks, besonders auf den Bereich unterhalb der Divertorkassetten: Dort ist das Plasma wieder in Neutralgas umgewandelt, und dort koppeln die Pumpsysteme an. Das Plasmaszenario für DEMO wird sich wesentlich von dem für ITER unterscheiden. So muss ein Divertorplasma im sogenannten Detachment Modus aufrechterhalten werden. Denn nur dann können die resultierenden Wärmelasten von den Divertormaterialien bei gleichzeitiger Neutronenstrahlung beherrscht werden. Dieser Plasmazustand ist noch nicht völlig verstanden. Daher ist vorgesehen, in das Design der Maschine möglichst viele Kontrollmöglichkeiten einzubauen. Auch dabei wirken wieder die Pumpsysteme mit; sie müssen das bei der Fusionsreaktion gebildete Helium abziehen, zusammen mit dem unverbrannten Brenngas und anderen Hilfgasen, die dem Plasma zugefügt werden, um die Stabilität zu erhöhen. Für die Divertorrealisierung gibt es eine ganze Reihe von magnetischen Konfigurationen (Abbildung 6). Dazu wurde 2019 eine systematische Studie abgeschlossen, die das Vermögen des Divertors, ausreichend Gas auszuschleusen, einheitlich mit demselben Werkzeug und unter identischen Randbedingungen vergleicht.

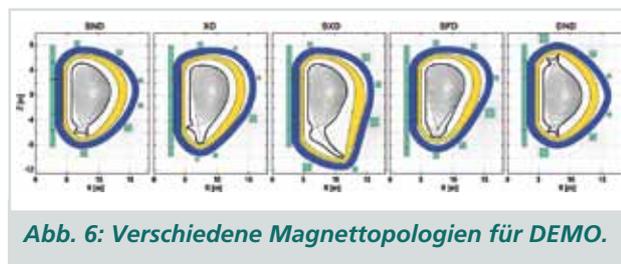


Abb. 6: Verschiedene Magnettopologien für DEMO.

Berechnet wurde immer der Extraktionswirkungsgrad, das heißt das Verhältnis des gepumpten Teilchenflusses zum in den Divertor einströmenden Teilchenfluss – der Rest wird vom Divertor ins Plasma zurückreflektiert – bei variiertem Pumpenwirkungsgrad. Bei einer Länge der Idealfall eines schwarzen Lochs vor; real sind etwa 0,2 bis 0,4 erreichbar. Abbildung 7 zeigt, dass sich bei den

verschiedenen Konfigurationen der gepumpte Teilchenstrom stark unterscheidet. Zum ersten Mal wurde damit sichtbar, dass der konventionelle Divertor (SND) deutlich schlechter ist als bisher angenommen. Damit hat das ITEP zwei wichtige Aktionen im Fusionsprogramm initiiert: Erstens wird der am besten bewertete Divertor in MAST untersucht; AUG wird umgebaut, sodass sich diese Konfiguration auch darin realisieren lässt. Zweitens wird der konventionelle Divertor weiterentwickelt, um ihn effektiver zu machen.

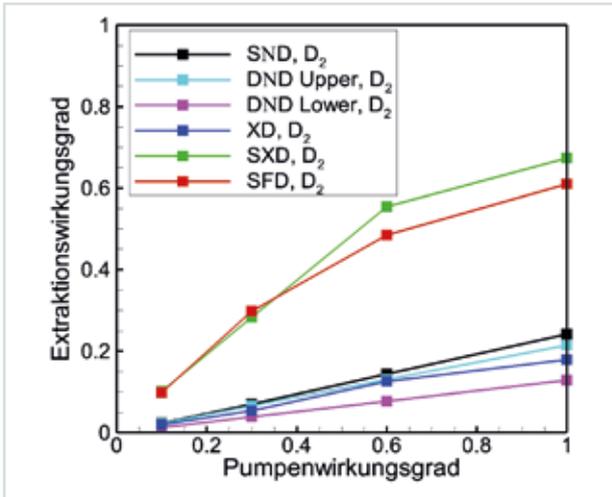


Abb. 7: Divertorsimulationen für DEMO.

Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsthemas liegt auf technischen Lösungen für den Flüssigmetalldivertor. Dahinter steht die Idee, durch Verwendung flüssiger Metalle höhere Wärmestromdichten zu erlauben. Als Kandidaten werden Lithium bei 700 °C und Zinn bei 1200 °C diskutiert. Abbildung 8 zeigt die gefundenen Ergebnisse für beide Fälle: Mit Zinn lassen sich höhere gepumpte Flüsse realisieren, die aber auch die erforderlichen Teilchenflüsse nicht erreichen, weder für Helium noch für Deuterium. 2020 wird daher weiter an der Divertorgeometrie gearbeitet. Dabei wird vor allem versucht, einen Dom zu integrieren, der unterstützend wirkt, um mehr Teilchen abpumpen zu können.

Schließlich wurde das Forschungsthema 2019 noch auf ein ganz neues Tokamak-Projekt ausgedehnt: In Italien

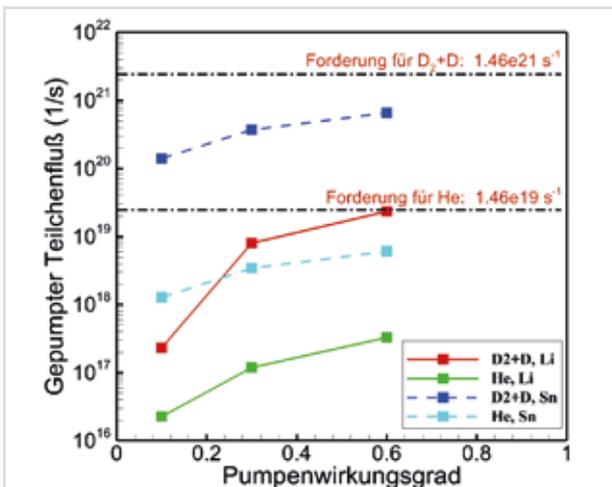


Abb. 8: Pumpeigenschaften der zwei Flüssigmetall-divertorvarianten, berechnet für eine Kassette.

wird bis 2024 die neue Maschine DTT aufgebaut, um Divertorkonzepte zu testen. Sie wird so ausgelegt sein, dass sich – eventuell mithilfe innerer oder äußerer Spulen – alle magnetischen Konfigurationen (Abbildung 6) sowie Flüssigmetalllösungen realisieren lassen. Darüber hinaus wird diese Maschine die Hauptanlage zur Entwicklung des zukünftigen DEMO-Plasma-Szenarios werden, das durch die Abwesenheit größerer magnetischer Instabilitäten, sogenannter ELMs, gekennzeichnet sein wird. Der Institutsbereich soll die Auslegung der Vakuumsysteme für DTT übernehmen. Dies geschieht in einem zweistufigen Ansatz: Zunächst werden mit Divertorsimulationen die möglichen Teilchenflüsse modelliert, dann werden darauf aufbauend kompatible Vakuumlösungen konzipiert, die zu den Abmessungen der Vakuumschlüsse passen (Abbildung 9). Derzeit überprüft der Institutsbereich die Verwendung von Kryopumpen oder NEG-basierten Pumpen. 2020 arbeitet ein Gastwissenschaftler vom italienischen DTT-Team mit an dem Thema. Geplant ist, in DTT auch einen ersten Prototyp der Metallfolienpumpe zu testen, sobald die Maschine in Betrieb geht.

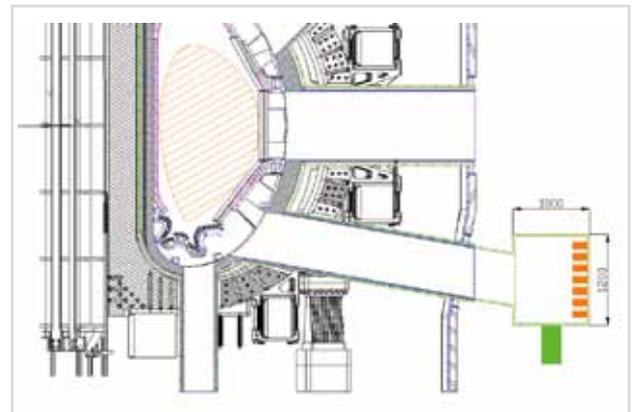


Abb. 9: Querschnitt durch die Plasmakammer von DTT mit einer angedeuteten externen Lösung für die Vakuumpumpen.

Die Gruppe Gasströmung wurde 2019 verstärkt. Dies erlaubt es, künftig auch Simulationen für den Stellarator W7-X vorzunehmen. Die Beschreibung der völlig anderen magnetischen Konfiguration mit nicht zusammenhängenden Divertoren (island divertors) stellt eine ganz neue Herausforderung für den verwendeten DIVGAS Code dar. In diesem Zusammenhang soll DIVGAS auch zu plasmanahen Bereichen hin erweitert werden.

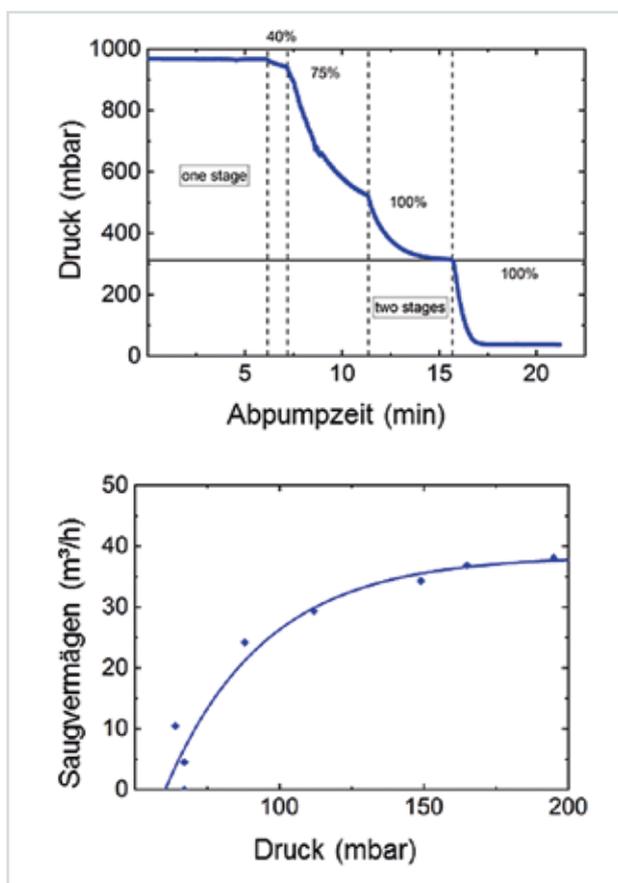
Kontakt: Stylianos.Varoutis@kit.edu

### Vakuumhydraulik

Das Forschungsthema Vakuumhydraulik fasst sämtliche Aktivitäten, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, vor allem Flüssigmetallen, in Maschinen und Prozessen unter Vakuum beschäftigen, zusammen und stärkt sie weiter. Dementsprechend arbeitet der Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP auch an Prozessen für den Umgang mit diesen Arbeitsmitteln, wie der Aufreinigung und Prozessierung von Quecksilber, sowie an der Entwicklung zugehöriger analytischer Verfahren. Dieses Forschungsthema wird so nur am KIT bearbeitet. Alle Experimente dazu sind in einer gemeinsamen Halle gebündelt (Bau 602).

Das Referenzkonzept für das Torusvakuumssystem von DEMO sieht stromabwärts der Metallfolienpumpen (siehe oben) eine Kombination aus Quecksilberbasierten Hoch- bzw. Grobvakuumpumpen vor. Derzeit wird dafür eine lineare Quecksilberdiffusionspumpe entwickelt, die für das Pumpen von Tritium in Magnetfeldern und mit einem Minimalinventar von Quecksilber als Arbeitsmittel ausgelegt ist. Als Vorpumpen sollen mit Quecksilber betriebene Ringpumpen dienen.

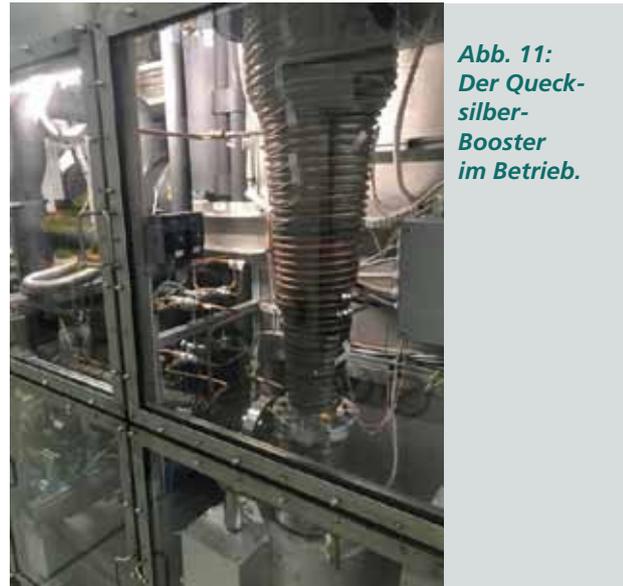
Ein Pumpstand aus zwei vollständig tritiumkompatiblen Flüssigkeitsringpumpen und einer Quecksilberdiffusionspumpe als Booster wurde entwickelt und gebaut. Ursprünglich war er für die DT-Kampagne in JET bestimmt, wird dafür aber nicht mehr eingesetzt, weil sich die Kampagne stark verzögert hat. Daher bleibt der Pumpstand am ITEP des KIT. Er ging 2019 erfolgreich in Betrieb. Abbildung 10 zeigt die charakteristischen Kurven für die Ringpumpe.



**Abb. 10: Leistungskurven der Quecksilberringpumpen.**

In der zweistufigen Anordnung wurden Drücke von einigen mbar erzielt, das nominale Saugvermögen einer Pumpe betrug 40 m³/h. Damit sind die untersuchten Ringpumpen bereits von DEMO-relevanter Größenordnung. Basierend auf den Messungen ist nun eine dreistufige Anordnung geplant, um das in DEMO erforderliche Übergabevakuum zu den Diffusionspumpen zu erzeugen. Das Design des im JET-Pumpstand eingebauten Boosters (Abbildung 11) ist nicht DEMO-relevant, erlaubt jedoch, wichtige Betriebserfahrungen mit der Quecksilberdiffusionspumpentechnologie zu sammeln. Zum Testen von quecksilberbetriebenen Pumpen und erforderlichen Komponenten bedarf es eines speziell dafür zugelassenen Labors. Dieses HgLab Karlsruhe ge-

nannte Labor ging 2018 in Betrieb und nahm seine Routineaufgaben auf (Abbildung 12).



**Abb. 11: Der Quecksilber-Booster im Betrieb.**



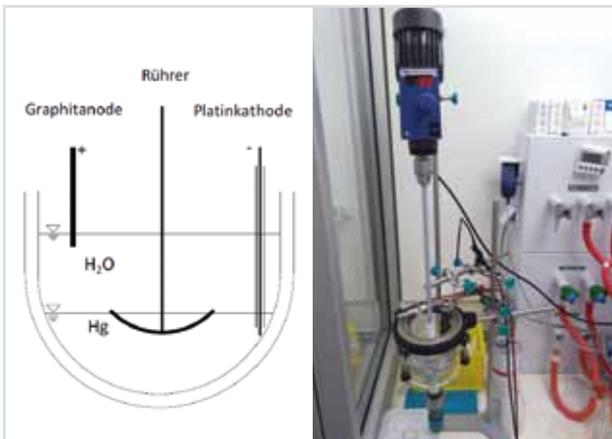
**Abb. 12: Blick in das Quecksilberlabor HgLab Karlsruhe.**

Der Laborraum wird über Atom-Adsorptions-Spektrometrie kontinuierlich auf den Quecksilbergehalt in der Raumluft überwacht. Für die Analyse von Flüssigmetallen verfügt das Labor über das massenspektroskopische Analyseverfahren Agilent ICP-MS 7900, das zur Spurenanalyse von Verunreinigungen in Quecksilber sowie zur Quantifizierung des Lithium-Isotopengehalts in wässrigen Lösungen dient. Die Entwicklung entsprechender ICP-MS Methoden hat bereits begonnen; sie ist wesentlich für alle Isotopentrennungs- und Quecksilberaufreinigungsarbeiten in den kommenden Jahren.

Im HgLab fanden im Rahmen einer Masterarbeit erste Untersuchungen zur Anreicherung des Gehalts an Lithium-6 in natürlichem Lithium statt (nominaler Li-6 Gehalt von 7,6 %). Hoch angereichertes Lithium-6 (Größenordnung 60 % bis 80 %) ist das Brutmaterial in den Blankets eines Fusionskraftwerks. In einer Systemanalyse wurden verschiedene Verfahren evaluiert, um das am besten geeignete Verfahren für die Aufgabe in der Fusion zu identifizieren: die industrielle Herstellung einer hohen zweistelligen Tonnenzahl angereicherten Lithiums pro Kraftwerk. Dabei handelt es sich um einen Isotopenaustausch zwischen Li-Amalgam und wässrigem LiOH in einem elektrolytischen Prozess. Um die Eig-

nung dieses Konzepts zu demonstrieren, wurde im HgLab ein kleiner Prinzipaufbau realisiert (Abbildung 13).

Der gefundene Auftrennungsgrad liegt um 1,05, womit ein vernünftiges Design in einer Vielstufenanordnung denkbar ist. Nicht zuletzt wegen dieser vielversprechenden Ergebnisse ist das Thema Lithium-Isotopenanreicherung ein zentraler Punkt des Bereichs „Zukunftstechnologien“ im nächsten Fusionsrahmenprogramm. Das HgLab wird damit zu einer zentralen europäischen Infrastruktur.



**Abb. 13: Versuchsaufbau zur Anreicherung von  $Li-6$  mit einem Quecksilberamalgame-Verfahren im HgLab.**

Kontakt: [Thomas.Giegerich@kit.edu](mailto:Thomas.Giegerich@kit.edu)

## Highlight: Weltgrößtes Saugvermögen dank einer extrem kompakten Getterpumpe mit neuen Materialien

Das Highlight 2019 bildet ein schönes Beispiel für eine langjährige Zusammenarbeit des ITEP mit einer Industriefirma, in diesem Fall SAES Getters Mailand, in EUROfusion. Vor rund zehn Jahren entwickelte das ITEP für die Neutralteilchenheizung in ITER noch ein großes Kryopumpsystem. Jetzt erarbeitet das Institut die wissenschaftlichen Grundlagen dafür, dieses Kryopumpsystem in DEMO eventuell durch ein Gettersystem zu ersetzen. Die Entscheidung wird, basierend auf den Resultaten, eventuell bereits 2020 fallen.

Dies wurde dadurch möglich, dass SAES ein neues Gettermaterial entwickelte, eine Zr-V-Ti-Al Legierung, die eine 100-mal höhere Wasserstoffspeicherkapazität aufweist. Damit lässt sich die Gettertechnologie zum ersten Mal auch bei Anwendungen mit nur moderaten Vakua und/oder hohen Teilchenflüssen einsetzen. Das neue Material liegt in Form von Scheiben mit einem Durchmesser von 25 mm vor.

Als erste Anwendung wurde die Dichtekontrolle im Gasneutralisator der Neutralteilchenheizung von DEMO erarbeitet. Dafür ist ein extrem hohes Saugvermögen nötig, was sich mit etwa 1,5 Millionen NEG-Scheiben realisieren ließe. Zur Entwicklung eines belastbaren Designs müssen allerdings die thermischen Effekte – besonders bei der Regeneration, die Temperaturen um 600 °C erfordert – und die erschwerte Zugänglichkeit der Scheiben durch Abschattungseffekte genau verstanden werden. In Zusammenarbeit mit SAES und Consorzio-RFX organisierte das ITEP ein mehrstufiges F&E-Programm, das Scheibenanordnungen auf verschiedenen Skalen experimentell untersuchte (Abbildung 14).

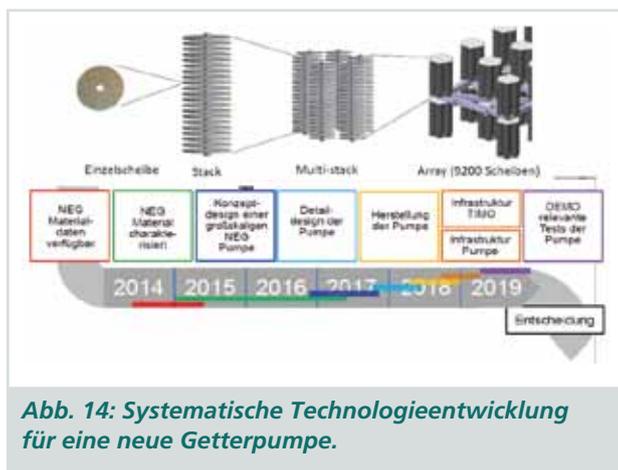


Abb. 14: Systematische Technologieentwicklung für eine neue Getterpumpe.

Darauf aufbauend wurde 2018 ein Detaildesign einer ersten Testpumpe entwickelt. Diese wurde 2019 gebaut und schließlich in die dafür umgewidmete Testanlage TIMO eingebaut. Diese Pumpe umfasst 34 Hexagon-Module mit insgesamt mehr als 9000 Einzelscheiben. Abbildung 15 zeigt das Team bei der Installation vor Ort am Institut und den Einbau in den Testbehälter. Der Test im September 2019 war äußerst erfolgreich, die gemessene Saugvermögenskurve ist in Abbildung 16 dargestellt (Beladung Wasserstoff  $H_2$ , 2,9 Torr-l/g; Druck  $2 \cdot 10^{-4}$  mbar).



Abb. 15: Einbau der Getterpumpe.

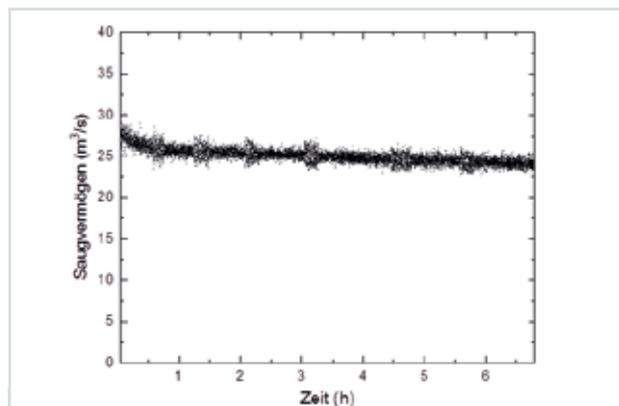


Abb. 16: Saugvermögenskurve der neuen Pumpe.

Dieses äußerst erfolgreiche Ergebnis lässt eine große Zukunft für die neue Technologie erwarten. Bedingt durch die große Zahl von geplanten Parametervariationen in TIMO wird ein Schlüssel-Know-how erarbeitet. Im November 2019 organisierten das KIT und SAES einen gemeinsamen Workshop, in dem potenzielle neue Anwendungen diskutiert wurden (Abbildung 17). Der Dank für diesen schönen Erfolg gebührt dem ganzen Team.



Abb. 17: Workshop zu den neuen Gettermaterialien.

Kontakt: Stefan.Hanke@kit.edu

# Preise und Auszeichnungen

Im Jahr 2019 wurden etliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP für wegweisende Arbeiten ausgezeichnet. Im Folgenden sind die Preise und Auszeichnungen aufgeführt.

**Valentin Tschan, Jan Sas und Klaus-Peter Weiss** erhielten den **Best Paper Award der International Cryogenic Material Conference 2019** in der Kategorie Strukturmaterialien für ihren Beitrag „Temperature dependence on tensile properties of Cu-40mass%Fe dual phase alloy“. Auf dem Programm der Konferenz stehen neueste Entwicklungen zur Kryotechnik und zur Supraleitung von den Materialien bis zur Anwendung. Das ausgezeichnete Paper wurde bereits 2017 präsentiert.

**Jörn Geisbüsch** bekam den **Best Presentation Award der Ninth International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies** für seinen Beitrag „Real-Time Simulation and System Integration“. Darin zeigt Jörn Geisbüsch unter anderem die vielfältigen Möglichkeiten des Energy Lab 2.0 des KIT und verknüpft diese Präsentation anschaulich mit einer Übersicht über den Stand der Entwicklung.

**Nicolò Riva** erhielt den **IEEE Council on Superconductivity Graduate Study Fellowship in Applied Superconductivity** für seine herausragenden Arbeiten zur Untersuchung des Quenchverhaltens von Hochtemperatur-Supraleitern für Energieanwendungen. Nicolò Riva ist Doktorand der Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) und verbrachte von 2018 bis 2019 ein Austauschjahr am ITEP. Wir möchten uns an dieser Stelle ganz herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit mit Bertrand Dutoit von der EPFL bedanken und freuen uns auf den weiteren Austausch.

**Yingzhen Liu** bekam den **Chinese Government Award for Outstanding Self-financed Students Abroad**. Bereits als Doktorandin hatte Yingzhen Liu erfolgreich ein von der DFG gefördertes Projekt zur Entwicklung grundlegender Technologien für supraleitende Windkraftgeneratoren eingeworben.

**Christian Day** wurde von der Europäischen Kommission als Mitglied in das **Broader Approach Project Committee** berufen. In diesem gehört er dem Team zum „Satellite Tokamak Project“ an und berät die weitere Arbeit an dieser für die Fusion wichtigen Entwicklung.

**Michael Wolf und Walter Fietz** erreichten den **3. Platz im Wettbewerb um den KIT Neuland Innovationspreis** in der Kategorie **Technologietransfer** für das Projekt „Hochtemperatur-Supraleiter CrossConductor – ein Basiselement für energieeffiziente DC Hochstrom Kabel“. Damit wird die erfolgreiche Entwicklung des am ITEP patentierten Verfahrens zur Herstellung von Hochstromleitern mit supraleitenden Bandleitern ausgezeichnet. Mit diesem bereits an einen Industriepartner lizenzierten Verfahren lassen sich kompakte und leistungsfähige Hochstromleiter auf einfache Weise herstellen.



*Abb. 1: Walter Fietz (Vierter von links) bei der Verleihung des KIT Neuland Innovationspreises.*

**Klaus-Peter Weiss** erhielt den **1906 Award der International Electrotechnical Commission** für seine wertvollen Beiträge in der Arbeitsgruppe IEC TC 90. Bei der International Electrotechnical Commission (IEC) handelt es sich um eine internationale Normungsorganisation für Normen der Elektrotechnik und Elektronik. Das Technische Komitee TC 90 erarbeitet Standards und Normen für Supraleiter. Unter anderem geht es dabei um Messverfahren zur Bestimmung des kritischen Stroms von Supraleitern.



*Abb. 2: Klaus-Peter Weiss (rechts) bei der Übergabe des IEC 1906 Awards.*

**Bernhard Holzapfel** bekam den **Rudolf-Jaeckel Preis 2019 der Deutschen Vakuumgesellschaft (DVG)** für seine herausragenden Leistungen und bahnbrechenden Beiträge zur Etablierung der Laserdeposition in der Dünnschichttechnik, speziell zur Präparation oxidischer dünner Schichten, besonders supraleitender, magnetischer und ferroelektrischer Schichten. Die Auszeichnung würdigt hervorragende Leistungen in den vakuumge-



*Abb. 4: Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (Dritter von links) bei der Verleihung des Rudolf-Jaeckel Preises der DVG.*

stützten Wissenschaften, vor allem langjährige und bahnbrechende Arbeiten zu den Grundlagen der von der DVG betreuten Gebiete und zu deren Anwendungen und Umsetzungen in der wissenschaftlichen und industriellen Praxis.

Das **Gebäude Energy Lab 2.0, Bau 668**, bekam den **Preis für Beispielhaftes Bauen des Landkreises Karlsruhe**. Besonders lobte die Jury die angenehme Arbeitsatmosphäre in der Versuchshalle und den Büros. Sie würdigte das Gebäude als einen innovativen, attraktiven und hochwertigen Ort für die Forschung. Im Bau 668 sind das Datenkontroll- und Simulationszentrum sowie das Microgrid und der 1 MVA-Power-Hardware-in-the-Loop-Teststand untergebracht. Wir bedanken uns beim Architekturbüro Behnisch und beim Facility Management des KIT für die vortreffliche Zusammenarbeit während der Errichtung des Gebäudes.



*Abb. 3: KIT Energy Lab 2.0, Gebäude 668.*

Wir freuen uns außerordentlich über diese Anerkennungen der Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und danken ihnen sehr für ihre exzellenten Arbeiten.

# Abgeschlossene Doktorarbeiten

Dr. Simon Otten

## Charakterisierung von REBCO Roebel-Kabeln

Das Roebel-Kabel aus HTS-Drähten der zweiten Generation (REBCO coated conductor), ein am ITEP erstmals realisiertes Konzept, wird derzeit für spezielle Anforderungen verschiedener Anwendungen weiterentwickelt. Hergestellt werden Roebel-Kabel, indem mäanderförmig geschnittene REBCO-Bandleiter zu einem Kabel verseilt werden. Die Kabel besitzen einen hohen Füllgrad, eine volle Transposition der Einzelleiter und eine dem einzelnen REBCO-Band entsprechende mechanische Biegefähigkeit. Im europäischen Projekt EuCARD-2 und den Nachfolgeaktivitäten werden mehrere HTS-Dipolmagnete vom Beschleunigertyp gebaut. Für zwei Designs, das „Aligned-block-coil“ (CERN) und das „Cosine-theta-coil“ (CEA Saclay), wurde das Roebel-Kabel wegen seiner hohen Stromdichte und der vollständigen Transposition der Bänder als Leiter ausgewählt. Das Design beider Spulen wurde ausgelegt, ein Magnetfeld von 5 T im Eigenfeld bzw. Felder von 15,5 T („Aligned-block-coil“) und 16,9 T („Cosine-theta-coil“) in einem 13 T Hintergrundfeld. Diese Felder wären absolute Rekordwerte für supraleitende Dipolmagnete. In diesem Projekt hatte das ITEP die Aufgabe, Roebel-Kabel bis 32 m Länge – die bis jetzt größte Länge – zu entwickeln und bereitzustellen. Die speziellen Anforderungen von Beschleunigermagneten an das Kabel warfen viele Fragen zu den mechanischen, elektromagnetischen und thermischen Eigenschaften der Roebel-Kabel auf. Daraus ergab sich die Motivation zu den Untersuchungen dieser Doktorarbeit.

Die Dissertation besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil geht es um die mechanischen Eigenschaften der REBCO coated conductors und der Roebel-Kabel. Torsionen und Biegungen treten während des Spulenwickelns auf, wohingegen in Hochfeldanwendungen die Lorentzkräfte zu transversalen Spannungsbelastungen führen. Der Einfluss dieser Deformationen auf die Kabelperformance wurde in Kurzprobenexperimenten

untersucht. Dazu wurde ein Aufbau wie in Abbildung 1 verwendet.

Festgestellt wurde, dass das blanke Roebel-Kabel ohne jegliche Imprägnierung bereits bei transversaler Druckbelastung von nur 40 MPa irreversibel geschädigt wird. Dieser Wert liegt weit unterhalb der berechneten Spannungswerte von 110 MPa für das „Aligned-block-coil“ Design und 220 MPa für das „Cosine-theta-coil“ Design der Dipolmagnete, die im Projekt EuCARD-2 entwickelt werden. Durch Imprägnation mit Epoxidharz wurde die Widerstandsfähigkeit gegen transversale Spannung bei zwei Roebel-Kabeln auf Werte von 253 MPa und 169 MPa gesteigert. Dieses Ergebnis stellt einen wichtigen Schritt in der weiteren Entwicklung von Roebel-Kabeln für die Anwendung in Beschleunigermagneten dar. Die Biegeeigenschaften der Roebel-Kabel senkrecht zur Ebene (out-of-plane) wurden untersucht. Das Biegeverhalten der Roebel-Kabel ähnelt stark dem der einzelnen Bandleiter, aus denen sie bestehen. Erklären lässt sich dies mit dem vernachlässigbaren Einfluss der Kabelgeometrie auf die Biegespannung, da die Einzelbänder im Kabel frei gleiten können. Daher lässt sich das Biegeverhalten des Kabels aus den Ergebnissen der Einzelbänder ableiten. Die Biegeeigenschaften vieler einzelner und verschiedener Bandleiter wurden in beiden Biegerichtungen vermessen, wobei dem reversiblen Verhalten besondere Aufmerksamkeit galt. Alle getesteten Leiter konnten im kompressiven Bereich bis zu einem Biegeradius von 6 mm ohne permanente Schädigung gebogen werden. Abschließend wurde ein Torsionsexperiment durchgeführt, bei dem Kabelproben durch Eindrehen in eine 3D-gedruckte Form tordiert wurden. Die 3D-Formen wurden so ausgeführt, dass das Roebel-Kabel in die gleiche Torsion verformt wurde, wie sie in der inneren Wicklung des EuCARD-2-cosine-theta-Magneten vorliegt. Als Ergebnis wurde kein Einfluss des erzwungenen Twistpitches von 389 mm festgestellt. Die Machbarkeit des Magnetdesigns für die kritischste innere Windung wurde damit validiert.

Der zweite Teil der Dissertation befasst sich mit Auswirkungen des elektrischen Widerstands zwischen den Einzelleitern (Strands) auf die Kabeleigenschaften. Roebel-Kabel mit geringem Widerstand zwischen den Strands gestatten Stromumverteilung entlang des Kabels und verbessern damit die thermische Stabilisierung durch das Angebot von alternativen Strompfaden an Schwachstellen im Leiter. Niedrige Kopplungswiderstände gestatten aber auch Kopplungsströme, die durch zeitveränderliche Magnetfelder angeworfen

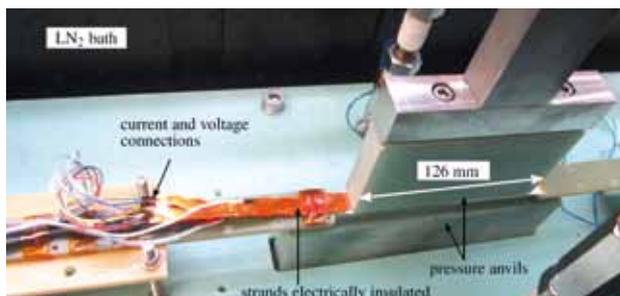


Abb. 1: Messaufbau zur Untersuchung von transversalen Spannungsbelastungen von Roebel Kabeln

werden. Diese Kopplungsströme fließen durch die resistiven Grenzflächen zwischen den Strands und verursachen elektrische Energieverluste, als Kopplungsverluste bezeichnet. Kopplungsverluste sind unerwünscht, weil durch die entstehende Erwärmung Stabilitätsprobleme auftreten können und zusätzliche Kühlleistung erforderlich ist. Der Einfluss des Widerstands zwischen den Strands sowohl auf die elektrische und thermische Stabilisierung als auch auf die Wechselstromverluste muss verstanden werden, bevor der Widerstand auf den besten Kompromiss optimiert werden kann. Ein neuer Versuchsaufbau wurde errichtet, um den Widerstand zwischen den Strands als Funktion eines auferlegten transversalen Pressdrucks zu messen. Der Widerstand zwischen den Strands wurde durch Beaufschlagen eines Stroms zwischen den beiden gegenüberliegenden Strands und Vermessen der Spannungsprofile zwischen allen Strandpaaren bestimmt. Die Spannungsprofile lassen sich anhand eines Modells und der Definition zweier Parameter beschreiben:  $p_a$  – der längennormierte Widerstand zwischen nebeneinanderliegenden, sich direkt berührenden Strands, und  $p_c$  – der längennormierte Widerstand zwischen beliebigen Strandpaaren. Mit einem Least-Square-Fit an den gemessenen Spannungsprofilen wurden  $p_a$  und  $p_c$  in verschiedenen Kabeln bestimmt. In gepressten Kabeln wurden Widerstände  $p_a$  im Bereich von  $2,5 \mu\Omega$  bis  $28 \mu\Omega$  gefunden, abhängig vom Pressdruck. Die Werte für  $p_c$  waren in den gepressten Kabeln viel größer als die für  $p_a$ , was auf einen guten Kontakt lediglich zwischen benachbarten Strands hinweist. Um den Widerstand zwischen den Strands zu modifizieren, wurden einige verlötete Kabel präpariert. Diese Kabel besaßen einen viel niedrigeren Widerstand von  $p_a = 0,19 \mu\Omega$  bis  $0,23 \mu\Omega$  und  $p_c = 2,4 \mu\Omega$  bis  $2,9 \mu\Omega$  zwischen den Strands. Die erhaltenen Messwerte gelten nicht allgemein, sondern hängen von der Kabelgeometrie ab. Mit dieser Methode der Widerstandsmessung zwischen den Strands und der Modellierung werden die verlässlichsten Ergebnisse für die Strandkopplung gewonnen. Der Einfluss des Widerstands zwischen den Strands auf die AC-Kopplungsverluste wurde in einem senkrecht zum Kabel orientierten sinusförmigen Magnetfeld untersucht. Eine Formel zur Beschreibung der Kopplungsverluste ergab sich durch Vereinfachung der Kabelgeometrie in zwei parallele Streifen mit Definition eines effektiven Widerstands. Zusätzlich wurden die Wechselstromverluste inklusive der Beiträge von sowohl Hysterese- als auch Kopplungsverlusten numerisch für den Kabelquerschnitt berechnet. Beide Methoden verwenden den Widerstandswert  $p_a$  benachbarter Strands als Eingangsparameter. Die berechneten Werte wurden mit Wechselstromver-

lustmessungen mit einer kalibrationsfreien Methode verglichen. Einige Roebel-Kabel mit unterschiedlichen Kopplungswiderstandswerten wurden hergestellt. Der Kopplungswiderstand wurde durch elektrische Isolation der Strands, Anwendung von Pressdruck oder Verlöten modifiziert. Eine akzeptable Übereinstimmung mit dem numerischen Modell wurde für Magnetfeldamplituden von 5 mT oder höher gefunden. Die angewandte Formel für Kopplungsverluste schätzt diese zu hoch ein, vermutlich weil sie die Abschirmeffekte des Supraleiters nicht berücksichtigt. Sie ist jedoch für die Abschätzung einer Obergrenze für die Kopplungsverluste als Funktion von  $p_a$  sinnvoll. Abschließend wurde der Einfluss des Kopplungswiderstands der Strands auf die Stabilisierung des Kabels untersucht. Die Stabilisierung wird quantifiziert durch die minimale Quenchenergie (MQE), definiert durch den kleinsten lokal erzeugten Wärmepuls in einem Strand, der zu einem Quench des gesamten Kabels eskaliert. Zur Berechnung der MQE unter Berücksichtigung der Stromumverteilung wurde eine einfache Methode vorgeschlagen. Die Strom- und Temperaturverteilungen werden dabei mit einem Satz partieller Differentialgleichungen des Diffusionstyps beschrieben, die numerisch gelöst wurden. Diese Methode benutzt den Kopplungswiderstand der Strands  $p_a$  und die transversale thermische Leitfähigkeit als Parameter. Zahlreiche MQE-Berechnungen mit verschiedenen Parametern wurden durchgeführt. Dabei ergab sich der allgemeine Trend einer verbesserten Stabilisierung, wenn eine Stromumverteilung möglich ist. Die Wärme verbleibt dabei jedoch am Strand. Das geschieht, wenn sowohl der Kopplungswiderstand als auch die transversale Wärmeleitung klein sind. Zusätzlich zu den Berechnungen wurde ein Experiment an kurzen Roebel-Kabeln durchgeführt. Ein Graphit-Epoxidharz-Heizer wurde an einem Strand platziert, um Wärmepulse zu erzeugen. Das Kabel war in einem GFK-Probenhalter im Vakuum und wurde durch Wärmeleitung gekühlt. Die MQE wurde bestimmt durch eingekoppelte Wärmepulse mit zunehmender Intensität, bis ein Quench auftrat. Die Messungen wurden mit unterschiedlichen aufgeprägten Strömen durchgeführt, bei Temperaturen zwischen 73,5 K und 84 K. MQE-Werte zwischen 0,08 J und 2,2 J wurden gemessen; sie sanken auf null, wenn sich der auferlegte Strom dem kritischen Wert näherte. Die experimentellen Resultate wurden unter Einbeziehung der Kopplungswiderstände mit den berechneten MQE-Werten verglichen. Die beste Übereinstimmung ergab sich mit einer niedrigen thermischen Wärmeleitung von  $0,001 \text{ W/Km}$ . Dies weist auf einen äußerst geringen thermischen Kontakt zwischen den Strands im Kabel hin.

## Dr. Pattabhi Vishnuvardhan Gade

### Konzeptionelles Design von Hochtemperatur-Supraleiter toroidalen Feldspulen für zukünftige Fusionskraftwerke

Aus der langjährigen Forschung zum magnetischen Einschluss des Plasmas in Fusionsreaktoren sind zwei Konzepte entstanden: Tokamak und Stellarator. Beide nutzen starke ungleichmäßige Magnetfelder zum Einfangen der Plasmapartikel und ermöglichen diesen, sich frei auf bestimmten Wegen zu bewegen. Die Tokamaks haben dank eines einfacheren Spulendesigns, verschachtelter magnetischer Oberflächen sowie der Fähigkeit, mit positiver magnetischer Scherung zu arbeiten, an Bedeutung gewonnen. Derzeit plant die Europäische Union, ihre Studien zu Tokamaks auf ein Demonstrationskraftwerk (EU-DEMO) auszudehnen, das Strom erzeugen kann. Ziel dieser Arbeit war, ein Konzept für die Ringkernfeldspule (Toroidalfeldspule – TF-Spule) für zukünftige Kraftwerke mit dem Systemcode PROCESS zu entwickeln.

Der PROCESS-Code enthält bestimmte Informationen, unter anderem zur ungefähren Form der TF-Spule, zur Fläche des Wickelpaketes und zum Magnetfeld an der Plasmaachse. Ausgehend vom Eingang wird das Wickelpaket der TF-Spule entworfen, zum Beispiel, wenn die Pancake-Wicklung gegenüber der Lagen-Wicklung bevorzugt wird. Die erste Lage, die der Plasmawärme zugewandt ist, wird angesammelt, da sie sich im Hochfeldbereich befindet, wodurch der Magnet mit einer geringeren Betriebsmarge arbeitet. Der Leiter der Pancake-Wicklung ist jedoch in Umfangsrichtung und nicht entlang der Achse eines Magneten gewickelt; jedes Modul ist separat gewickelt und elektrisch in Reihe geschaltet. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Temperatur im Hochfeldbereich am niedrigsten ist, da sich der Heliumeinlass im Hochfeldbereich des Wickelpaketes, der Auslass im Niederfeldbereich befindet. Das Wicklungspaket mit der elektrischen Schaltung ist in Reihe geschaltet, die hydraulische Schaltung ist parallel geschaltet.

Anhand des PROCESS-Codes wurde überprüft, ob das Magnetfeld an der Plasmaachse gleich dem erforderlichen Magnetfeld ist. Das Spitzenmagnetfeld wurde auch zur Bestimmung des Arbeitspunkts des Leiters berechnet. Die dreidimensionale elektromagnetische Simulation wurde mit dem Präprozessor TOKEF und dem Code EFFI durchgeführt. Dabei handelt es sich um Codes zur Magnetfeldberechnung einer allgemeinen dreidimensionalen Stromverteilung. Sie verwenden Formulierungen, die auf einer fadenförmigen Annäherung und der endlichen Leitergröße basieren. Diese Codes wurden durch eine Reihe von verteilten Filamenten unter Verwendung der EFFI-Formel, die aus dem Bio-Savart Gesetz für die Volumenstromverteilung abgeleitet wurde, approximiert. Als ein Ergebnis zeigt Abbildung 2 den Magnetfeldverlauf im Querschnitt des Wickelpaketes.

Die Statik der TF-Spule bestimmt die Spannungen im Spulengehäuse und im Wickelpaket. Der Bereich mit den höchsten Spannungen liegt in der Mittelebene des inneren Schenkels, was durch eine ähnliche Analyse mit dem Spulenmagnetsystem JT-60SA TF bestätigt wurde. Im EU-DEMO führt die TF-Spule hohe Ströme (in MA) und erzeugt hohe Felder. Die TF-Spule ist daher hohen magnetischen Drücken und Kräften ausgesetzt. Um die Spannungen im Wickelpaket und am Gehäuse zu untersuchen, wurden in COMSOL und ANSYS verschiedene Methoden zur Analyse der Spannungen am Gehäuse, des Lösens des Wickelpaketes und der Spannungen in Isolationsbauteilen betrachtet.

Ein wichtiger Fehlerfall, der bei der Konstruktion supraleitender Magnete zu berücksichtigen ist, ist der Übergang von der supraleitenden zur normalleitenden Phase, der sogenannte Quench. Da im normalleitenden Modus der elektrische Widerstand des Supraleitermaterials hoch ist, bewirkt die Einführung von Kupfer als elektrischer Ableiter für den Stromfluss eine Joule-Erwärmung. Der Magnet muss durch Anschluss eines externen Widerstands parallel zum Magneten entladen werden, um einen übermäßigen Temperaturanstieg zu vermeiden. Die maximal zulässige adiabatische Hotspot-Temperatur, wie sie für den International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) festgelegt wurde, ist auf 150 K begrenzt, wobei alle Materialien im Leiter berücksichtigt werden, das heißt Supraleiter, Kupfer, Helium, Edelmantel und Isolierung. Um die Quenchausbreitung zu simulieren, wurde eine externe Heizung in den Supraleiter eingesetzt und überprüft, wie die Ausbreitung ist und welche maximale Temperatur sie während der Entladungszeit erreicht.

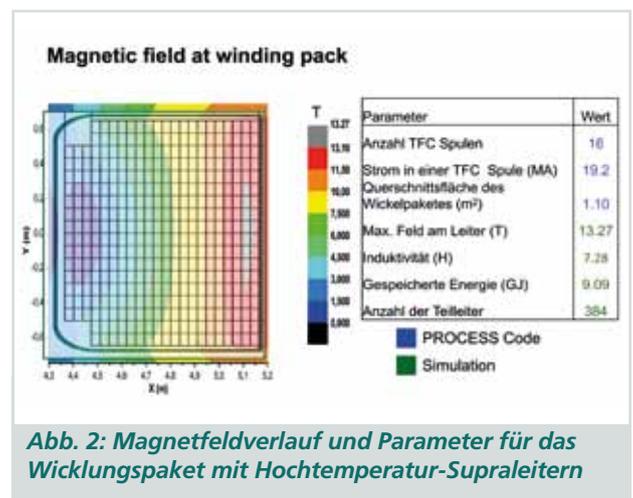


Abb. 2: Magnetfeldverlauf und Parameter für das Wicklungspaket mit Hochtemperatur-Supraleitern

## Dr. Alan Preuss

### Entwicklung von Hochtemperatur-supraleitenden Kabeln für Hochstromanwendungen

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung, Herstellung und Prüfung der supraleitenden Elemente eines 35 kA-HTS-DC-Kabeldemonstrators. Drei wichtige HTS-Hochstromleiterkonzepte – Stapel, Roebel und Cable on Round Core (CORC) – wurden analysiert. Ausgewählt wurde das HTS Cross Conductor (HTS CroCo) Stapelkonzept. Für Hochstromanwendungen wurde ein Designprozess für HTS-Gleichstromkabel entwickelt. Basierend auf dem Designprozess wurde ein 100 kA-Kabeldesign auf Basis von 36 CroCos entwickelt und anschließend auf einen 35 kA-Kabeldemonstrator mit zwölf CroCos herunterkaliert. Die Länge des Kabeldemonstrators wurde auf 3,6 m, die Betriebstemperatur wurde auf 77 K festgelegt. Vor der CroCo-Herstellung wurde eine Studie über das Degradationsverhalten der kritischen Stromdichte von HTS-Bändern der zweiten Generation unter thermischer Belastung durchgeführt. Diese Untersuchungen sind notwendig, da HTS-Bänder während der Herstellung oft thermischen Belastungen ausgesetzt sind, beispielsweise durch Löten. Ein Verständnis des genauen Degradationsverhaltens kann daher zur Optimierung von Fertigungsprozessen beitragen. Die Untersuchung ergab ein vorhersagbares und wiederholbares Degradationsverhalten, verursacht offenbar durch die Sauerstoffverarmung des Kristalls. Sie zeigte, dass Zinn-Silber-Lote eine kostengünstige Alternative zu bleihaltigen Loten in der CroCo-Herstellung sein könnten.

Für die Herstellung der CroCos wurden Supraleiter zweier Hersteller auf ihre Kompatibilität mit dem CroCo-Herstellungsprozess untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass Supraleiter eines Herstellers grundsätzlich kompatibel sind, aber starke Tendenzen zu einer ungleichen Verteilung von galvanisiertem Kupfer aufweisen. Supraleiter des anderen Herstellers erwiesen sich zum Zeitpunkt der Untersuchung als nicht kompatibel, sind aber vielversprechende Kandidaten für zukünftige Arbeiten. Der CroCo-Herstellungsprozess wurde weiterentwickelt, um eine runde äußere Lötmatrix zu integrieren. Darüber hinaus wurde der Herstellungsprozess angepasst, um Supraleiter mit minimalem galvanisiertem Kupfer – ca. 5  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  – zu erlauben, was dazu beiträgt, die Kosten für die Supraleiter zu senken. Um diese Veränderungen zu er-



Abb. 3: Aufbau eines 35 kA DC Kabeldemonstrators mit 12 einzelnen CrossConductor Leitern

möglichen, wurde eine neue CroCo-Fertigungsmaschine eingerichtet. Die zwölf im Demonstrationskabel verwendeten CroCos wurden in acht Produktionsläufen produziert. Aus jedem CroCo-Produktionslauf wurden ein oder zwei der gewünschten 3,6 m langen CroCos geschnitten. Der kritische Strom jeder der zwölf CroCos wurde unter Eigenfeldbedingungen bei 77 K gemessen und variierte zwischen 2890 A und etwa 3680 A. Die relativ große Variation ist auf die Optimierung zahlreicher Fertigungsschritte und eine steigende Leistung der Supraleiter zurückzuführen. Die Arbeit zeigte, dass sich der kritische Strom eines CroCo zuverlässig berechnen lässt, basierend auf dem durchschnittlichen kritischen Strom der Supraleiter, die zur Herstellung des CroCo verwendet werden. Lötverbindungen wurden eingesetzt, um die CroCos mit normalleitenden Kupferkabeln zu verbinden. Der Widerstand dieser Verbindungen betrug im Durchschnitt 200 n $\Omega$  mit einer Standardabweichung von 43 n $\Omega$  bei 77 K. Dies würde zu einer Wärmelast von ca. 0,7 mW pro Anschluss bei einem Betriebsstrom von 3500 A führen, was für die meisten Anwendungen ausreichend niedrig sein sollte.

Für den Test des Kabeldemonstrators wurde ein 6 m langer, 1 m breiter und 0,8 m hoher Kryostat entwickelt und gebaut. Das Demonstrationskabel selbst besteht aus den zwölf CroCos mit je 22,6 mm breiten und zehn 4 mm breiten Supraleiterbändern. Die CroCos sind auf einem Aluminiumkern mit einem Durchmesser von 110 mm montiert und parallel geschaltet. Während der Messreihe erreichte der Kabeldemonstrator (Abbildung 3) einen stationären Strom von 34 kA und 35 kA für kurze Zeit. Eine Analyse der Stromverteilung während des Kabeltests ergab eine relativ große Streuung der Stromverteilung über die CroCos, die wahrscheinlich dadurch verursacht wurde, dass Wasser zwischen den Kontakten kondensierte und somit den Übergangswiderstand erhöhte. Ein CroCo wurde nach dem Test vom Demonstrator demontiert, um sicherzustellen, dass keine Degradation auftrat, beispielsweise durch Spannungen während der Abkühlung.

Diese Arbeit schließt mit einer Fallstudie über ein supraleitendes Kabel in einer Aluminium-Elektrolyseanlage. Sie zeigt, dass die Energieeinsparungen für ein 500 m langes supraleitendes Kabel der Klasse 100 kA im Vergleich zu einer herkömmlichen Aluminium-Sammelschiene im Bereich von 6 GWh bis 6,5 GWh pro Jahr liegen, was in etwa dem jährlichen Energieverbrauch von 2000 Zwei-Personen-Haushalten in Deutschland entspricht. Die Investitionskosten für das oben beschriebene supraleitende System sind derzeit drei- bis sechsmal höher als die für ein herkömmliches Aluminium-Sammelschienensystem. Die großen Unterschiede in den Investitionskosten für das supraleitende System sind weitgehend auf eine große Varianz der Supraleiterkosten zurückzuführen, welche die Investitionskosten dominieren. Der Break-even-Point zwischen dem supraleitenden System und dem konventionellen System für die minimalen Investitionskosten beider Systeme liegt bei einem Strompreis von ungefähr 30 C/MWh, berechnet über einen Zeitraum von 40 Jahren.

## Dr. Roland Gyuráki

### Thermische Bildgebungsmethode zur Untersuchung von transienten Effekten in hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern und Spulen

Diese Arbeit fokussiert auf Entwicklung und Demonstration einer Wärmebildmethode, basierend auf fluoreszierenden mikrothermographischen Aufnahmen, zur Untersuchung von HTS-Bandleitern und Spulen im transienten Zustand. Durch die Hochskalierung der fluoreszierenden Wärmebildtechnik wurde ein neues Messverfahren demonstriert, das 2D-Temperaturen von Objekten deutlich besser und größer als bisher erfasst. Weiterhin liefert eine kommerzielle Hochgeschwindigkeitskamera Aufnahmen in einer deutlich höheren zeitlichen Auflösung. Dadurch erlaubt das Verfahren auch die Erfassung von transienten thermischen Effekten. Die entwickelte hochgeschwindigkeitsfluoreszierende Wärmebildtechnik benutzt Europiumtris (EuTFC) als fluoreszierenden Farbstoff mit präzise gemessenen temperaturabhängigen, fluoreszenten Lichtemissionen. Der Farbstoff wurde durch Tröpfchenbeschichtung auf die Oberfläche der Proben aufgebracht und anschließend einer Wärmebehandlung von 30 min bei 175 °C unterzogen, um die Beschichtung zu stabilisieren. Die beschichteten Proben wurden auf 77 K gekühlt und die fluoreszierende Oberflächenbeschichtung wurde mit UV-LEDs angeregt. Im Bereich von 77 K bis 260 K verringert sich die fluoreszente Lichtintensität nahezu linear, wobei die Farbe unverändert bleibt. Um Temperaturen aus den Wärmebildaufnahmen berechnen zu können, wurden zuerst sowohl die Kalibrierung des Farbstoffs als auch die Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera bei einer definierten Temperatur – 77 K, Siedepunkt von flüssigem Stickstoff bei atmosphärischem Druck – normalisiert. In der Nachbearbeitung lässt sich somit die Oberflächentemperatur in den Aufnahmen anhand der Kalibrierkurve bestimmen.

Zur Demonstration wurde das Verfahren zur qualitativen Quenchmessung an HTS-Bandleitern sowie zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der normalleitenden Zone in flüssigem Stickstoff eingesetzt. Kurze Stromimpulse, nahe der kritischen Stromstärke, wurden auf mehrere Bänder mit unterschiedlichen Architekturen angewandt; sie zeigten Effekte, wie sie zuvor auch in der Literatur vorgestellt worden waren, allerdings aus thermischer Sicht. Die Erwärmung der Bandleiter in Form von Streifen an mehreren Stellen zugleich war, bei Pulsen deutlich über dem kritischen Strom des Supraleiters, in mehreren Messungen sichtbar. Dies zeigt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der normalleitenden Zone komplexer ist als bei einer einzelnen normalleitenden Zone, die sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit in eine Richtung ausbreitet, und dass die Amplitude des Strompulses nicht nur die Ausbreitungsgeschwindigkeit, sondern auch das Verhalten des Quenchs signifikant beeinflusst. Die Arbeit zeigte auch, dass Ströme deutlich über dem kritischen Strom in Bandleitern mit Kupferstabilisierung quasi sofort in die Stabilisierung übertragen werden. Stromimpulse rund um den kritischen Strom – sowohl in Leitern ohne Stabilisierung als auch in stabilisierten HTS-Bandleitern – verursachen jedoch eine einzige Quenchstelle, die sich ausbreitet und den Messbereich der Wärmebildaufnahmen schnell überschreitet.

Die aus den Wärmebildaufnahmen errechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten wurden mit elektrischen Messungen der Ecole Polytechnique Montreal verglichen, um das Verfahren zu evaluieren. Obwohl die beiden Methoden Quench und Ausbreitungsgeschwindigkeit durch verschiedene physikalische Ansätze definiert sind, zeigten die Ergebnisse, dass bei hohen Stromamplituden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten ähnlich waren. Da die Erwärmung mit der zweiten Potenz des Stroms skaliert, ist anzunehmen, dass in Bandleitern mit hohen kritischen Stromstärken das elektrische Feld und die Erwärmung sich nahezu zeitgleich ausbreiten. In HTS-Bändern mit niedrigeren kritischen Stromstärken lieferte das fluoreszente Wärmebildverfahren wegen der deutlich geringeren Heizleistung jedoch konstant niedrigere Werte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der normalleitenden Zone.

Die Wärmebildmethode wurde auch angewandt, um zwei Pancake-Spulen zu testen. Eine der Spulen wurde als konventionelle isolierte Spule gewickelt. Für die zweite Spule wurde die neue nicht isolierte Wickelmethode benutzt. In den Messungen wurde die Oberfläche der Spulen mit dem fluoreszierenden Farbstoff beschichtet und durch Leitungskühlung im Messaufbau bei 77 K gemessen. Die Selbstschutzmechanik der nicht isolierten Spule wurde in einer der Messungen beobachtet: Die Wärmebildaufnahmen zeigten eine schnelle Umverteilung der Ströme – und der Heizung – innerhalb der Spule während des Betriebs im überkritischen Strombereich. In einer anderen Messung wurde ebenfalls ein thermischer Runaway bei 110 % des kritischen Stroms beobachtet. Über einen Zeitraum von ~60 s verursachte ein langsamer, aber stetiger Spannungsanstieg einen Stromfluss in die radiale Richtung. Jedoch waren keine lokalen Hot Spots und keine ausgeprägte Aufheizung zu erkennen. Ein schneller Temperaturanstieg zeichnete sich während des Übergangs in den normalleitenden Zustand ab, wobei sich die inneren Windungen der Spule bis zu 100 K erwärmten, was den schwächsten Punkt der Spule anzeigt. Die Spule wurde manuell entladen, um Schaden vorzubeugen. Die Erwärmung konzentrierte sich in der Mitte der Spule und umfasste nur einige der innersten Windungen. Die Ausbreitung der Wärmezone in die Querrichtung war vernachlässigbar. Um einen Defekt künstlich zu erzeugen und die Stabilität der Spule zu untersuchen, wurde ein elektrischer Widerstand auf die Spulenoberfläche geklebt und als Heizkörper benutzt. Nach einem 7 s langen Heizimpuls mit einer Leistung von 3,2 W wurde ein

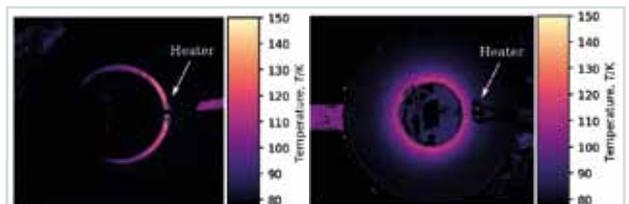


Abb. 4: Temperaturentwicklung an einer isolierten Spule (links) und nicht isolierten Spule (rechts) nach Initiierung eines Quenchs mit einem Heizer

thermischer Runaway erzeugt, bei dem sich die Spule nach Ende des Heizpulses nicht mehr stabilisierte (Abbildung 4). Der Temperaturanstieg wurde um den Heizkörper herum lokalisiert, wo er sich entlang der Wicklungen in Kontakt mit dem Heizkörper ausbreitete, jedoch

nicht in Querrichtung. Die Temperaturen erreichten bis zu 150 K, woraufhin die Spule schnell entladen wurde.

## Dr. Thomas Markus Kochenburger

### Kryogene Gemischkältekreisläufe für Hochtemperatursupraleiter-Anwendungen

Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) haben bereits in mehreren Pilotprojekten ihre Leistungsfähigkeit in Kabeln, Stromschienen, Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren gezeigt. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit geschlossener Kälteprozesse im relevanten Kälteleistungsbereich von einigen kW müssen sie meist durch Vakuumverdampfung von Flüssigstickstoff bei 65 K bis 77 K in offenen Prozessen gekühlt werden.

Kryogene Gemischkältekreisläufe (CMRC), die großtechnisch zur LNG-Produktion eingesetzt werden, ermöglichen eine effiziente, kostengünstige und zuverlässige Kühlung im Temperaturbereich von ca. 80 K bis 150 K bei nahezu unbegrenzter Skalierbarkeit. Um die Vorteile von geschlossenen CMRC-Kühlprozessen für HTS-Anwendungen nutzen zu können, müssen die Kühltemperaturen gesenkt werden. Dies ging bisher mit einem starken Effizienzeinbruch einher. Aus Sicherheitsgründen werden zudem unbrennbare Kältemittelgemische den üblicherweise verwendeten Stickstoff-Kohlenwasserstoff-Gemischen vorgezogen. Die Arbeit soll zur Lösung dieser Probleme beitragen.

Zunächst wurden geeignete Komponenten für weitsiedende, unbrennbare Kältemittelgemische mit niedrigem Gefrierpunkt identifiziert. Neben den bisher verwendeten fluorierten aliphatischen Kältemitteln wurde auch das erst seit einigen Jahren verfügbare Kältemittel R1234yf als neue mögliche Gemischkomponente betrachtet. Auf der Grundlage eines Überblicks über bisherige Arbeiten wurde ein zweistufiger Kühlprozess für HTS-Anwendungen konzipiert. Charakteristisch ist in der ersten Stufe die Verwendung eines unbrennbaren Kältemittelgemischs, in der zweiten Stufe ein deutlich erhöhtes Druckniveau zur Steigerung der Effizienz sowie die Verwendung von Sauerstoff zur Senkung des Gefrierpunkts.

Für die Berechnungen in der späteren Prozessoptimierung wurde eine modifizierte Peng-Robinson-Zu-

standsgleichung eingesetzt, die zur Wiedergabe des Phasenverhaltens an thermophysikalische Reinstoffdaten und binäre Phasengleichgewichtsdaten aus der Literatur angepasst wird. Da zu einigen binären Systemen keine Literaturdaten bei tiefen Temperaturen existieren, wurden eigene Phasengleichgewichtsmessungen vorgenommen. Dazu wurde eine vorhandene Versuchsanlage zunächst modifiziert, um das Arbeiten mit den ausgewählten Kältemitteln unter Einhaltung der Prozess- und Sicherheitsanforderungen zu ermöglichen. Anschließend liefen Messungen in den binären Gemischen aus R1234yf mit R14, R23, R218, N<sub>2</sub> und Ar bei Temperaturen von 153 K bis 273 K und Drücken bis 50 bar.

Im Prozesssimulationsteil der Arbeit wurden die Gemischzusammensetzungen und die Prozessparameter definiert und in Aspen Plus auf maximale Prozesseffizienz für den jeweiligen Fall optimiert. Ausgehend von einer detaillierten Betrachtung der beiden Teilstufen des entwickelten Kühlprozesses, wurden Ergebnisse für zwei HTS-Kühlszenarien vorgestellt und bewertet. Die erzielten Wirkungsgrade sind deutlich höher als in bisherigen CMRC-Prozessen und mit denen anderer Kühlprozesse für den betrachteten Temperaturbereich vergleichbar. Dabei erweist sich der Einsatz von R1234yf als hochsiedende Gemischkomponente als vorteilhaft gegenüber dem der Alternative R218.

Zur Validierung der Prozesssimulation wurde ein CMRC-Versuchsstand aufgebaut und in Betrieb genommen. Erste Messergebnisse an drei einfachen Gemischen stimmen hervorragend mit den Prozessberechnungen in Aspen Plus überein, was für eine hohe Vorhersagequalität der Modellierung spricht. Die experimentelle Validierung des vollständigen Kühlprozesses war in dieser Arbeit nicht mehr möglich, wird aber in Folgeprojekten vorgenommen.

# Lehre und Bildung

## Vorlesungen, Seminare und Workshops

### Vorlesungen

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
**Supraleitende Systeme der Energietechnik** (Holzapfel, Noe) WS 18/19, WS 19/20  
**Supraleitende Materialien** (Holzapfel) WS 18/19, WS 19/20  
**Energy Storage and Network Integration** (Noe, Grilli) WS 18/19, WS 19/20  
**Übungen zu Energy Storage and Network Integration** (Noe, Kottonau) WS 18/19, WS 19/20  
**Projekt Management für Ingenieure** (Noe, Day) SS 19  
**Grundlagen und Technologie supraleitender Magnete** (Holzapfel) SS 19  
**Superconducting Materials for Energy Applications** (Grilli) SS 19

KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik  
**Vakuumtechnik** (Day) WS 18/19, WS 19/20  
**Übung zu Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 18/19, WS 19/20  
**Kältetechnik A** (Grohmann) WS 18/19, WS 19/20  
**Übungen zu Kältetechnik A** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 18/19, WS 19/20  
**Cryogenic Engineering** (Grohmann) WS 18/19, WS 19/20  
**Cryogenic Engineering – Exercises** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 18/19; WS 19/20  
**Projektarbeit zum Profilmfach Thermodynamik und Kältetechnik** (Grohmann) WS 19/20  
**Physical Foundations of Cryogenics** (Grohmann) SS 19  
**Physical Foundations of Cryogenics – Exercises** (Grohmann) SS 19  
**Kältetechnik B** (Grohmann) SS 19  
**Übungen zu Kältetechnik B** (Grohmann, Mitarbeiter) SS 19

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

House of Competence  
**„Wissenschaftliches Schreiben und Präsentieren ...“ mit inhaltlich-konzeptioneller Beteiligung von Dr. B. Bornschein;** SS 19

Vorlesung in China  
**Vorlesung „Cryogenics“ in China** (Neumann); 15.–26. März 2019

Kryo-Seminare  
**VDI-Seminar „Kryotechnik“** (Neumann, Schneider, Giegerich); 27.–29. März 2019  
**Haus der Technik Seminar „Kryostatbau“** (Neumann, Weiss, Lietzow); 25.–27. September 2019

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau  
**Arbeitssicherheit und Umweltschutz** (Bauer) SS 19  
**Thermodynamik 1 für Maschinenbauer** (Neumann) WS 18/19, WS 19/20  
**Thermodynamik 2 für Maschinenbauer** (Neumann) SS 19

# Lehre und Bildung

## Doktorarbeiten – Masterarbeiten – Bachelorarbeiten

### Betreute Doktorarbeiten 2019

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

#### Kai Ackermann (SUPRA)

Präparation und Charakterisierung supraleitender Joints REBCO-basierter Bandleiter  
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)\*, Prof. Dr. Matthieu Le Tacon (IFP)

#### Rodrigo Antunes (TLK)

Experimental and numerical study on advanced inorganic membranes for tritium processes and qualification for tritium recovery in the breeding blanket  
Betreuer: Dr. L. Frances, Prof. Dr. Margarida Cruz (Universität Lissabon)\*

#### Stefan Biser (SUPRA)

Entwicklung eines Tools zur analytischen Auslegung und Optimierung hybrid-elektrischer Luftfahrtantriebe  
Betreuer: Prof. Dr. V. Hagenmeyer (IAI), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Alexander Buchholz (SUPRA)

Prospective Life Cycle Analysis of high temperature superconductor tapes for future grid applications  
Betreuer: Dr. M. Weil (ITAS), Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

#### Carl Bühler (SUPRA)

Neue RRP Leiterkonzepte für verbessertes Pinning durch interne Oxidation  
Betreuer: Dr. S. Kauffmann-Weiss, Prof. M. Heilmaier (MACH)\*

#### Matthias Corduan (SUPRA)

Design, Konstruktion und Test einer rotierenden elektrischen Maschine basierend auf supraleitenden Ständerwicklungen aus Magnesiumdiborid (MgB<sub>2</sub>)  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Doppelbauer (KIT-ETIT), Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

#### Ester Diaz-Alvarez (TLK)

Tritium extraction from liquid breeding blanket based on the vacuum sieve tray technique  
Betreuer: Dr. U. Besserer, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

#### Wolfram Freitag (SUPRA)

Optimierung eines kontinuierlichen Prozesses zur Herstellung REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>-basierter supraleitender Bandleiter aus chemischen Präkursorenlösungen  
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr.-Ing. J. Sauer (IKFT)\*

#### Cristian Gleason-González (VAKUUM)

Modelling of rarefied neutral gas flow  
Betreuer: Dr. S. Varoutis, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

#### David Gomse (KRYO)

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

#### Lukas Grünewald (SUPRA)

Elektronenmikroskopische Untersuchung von eisen- und kupferbasierten Hochtemperatursupraleitern  
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr. D. Gerthsen (LEM)\*

#### Theresa Hanemann (FUSION)

Deformation Mechanisms in FCC and BCC High Entropy Alloys under various Conditions  
Betreuer: Dr. K. Weiss, Prof. Dr.-Ing. M. Heilmaier (KIT, Mach)\*

#### Yannick Hörstensmeyer (VAKUUM)

Ein Prozess-Simulator zur Auslegung, Modellierung und Optimierung des inneren Brennstoffkreislaufs eines Fusionskraftwerks  
Betreuer: Dr.-Ing. C. Day, Prof. Dr.-Ing. R. Stieglitz (INR)\*

#### Harald Itschner (SUPRA)

Entwicklung von Modellen zur speichergestützten Versorgung von Inselnetzen mit erneuerbaren Energien  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. K. Glöser (Hochschule Kaiserslautern), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

#### Shahab Karrari (SUPRA)

Integration von Energiespeichern in Elektroenergiesysteme  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe, Dr. J. Geisbüsch (KIT, ETIT)\*

#### Yannick Kathage (VAKUUM)

Entwicklung einer Metallfolienpumpe auf dem Prinzip der Superpermeation  
Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

#### Bennet Krasch (TLK)

Spektroskopische Untersuchungen zu intermolekularen Effekten in der WGTS  
Betreuer: Dr. R. Größle, Prof. Dr. G. Drexlin (KIT, Physik)\*

#### Philip Kreideweis (SUPRA)

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

#### Marco Langer (SUPRA)

Dünne Schichten pniktid-basierter Supraleiter für Detektoranwendungen  
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel (KIT, ETIT)\*

**Sven Meyer (SUPRA)**

Elektrische Transporteigenschaften epitaktischer Fe-basierter Supraleiterdünnschichten

Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr. Matthieu Le Tacon (IFP)\*

**Sebastian Mirz (TLK)**

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

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

**Cyra Neugebauer (VAKUUM)**

Validation of a process for semi-continuous separation of hydrogen isotopes

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

**Daniel Nickel (SUPRA)**

Untersuchungen zum Quench-Verhalten und zur Degradation von HTS Hochstrom-Leitern für zukünftige Fusionsmagnete

Betreuer: Dr. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

**Simon Niemes (TLK)**

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

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

**Benedikt Peters (VAKUUM)**

Entwicklung einer Metallfolienpumpe

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

**Ruslan Popov (SUPRA)**

Stromtragfähigkeit und Pinningeigenschaften RE BCO-basierter Dünnschichten und Bandleiter bei tiefen Temperaturen und in hohen Magnetfeldern

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

**Nicolo Riva (SUPRA)**

Quench behavior of high-temperature superconductor tapes for power applications: a strategy toward resilience

Betreuer: Dr. F. Grilli, Dr. B. Dutoit (EPFL, Lausanne)\*

**Eugen Shabagin (KRYO)**

Entwicklung einer 10 kA HTS-Stromzuführung mit kryogenem Gemischkältekreislauf

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

**Fabian Schreiner (SUPRA)**

Aufbau eines supraleitenden DC Windkraftgenerators und Untersuchung der Netzanbindung

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

**Jonas Schwenzer (VAKUUM)**

Ein Prozess-Simulator zur Vorhersage und Optimierung des Betriebs des Brennstoffkreislaufs eines Fusionskraftwerks

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

**Tim Teichmann (VAKUUM)**

Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für quecksilbergetriebene Vakuumpumpen in einem weiten Bereich der Knudsenzahl

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

**Christina Weber (KRYO)**

Experimentelle Untersuchung und Modellentwicklung zum Einfluss der Zweiphasenströmung auf die Funktionsweise von Sicherheitseinrichtungen von Flüssighelium-Kryostaten

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt (CIW), Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (CIW)\*

**Friedrich Wiegel (SUPRA)**

Realisierung und Untersuchung der Bitübertragungsschicht unabhängiger Meshnetzwerke für Smart Grid Anwendungen

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

**Simon Otten (SUPRA)\*\***

HTS Roebel cables with thermal and mechanical stabilizations

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. H. ten Kate (Uni Twente), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Alan Preuß (FUSION)\*\***

Development of high temperature superconductor (HTS) REBCO cables for large current applications

Betreuer: Prof. Dr. A. Morando (University of Bologna), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Roland Gyuráki (SUPRA)\*\***

Fluorescent thermal imaging method for investigating transient effects in high temperature superconductor tapes and coils

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

**Betreute Masterarbeiten in 2019**

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

**Arnaud Kraskowski**

Cryogenic High Strength Materials

Betreuer: Dr. K.-P. Weiss, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

**Lana Liebl**

Performance Investigation of a new cryogenic flow meter in the operating area of a helium refrigerator

Betreuer: Prof. Dr. S. Grohmann\*

**Daniel Nickel \*\***

Mechanische und elektromechanische Untersuchungen an HTS CroCo-Triplett-Leitervbänden

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

**Mauro Naffarate \*\***

Investigation of Power Grid Technologies for Offshore Wind farm Systems

Betreuer: F. Schreiner, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

**Szymon Palasz**

Modelling and experimental investigation of thermal stability of 2<sup>nd</sup> generation high temperature superconductors (2G HTS) for the application in DC fault current limiter (DC FCL)

Betreuer: Dipl.-Ing. A. Kudymow / Dr. F. Grilli\*

**Simone Pezzolato**

Modeling and Real-time Simulation EV charging stations with Energy Storage Systems

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe, Prof. Dr. A. Morandi (University of Bologna)\*

**Pham Hung Quoc**

Analytical modeling of electric machines with HTS stator windings for hybrid electric aircraft

Betreuer: M. Corduan (Siemens), Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Sabrina Schirle \*\***

Experimentelle Untersuchung des Vakuumzusammenbruchs in Helium-Kryostaten mit Superisolation

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

**Sonja Schneidewind**

Investigation of tritium loading of thin metal layers

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

**Jonas Schwenzer \*\***

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

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

**José Manuel Trueba Cutillas \*\***

Design considerations of an extruder for pellet injection at DEMO

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

**Betreute Bachelorarbeiten in 2018**

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

**Nico Beisig**

Herstellung und Charakterisierung eisenbasierter supraleitender Schichten mit Dotierung

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

**Leonhard Döring**

Modellierung, Simulation und Messung des Verhaltens supraleitender Permanentmagnete in Form geschichteter Bandleiter

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

**Michael Enns**

Strukturelle und elektrische Eigenschaften von Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>-Target- und Dünnschichtproben

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

**Christopher Faschina**

Untersuchung des Einflusses wiederholter Biegebelastung auf den kritischen Strom von HTS CroCo Supraleiterkabeln

Betreuer: Dr. M. Wolf, Prof. Dr. J. Aghassi Hagmann (INT)\*

**Lucian Fasselt**

H2D2 Kalibrierung des Laser Raman Systems mit Trihyde

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

**Leonhard Hasselmann**

Beladungstest von Metalloberflächen mit Tritium

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

**Edward Hermann \*\***

Entwicklung eines didaktischen Konzepts für die Station „Kernfusion“ im KIT-Schülerlabor Energie

Betreuer: Prof. Dr. C. Rockstuhl (Physik), Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Sebastian Hetzler \*\***

Evolution of mechanical properties at cryogenic temperatures of 316L processed by powder bed fusion

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

**Vadim Mai \*\***

Elektrische Transporteigenschaften von YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>-Schichten mit nanoskaligen Pinningzentren

Betreuer: K. Ackermann, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Svenja Müller \*\***

Erster Aufbau und Charakterisierung des optischen Systems des TAPiR2-Experiments zur parallelen Analyse mittels Raman- und IR-Spektroskopie-Aufbaus

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

**Sebastian Sakmann \*\***

Thermische Analyse zur Optimierung des TFA-MOD Prozesses bei der Herstellung supraleitender REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> Dünnschichten

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

**Sebastian Schorstädt \*\***

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

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

**Sebastian Vetter**

Simulationen bei BIXS

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

# Lehre und Bildung

## Fach- und Gastvorträge

- |            |   |            |   |
|------------|---|------------|---|
| 08.02.2019 | Investigation of collection grid topologies for offshore windfarm systems<br>Mauro Nafarrate<br>Fachvortrag Masterarbeit, IB SUPRA  | 19.07.2019 | Design considerations of an extruder for pellet injection at DEMO<br>José Manuel Trueba Cutillas<br>Fachvortrag Masterarbeit, IB Vakuum   |
| 28.02.2019 | Thermische Analyse zur Optimierung des TFA-MOD, Prozesses bei der Herstellung supraleitender REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>(7-δ)</sub> Dünnschichten<br>Sebastian Sakmann<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra        | 23.07.2019 | Modelling and experimental investigation of thermal stability of 2nd generation high temperature superconductors (2G HTS) for the application in DC fault current limiter (DC FCL)<br>Szymon Palasz<br>Fachvortrag Masterarbeit, IB Supra |
| 16.04.2019 | In-situ-Ausscheidung von Nanopartikeln in RE[Ba] <sub>2</sub> [Cu] <sub>3</sub> O <sub>(7-δ)</sub> Dünnschichten zur Verbesserung der kritischen Stromdichte<br>Sebastian Masato Schorstädt<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra | 06.08.2019 | Elektrische Transporteigenschaften von YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> -Schichten mit nanoskaligen Pinningzentren<br>Vladim Mai<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra   |
| 15.05.2019 | Entwicklung eines Didaktischen Konzepts für die Station „Kernfusion“ im KIT-Schülerlabor Energie<br>Edward Hermann<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra  | 28.08.2019 | Discovery of new superconductors under high pressure using materials informatics<br>Yoshihiko Takano<br>Gastvortrag, IB Supra   |
| 18.06.2019 | Basic Characterization of a Mercury Based Mass Transfer Process for Lithium Isotope Separation<br>Jonas Schwenzler<br>Fachvortrag Masterarbeit, IB Vakuum   | 17.10.2019 | Progress and status of 2G HTS wire development in China<br>Yue Zhao<br>Fachvortrag, Kolloquium, IB Fusion   |
| 28.06.2019 | Mechanische und elektromechanische Untersuchungen an HTS CroCo-Triplett-Leitervbänden<br>Daniel Nickel<br>Fachvortrag Masterarbeit, IB Fusion   | 22.10.2019 | Untersuchung des Einflusses wiederholter Biegebelastung auf den kritischen Strom von Hochtemperatur-Supraleiter-Stromkabeln<br>Christopher Faschina<br>Fachvortrag, Bachelorarbeit, IB Fusion   |

# Zahlen und Daten

## Organigramm

Supraleiter- und Kryomaterialien	Energetische Anwendungen	Supraleitende Magnettechnologie	Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs
Supraleitende Materialien	Supraleitende Netzkomponenten	Spulentechnologie	Vakuumtechnologie und Prozessintegration
Kryo-Strukturmaterialien	Neue Anwendungen der Supraleitung	HTS-Fusionsmagnete und Stromzuführungen	Tritiumextraktion und -rückgewinnung
Kryogene Stoffeigenschaften	Modellierung von Supraleitern und Komponenten	Rotierende Maschinen	Strömung verdünnter Gase
Leitertechnologien	Echtzeit Systemintegration	Industrieanwendungen	Vakuumhydraulik

## Personalstand (31.12.2019)

<b>Gesamt</b>	<b>158</b>	<b>zusätzlich, während 2019:</b>	
Akademiker	48	Gäste	8
Ingenieure und Techniker	45	Praktikanten	10
Sonstige	16	Studentische Hilfskräfte	29
Doktoranden	28	Studien-, Bachelorarbeiten	13
Master/Diplom	11		
DH-Studenten	7		
Auszubildende	3		
Trainees	0		

# Zahlen und Daten

## Personalveränderungen

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

**Tabea Arndt**

**Denis Bobrov**

**Lennard Busch**

**Giovanni de Carne**

**Yannick Kathage**

**Stefan Kern**

**Daniel Nickel**

**Jonas Schwenzer**

**Christos Tantos**

**Tim Teichmann**

**Alejandro Vazquez-Cortes**

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

**Carina Galante**

**Wilfried Goldacker**

**David Gomse**

**Reinhard Heller**

**Marco Langer**

**Mayraluna Lao**

**Simon Otten**

**Benedikt Peters**

**Nico Pitzschel**

**Alan Preuß**

**Vincent Przikling**

**Rajini-Kumar Ramalingam**

**Nicolo Riva**

**Alexander Reiner**

**Jan Sas**

**Matthieu Scannapiego**

**Severin Strauß**

**Elisabeth Urbach**

# Zahlen und Daten

## Studentische Hilfskräfte

Aker Max

Barbosa Estefane

Barthlott Dominic

Beisig Nico

Blaschtschak Julian

Bobien Johanna

Böhmländer Alexander

Diel Felix

Enns Manuel

Faschina Christopher

Fasselt Lucian

Frank Marius

Hermann Edward

Hetzler Sebastian

Jansen Rica

Kathage Yannick

Klenk Rafael

Mai Vadim

Masuch Paul

Müller Nikolas

Poornasrkhakbaz Soheil

Pham Quoc

Raczka Kevin

Reinking Johannes

Ribic Niklas

Saad Daniel

Schulz Pia

Tertulliani Nicola

Wolter Michael

# Zahlen und Daten

## Gastwissenschaftler

**Dr. J. Ogawa**

28.08.18–03.04.19

Niigata University, Japan

**S. Kunze**

10.09.18–28.02.19

Universität Bremen, BRD

**Y. Zhang**

22.01.19–21.04.19

School of Electrical and Electronic  
Engineering, HUST, Wuhan, China**Dr. O. Roberto**

10.03.19–10.04.19

New University of Lisbon,  
Caparica, Portugal**Dr. A. Busnyuk**

01.09.19–31.10.19

Bonch-Bruевич Saint Petersburg  
State University of Telecommuni-  
cations, Russia**P. Zhou**

09.09.19–09.12.19

Applied Superconductivity Labo-  
ratory, Chengdu, China**Ch. Li**

14.10.19–31.10.19

University of Cambridge, U.K.

**Q. Meng**

05.11.19–31.10.20

Hefei Institute of Physical Science,  
Hefei, China

# Zahlen und Daten

## Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

### Tabea Arndt

- Mitglied/Gast des Normungsgremiums K184 der DKE (Deutsche Kommission für Elektrotechnik)

### Wescley Batista de Sousa

- Mitglied der "HTS Modelling Workgroup"

### Kai Bauer

- Mitglied im Helmholtz-Arbeitskreis HSE "Health, Safety and Environment"
- Mitglied der Prüfungsausschüsse der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Standort Karlsruhe in den Fachbereichen „Maschinenbau“ und „Wirtschaftsingenieurwesen“

### Christian Day

- Mitglied des Vorstandsrates der Dt. Vakuumgesellschaft (DVG).
- Stellv. Vorsitzender des Fachverbandes Vakuumphysik und -technik der Dt. Physikalischen Gesellschaft (DPG)
- Projektleitung des Bereichs Tritium-Materiezufuhr-Vakuum (TFV) im Europäischen Fusionsprogramm EUROFUSION
- Mitglied im Fusion For Energy – Technical Advisory Panel
- Sprecher Topic 'Vakuum und Tritium' der deutschen DEMO-Initiative
- Mitglied im International Advisory Committee der RGD (Rarefied Gas Dynamics Conference)
- Mitglied des Programmkomitees der ISFNT (international Symposium of Fusion Nuclear Technology).
- Chartered Engineer der American Vacuum Society (AVS)
- Mitglied im Steering Committee JT-60S

### Giovanni de Carne

- Mitglied beim "Institute of Electrical and Electronics Engineers"
- Mitglied beim Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

### Walter H. Fietz

- Mitglied des Technical Advisory Panels (TAP) of F4E
- Mitglied des "International Organizing Committee of Symposium of Fusion Technology (SOFT) conference"
- Program Committee Member of HTS4Fusion Conductor Workshop
- Leiter der "Task Force Magnets" im KIT Programm Fusion
- IEEE Senior Member
- Mitglied des "IEEE Council of Superconductivity"
- Mitglied des KIT Senats

### Jörn Geisbüsch

- Mitglied und Experte des EERA "Integrated Energy System – A Pathway for Europe" Programms
- Mitglied im Editor-Board der "Applied Superconductivity Conference"
- KIT Mitgliedschaft, Repräsentant und Teilnehmer der "DERlab General Assembly" und des DERlab Workshops
- Mitglied des „User Selection Panels“ des ERIGrid Projektes
- Mitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
- „Chapter Chair“ und Mitglied der Arbeitsgruppe P2004 des „Institute of Electrical and Electronics Engineers“
- Mitglied des "ENERGY 2019 Technical Program Committee" der "International Academy, Research, and Industry Association"
- Externes Mitglied des Organisations-Panels des Workshops "Applications and Challenges in Power-to-X Systems" in Lappeenranta, Finnland

### Thomas Giegerich

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

### Jens Hänisch

- Superconductor Science and Technology, Advisory board member
- European Magnetic Field Laboratory EMFL, User Proposal Selection Committee member
- Applied Superconductivity Conference, Materials program committee member
- Materials Research Meeting MRM 2020, Japan, Symposium co-organizer
- Condensed Matter Division meeting CMD2020GEFES 2020, Spain, Symposium co-organizer
- KIT-Konvent

### Reinhard Heller

- Computation of Thermo-Hydraulic Transients in Superconductors (CHATS-AS), Board member
- DKE/DIN K 184 – Supraleiter
- International Electrotechnical Commission (IEC TC90) – Superconductivity – Member WG 12 – "Superconducting Power Devices – General Requirements for Characteristic Tests of Current Leads designed for Powering Superconducting Devices"

### Bernhard Holzapfel

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

### Shahab Karrari

- Mitglied beim „Institute of Electrical and Electronics Engineers“
- Mitglied der „Power & Energy Society“ des „Institute of Electrical and Electronics Engineers“

### Holger Neumann

- Member of the ICE Committee
- Board member of the Cryogenic Engineering Conference CEC seit 2019 (gewählt auf der Tagung in Hartford)
- Vorsitzender des DKV
- Gastprofessur in China an der Zhejiang University in Hangzhou (China)

### Mathias Noe

- Kurator des Forschungsnetzwerkes Hochtemperatur-Supraleitung des BMWi
- Internationaler Experte der CIGRE D1.69 Arbeitsgruppe „Assessing emerging test guidelines for HTS applications in power systems“
- Internationaler Experte der CIGRE Arbeitsgruppe D1.64 „Cryogenic dielectric insulation“
- Sprecher des Helmholtz Programmes Speicher und vernetzte Infrastrukturen
- Mitglied des Managementboards des Forschungsbereiches Energie der Helmholtz Gemeinschaft
- Mitglied des Boards der European Society for Applied Superconductivity (ESAS)
- Deutscher Abgesandter der International Energy Agency, Technology Cooperation Programm Hochtemperatur-Supraleitung
- Mitglied des International Organizing and Scientific Program Committee of the International Conference on Magnet Technology
- Mitglied des Boards der Applied Superconductivity Conference
- Mitglied des Interessenverbandes Supraleitung (ivsupra)

### Sonja Schlachter

- Mitglied des „International Cryogenic Material Conference (ICMC) Board of Directors“

### Stylios Varoutis

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

### Klaus-Peter Weiss

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

# Veröffentlichungen

## Fusion

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

### Proceedingsbeitrag

\* Luo, X.; Day, Chr.

Monte Carlo simulation of a dynamic sieve system, 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Glasgow, UK, July 23–27, 2018, 978-0-7354-1874-5, 0094-243X

Luo, Xueli, Day, Christian

Monte Carlo simulation of a dynamic sieve system, Proceedings 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings 2132, 090004 (2019)

C. Sozzi, L. Figini, D. Farina, D. Micheletti, A. Moro, P. Platania, D. Ricci, T. Kobayashi, K. Takahashi, A. Isayama, M. Wanner, M. Scannapiego, C. Day, An analysis of the ECRF stray radiation in JT-60SA, European Physics Conference, Milano, Italien, 8–12 Jul 2019, online veröffentlicht <http://ocs.ciemat.es/EPS2019PAP/pdf/P4.1089.pdf>

### Vortrag

Aker, Max; Röllig, Marco

Material studies to reduce the tritium memory effect in BIXS analytic systems

Day, Christian

The metal foil pump – How cold plasma helps to meet hot plasma

Giegerich, Thomas; Butler, Barry; Day, Christian; Hanke, Stefan; Härtl, Thomas; Hörstensmeyer, Yannick; Neugebauer, Cyra; Ploeckl, Bernhard

Innovative fuel cycle concepts for the EU-DEMO

Giegerich, T.; Battes, K.; Day, C.

Lithium enrichment needs for fusion and fission applications

Giegerich, T.; Day, C.; Gliss, C.; Hanke, S.; Härtl, T.; Hörstensmeyer, Y.; Ionescu-Bujor, M.; Müller, R.; Peters, B.; Scannapiego, M.; Strobel, H.

Design status of the torus vacuum pumping system for tritium processing in the EU-DEMO

Varoutis, Stylianos; Igitkhanov, Yuri; Day, Christian; Innocente, Paolo; Subba, Fabbio; Ambrosino, Roberto; Reimerdes, Holger

Assessment of the pumping efficiency in DEMO alternative divertor configurations

Cismondi, F.; Boccaccini, L. V.; Chiovaro, P.; Ciattaglia, S.; Day, C.; Del Nevo, A.; Di Maio, P. A.; Federici, G.; Hernandez, F.; Moreno, C.; Moscato, I.; Rapisarda, D.; Santucci, A.; Spagnuolo, G. A.; Utili, M.

Progress of the conceptual design of the European DEMO Breeding Blanket, Tritium Extraction and Coolant Purification Systems

Aker, Max; Röllig, Marco

Material studies to reduce the tritium memory effect in BIXS analytic systems, 12th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2019), Busan, Südkorea, 22–26 Apr 2019.

U. Fischer, L.V. Boccaccini, F. Cismondi, M. Coleman, C. Day, Y. Hörstensmeyer, F. Moro, P. Pereslavtsev Required, achievable and target TBR for the European DEMO, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22–27 Sept 2019

K. Battes, Th. Giegerich, Christian Day

Lithium enrichment needs for fusion and fission applications, 1st Tritium School (2019), Ljubljana, Slowenien, 25 – 28 Mar 2019

B. Butler, R. Lawless, T. Jackson, R. George, J. Lopes, S. Davies, A. Santucci, C. Day, T. Giegerich, B. Ploeckl, R. Shaw, Y. Hörstensmeyer, C. Neugebauer

Latest Design Developments for the Fuel Cycle and Tritium Plant for the European DEMO Fusion Reactor, 12th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2019), Busan, Südkorea, 22–26 April 2019

Xueli Luo, Benedikt Peters, Christian Day

Monte Carlo study of a metal foil pump with normal and energetic deuterium gas molecules, Int. Vacuum Congress (IVC), Malmö, Schweden, 1–5 Jul 2019

Th. Giegerich, Chr. Dahlke, Chr. Day, S. Ochoa

Test and modelling of a mercury ring pump train for nuclear fusion applications, 4th Int. Rotating Equipment Conference, Wiesbaden, 24–25 Sept 2019

Cismondi, F.; Boccaccini, L.V.; Chiovaro, P.; Ciattaglia, S.; Day, C.; Del Nevo, A.; Di Maio, P.A.; Federici, G.; Hernandez, F.; Moreno, C.; Moscato, I.; Rapisarda, D.; Santucci, A.; Spagnuolo, G. A.; Utili, M.

Progress of the conceptual design of the European DEMO Breeding Blanket, Tritium Extraction and Coolant Purification Systems, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22–27 Sept 2019.

A. Santucci, M. Incelli, L. Noschese, C. Moreno, F. Di Fonzo, M. Utili, S. Tosti, C. Day  
The issue of tritium in DEMO coolant and mitigation strategies, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

G. Federici, Chr. Day et al.  
DEMO Programme in Europe Beyond 2020, 28th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE), Jacksonville, FL, USA, 2-6 June 2019

P.T. Lang, F. Cismondi, Ch. Day, E. Fable, A. Frattolillo, C. Gliss, F. Janky, B. Pégourié, B. Ploeckl  
Optimizing the EU-DEMO pellet fuelling scheme, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

Silvano Tosti, Christian Day, Ion Cristescu, Marco Utili, Alessia Santucci, Carlos Moreno, David Rapisarda  
Tritium control and handling: Selected major design issues, European Fusion Programme Workshop, Marseille, Frankreich, 3-5 Dez. 2019

G. Giruzzi, Chr. Day et al.  
Advances in the physics studies for the JT-60SA tokamak exploitation and research plan European, Physics Conference, Milano, Italien, 8-12 Jul 2019

### Zeitschriftenaufsatz

\* Federici, G.; Bachmann, C.; Barucca, L.; Baylard, C.; Biel, W.; Boccaccini, Lorenzo V.; Bustreo, C.; Ciattaglia, S.; Cismondi, F.; Corato, V.; Day, Christian; Diegele, E.; Franke, T.; Gaio, E.; Gliss, C.; Haertl, T.; Ibarra, A.; Holden, J.; Keech, G.; Kembleton, R.; Loving, A.; Maviglia, F.; Morris, J.; Meszaros, B.; Moscato, I.; Pintsuk, G.; Siccinio, M.; Taylor, N.; Tran, M. Q.; Vorpahl, C.; Walden, H.; You, J. H.

Overview of the DEMO staged design approach in Europe Nuclear fusion, 0029-5515, 1741-4326

Federici, G.; Bachmann, C.; Barucca, L.; Baylard, C.; Biel, W.; Boccaccini, Lorenzo V.; Bustreo, C.; Ciattaglia, S.; Cismondi, F.; Corato, V.; Day, Christian; Diegele, E.; Franke, T.; Gaio, E.; Gliss, C.; Haertl, T.; Ibarra, A.; Holden, J.; Keech, G.; Kembleton, R.; Loving, A.; Maviglia, F.; Morris, J.; Meszaros, B.; Moscato, I.; Pintsuk, G.; Siccinio, M.; Taylor, N.; Tran, M. Q.; Vorpahl, C.; Walden, H.; You, J. H.  
Overview of the DEMO staged design approach in Europe, Nuclear Fusion 59, 066013 (2019)

Christian Day, Barry Butler, Thomas Giegerich, Bernhard Ploeckl, Stylianos Varoutis

A smart three-loop fuel cycle architecture for DEMO, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 2462-2468

A. Frattolillo, L.R. Baylor, F. Bombarda, F. Cismondi, A. Colangeli, S.K. Combs, Chr. Day, G. D'Elia, T.E. Gebhart, F. Iannone, P.T. Lang, S.J. Meitner, S. Migliori, F. Moro, R. Mozzillo, B. Pégourié, B. Ploeckl, S. Podda, F. Poggia  
Addressing the feasibility of inboard direct-line injection of high-speed pellets for core fueling of DEMO, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 2426-2429

Thomas Giegerich, Christian Day, Curt Gliss, Xueli Luo, Holger Strobel, Andrew Wilde

Preliminary configuration of the torus vacuum pumping system installed in the DEMO lower port, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 2180-2183

F. Siviero, L. Caruso, T. Porcelli, M. Mura, E. Maccallini, P. Manini, E. Sartori, M. Siragusa, C. Day, P. Sonato  
Characterization of ZAO® sintered getter material for use in fusion applications, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 1729-1732

S. Varoutis, Yu. Igitkhanov, Chr. Day  
Effect of neutral screening on pumping efficiency in the DEMO divertor, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 1741-1746

M. Siragusa, P. Sonato, M. Visentin, M. Mura, F. Siviero, L. Viale, E. Maccallini, C. Day, S. Hanke, E. Sartori  
Conceptual design of scalable vacuum pump to validate sintered getter technology for future NBI application, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 87-90

Gliss Curt, Ambrosino Roberto, Bachmann Christian, Ciattaglia Sergio, Flammini Davide, Giegerich Thomas, Jimenez Samuel, Wilde Andrew  
Initial integration concept of the DEMO lower horizontal port, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 2667-2670

A. Murari, N. Bekris, J. Figueiredo, H.-T. Kim, C. Perez Von Thun, I. Balboa, P. Batistoni, T. Giegerich, T. Huddleston, M. Rubel, R. Vila, R. Villari, A. Widdowson  
Implementation and exploitation of JET enhancements at different fuel mixtures in preparation for DT operation and next step device, Fusion Engineering and Design 146 (2019) 741-744

T. Giegerich, K. Battes, J.C. Schwenzer, C. Day  
Development of a viable route for lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants, Fusion Engineering and Design 146, 111339 (2019).

M. Coleman, Y. Hörstensmeyer, F. Cismondi  
DEMO tritium fuel cycle: performance, parameter explorations, and design space constraints, Fusion Engineering and Design 141, (2019) 79-90.

S. Varoutis, Yu. Igitkhanov, Chr. Day  
Assessment of the 3D geometrical effects on the DEMO divertor pumping efficiency, Nuclear Materials and Energy 19 (2019) 120-123.

V. Toigo, S. Hanke et al.  
Progress in the ITER neutral beam test facility, Nuclear Fusion 59, 086058 (2019)

### Poster

Stylianos Varoutis, Yuri Igitkhanov, Christian Day, Paolo Innocente, Fabio Subba, Roberto Ambrosino, Holger Reimerdes, Fulvio Militello

Assessment of the pumping efficiency in demo alternative divertor configurations, 28th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE), Jacksonville, FL, USA, 2-6 June 2019.

Yuri Igitkhanov, Stylianos Varoutis, Christian Day, Volker Hauer

Assessment of the pumping efficiency in DEMO conventional and alternative divertor configurations, Third technical IAEA Meeting on divertor concepts, Vienna, Austria, 4-7 Nov 2019.

Yuri Igitkhanov, Boris Bazylev, Sergey Pestchany

The Runaway Electron Evolution in the DEMO Reactor Plasmas, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

Vasilii Alimov, Andrei Busniuk, Christian Day, Stefan Hanke, Evgenii Peredistov, Alexander Livshits

D/T separation from He with superpermeable membranes: FCC V-alloys as new membrane materials, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

Stefan Hanke, Christian Day, Thomas Giegerich, Juri Igitkhanov, Yannick Kathage, Xueli Luo, Stylianos Varoutis, Alejandro Vazquez Cortes, Thomas Härtl, Andrei Busniuk, Alexander Livshits, Stefan Merli, Andreas Schulz, Matthias Walker, Klaus Baumgärtner, Jens Hofmann  
Progress of the R&D programme to develop a Metal Foil Pump for DEMO, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

Katharina Battes, Thomas Giegerich, Christian Day  
HgLab Karlsruhe – An Infrastructure Facility to support the Development of DEMO Vacuum Pumps with Mercury as Working Fluid, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

Cyra Neugebauer, Y. Hörstensmeyer, Christian Day  
Technology Development for Isotope Rebalancing and Protium Removal in the EU DEMO, 12th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2019), Busan, Südkorea, 22-26 Apr 2019

Y. Hörstensmeyer, Silvano Tosti, Alessia Santucci, G. Bruno

Permeator Simulations for the EU-DEMO Fuel Cycle, 12th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2019), Busan, Südkorea, 22-26 Apr 2019

Oriol Nomen, Daniel Sanchez-Herranz, Concepción Oliver, Ivan Podadera, Rodrigo Varela, Francisco Ogando, Volker Hauer, Fernando Arranz, Sofía Coloma, Roland Heidinger and Hervé Dzitko

Preliminary design of the HEBT of IFMIF DONES, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22-27 Sept 2019.

S. Ochoa, T. Giegerich, Chr. Day

Mercury Ring Pump Modelling: Concept, Progress and Challenges, 17th Multiphase Flow Conference 2019, Dresden, 11-15 Nov 2019.

## Veröffentlichungen

### Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen (EMR)

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

#### Zeitschriftenaufsatz

\* Chen, H.; Kauffmann, A.; Seils, S.; Boll, T.; Liebscher, C.H.; Harding, I.; Kumar, K.S.; Szabó, D.V.; Schlabach, S.; Kauffmann-Weiss, S.; Müller, F.; Gorr, B.; Christ, H.-J.; Heilmaier, M.

Crystallographic ordering in a series of Al-containing refractory high entropy alloys Ta-Nb-Mo-Cr-Ti-Al, Acta materialia, 1359-6454

## Veröffentlichungen

### Speicher und vernetzte Infrastrukturen (SCI)

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

#### Proceedingsbeitrag

\* Karrari, Shahab; Ludwig, Nicole; Hagenmeyer, Veit; Noe, Mathias

A method for sizing centralised energy storage systems using standard patterns; 2019 IEEE Milan PowerTech, 23-27 June 2019, Milan, Italy; 978-1-5386-4722-6

Geisbuesch, Joern

DERlab (European Distributed Energy Resources Laboratories) activities

Geisbuesch, Joern

Status of Energy Lab 2.0 and projects from the power grid side

Geisbuesch, Joern; Etinge, Ewane

IEEE WG P2004 First Consolidated Draft and Progress of Chapter 4

Geisbuesch, Joern; Etinge, Ewane

IEEE WG P2004 Status of Chapter 4

Geisbuesch, Joern; Karrari, Shahab; Kottonau, Dustin; Batista de Sousa, Wescley Tiago; Kreideweis, Philip; Lange, Christian; Groener, Frank; Noe, Mathias  
Real-Time Simulation and System Integration

Weber, Christina; Henriques, Andre; Schirle, Sabrina; Grohmann, Steffen

Measurement of heat flux in multi-layer insulated helium cryostats after loss of insulating vacuum

## Buchaufsatz

Hänisch, Jens; Iida, Kazumasa  
Grain Boundaries in Fe-Based Superconductors  
Superconductivity – From Materials Science to Practical  
Applications. Ed.: P. Mele; 978-3-030-23302-0

Kottonau, Dustin; Shabagin, Eugen; Batista de Sousa, Wes-  
sley Tiago; Geisbüsch, Jörn; Noe, Mathias; Stagge, Hanno;  
Fechner, Simon; Woiton, Hannes; Küsters, Thomas  
Bewertung des Einsatzes supraleitender 380-kV-Kabel  
1000093864

## Zeitschriftenaufsatz

\* Cayado, Pablo; Rijckaert, Hannes; Erbe, Manuela; Lan-  
ger, Marco; Jung, Alexandra; Hänisch, Jens; Holzapfel,  
Bernhard  
CSD-Grown  $Y_{1-x}Gd_xBa_2Cu_3O_{7-6}$ -BaHfO<sub>3</sub> Nanocomposite  
Films on Ni5W and IBAD Technical Substrates; Nanoma-  
terials; 2079-4991

\* Rijckaert, Hannes; Cayado, Pablo; Nast, Rainer; Diez  
Sierra, Javier; Erbe, Manuela; López Dominguez, Pedro;  
Hänisch, Jens; De Buysser, Klaartje; Holzapfel, Bernhard;  
Van Driessche, Isabel  
Superconducting  $HfO_2$ - $YBa_2Cu_3O_{7-6}$  Nanocomposite  
Films Deposited Using Ink-Jet Printing of Colloidal Solu-  
tions; Coatings; 2079-6412

\* Bagrets, N.; Anvar, V. A.; Chiesa, L.; Delgado, M. A.;  
McRae, D. M.; Nijhuis, A.; Nishijima, G.; Osamura, K.;  
Shin, H. S.; Walsh, R. P.; Weiss, K.-P.; Zhang, Y.; Zhao, Y.;  
Zhao, Z.  
International round robin test for tensile testing HTS  
wires at cryogenic temperatures; Superconductor sci-  
ence and technology; 0953-2048, 1361-6668

Berrospe-Juarez, E.; Zermeño, V. M. R.; Trillaud, F.; Grilli,  
Francesco  
Real-time simulation of large-scale HTS systems: Multi-  
scale and homogeneous models using the T-A formula-  
tion; Superconductor science and technology; 0953-  
2048, 1361-6668 Ja

\* De Sousa, Wesley T. B.; Kottonau, Dustin; Noe, Ma-  
thias  
Transient Simulation and Recovery Time of a Three-  
Phase Concentric HTS Cable; IEEE transactions on ap-  
plied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515

\* De Sousa, Wesley T. B.; Matt, C. F. T.  
An unconditionally stable laguerre based finite diffe-  
rence method for transient diffusion and convection-  
diffusion problems; Numerical mathematics; 1004-8979,  
2079-7338

\* Dong, Qihuan; de Sousa, Wesley T. B.; Geng, Jianzhao  
Zhang, Xiuchang; Zhang, Heng; Shen, Boyang; Coombs,  
Tim  
Influences of the Resistive SFCL on the Incremental  
Power Frequency Relay of Transmission Lines; IEEE tran-  
sactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-  
2515, 2378-7074

\* Gao, P.; Dhallé, M.; van Nugteren, B.; Norder, H.;  
Kario, A.; Otten, S.; Goldacker, W.; van Nugteren, J.;  
Kirby, G.; de Rijk, G.; Bottura, L.; Rossi, L.; ten Kate,  
H.H.J.  
Inter-strand resistance and AC loss in resin-filler impreg-  
nated ReBCO Roebel cables; Superconductor science  
and technology; 0953-2048, 1361-6668

\* Gao, P.; Wessel, W. A. J.; Dhallé, M.; Otten, Simon;  
Kario, Anna U.; Van Nugteren, J.; Kirby, G.; Bottura, L.;  
Ten Kate, H. H. J.  
Effect of resin impregnation on the transverse pressure  
dependence of the critical current in ReBCO Roebel  
cables; Superconductor science and technology; 0953-  
2048, 1361-6668

\* Gomse, D.; Grohmann, S.  
Heat transfer and pressure drop in the main heat ex-  
changer of a cryogenic mixed refrigerant cycle; IOP con-  
ference series / Materials science and engineering; 1757-  
899X

\* Grohmann, S.; Barthélémy, H.; Down, R.; Ercolani, E.;  
Fournel, J.-L.; Henriques, A.; Krichler, M.; Otte, W.;  
Parma, V.; Pengo, R.; Poncet, J.-M.; Reinhardt, M.; Soika,  
R.; Vallcorba-Carbonell, R.; Weber, C.; Zick, G.; Zoller, C.  
Status of a European Standard for the protection of he-  
lium cryostats against excessive pressure; IOP confe-  
rence series / Materials science and engineering; 1757-  
899X

\* Gyuráki, R.; Benkel, T.; Schreiner, F.; Sirois, F.; Grilli, F  
Fluorescent thermal imaging of a non-insulated pan-  
cake coil wound from high temperature superconductor  
tape; Superconductor science and technology; 0953-  
2048, 1361-6668

\* Hänisch, J.; Iida, K.; Hühne, R.; Tarantini, C.  
Fe-based superconducting thin films – preparation and  
tuning of superconducting properties; Superconductor  
science and technology; 0953-2048, 1361-6668

\* Hellmann, S.; Abplanalp, M.; Elschner, S.; Kudymow,  
A.; Noe, M.  
Current Limitation Experiments on a 1 MVA-Class Super-  
conducting Current Limiting Transformer IEEE transac-  
tions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-  
2515

\* Iida, Kazumasa; Sugimoto, Yuwa; Hatano, Takafumi;  
Urata, Takahiro; Langer, Marco; Holzapfel, Bernhard;  
Hänisch, Jens; Ikuta, Hiroshi  
Novel method to study strain effect of thin films using  
a piezoelectric-based device and a flexible metallic sub-  
strate Applied physics express; 1882-0778, 1882-0786

\* Kauffmann-Weiss, Sandra; Iida, Kazumasa; Tarantini,  
Chiara; Boll, Torben; Schneider, Reinhard; Ohmura,  
Taito; Matsumoto, Takuya; Hatano, Takafumi; Langer,  
Marco; Meyer, Sven; Jaroszynski, Jan; Gerthsen, Dag-  
mar; Ikuta, Hiroshi; Holzapfel, Bernhard; Hänisch, Jens  
Microscopic origin of highly enhanced current carrying  
capabilities of thin NdFeAs(O,F) films; Nanoscale Advan-  
ces; 2516-0230

- \* Kottonau, Dustin; de Sousa, Wesley T. B.; Bock, Joachim; Noe, Mathias  
Design Comparisons of Concentric Three-Phase HTS Cables; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074
- \* Kubiczek, Krzysztof; Grilli, Francesco; Kario, Anna; Godfrin, Aurelien; Zermeno, Victor Manuel Rodriguez; Stepien, Mariusz; Kampik, Marian  
Length Uniformity of the Angular Dependences of  $l_c$  and  $n$  of Commercial REBCO Tapes with Artificial Pinning at 77 K; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074
- \* Kudymow, Andrej; Bauer, A.; Elschner, Steffen; Goldacker, Wilfried; Kraemer, H.-P.; Noe, Mathias; Strauss, Severin; Schacherer, C.  
Smartcoil - Design, assembly and test of a 10 MVA superconducting air coil fault current limiter; Superconductor science and technology; 0953-2048, 1361-6668
- Kunniyoor, Keerthi Raj; Richter, Thomas; Ghosh, Parthasarathi; Lietzow, Ralph; Schlachter, Sonja; Neumann, Holger  
Performance analysis of a NbTi level sensor while filling LHe into a cryostat; Indian Journal of Cryogenics; 0379-0479, 2349-2120
- \* Langer, Marco; Meyer, Sven; Ackermann, Kai; Grünewald, Lukas; Kauffmann-Weiss, Sandra; Aswartham, Sai-charan; Wurmehl, Sabine; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard  
On the growth of Co-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  thin films on  $\text{CaF}_2$ ; Journal of physics / Conference Series; 1742-6588, 1742-6596
- \* Lao, Mayraluna; Pahlke, P.; Sieger, M.; Falter, M.; Bäcker, M.; Hänisch, Jens; Hühne, R.; Eisterer, M.  
Manifestation of granularity in the transport current of coated conductors; Superconductor science and technology; 0953-2048, 1361-6668
- \* Lao, M.; Hänisch, J.; Kauffmann-Weiss, S.; Gehring, R.; Fillingner, H.; Drechsler, A.; Holzapfel, B.  
High current variable temperature electrical characterization system for superconducting wires and tapes with continuous sample rotation in a split coil magnet; Review of scientific instruments; 0034-6748, 1089-7623, 1527-2400
- \* Lao, M.; Willa, R.; Meledin, A.; Rijckaert, H.; Chepikov, V.; Lee, S.; Petrykin, V.; Van Driessche, I.; Molodyk, A.; Holzapfel, B.; Hänisch, J.  
In-field performance and flux pinning mechanism of pulsed laser deposition grown  $\text{BaSnO}_3/\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  nanocomposite coated conductors by SuperOx; Superconductor science and technology; 0953-2048, 1361-6668
- \* Otten, S.; Grilli, F.  
Simple and fast method for computing induced currents in superconductors using freely available solvers for ordinary differential equations; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515
- \* Ou, J.; Liu, Y.; Liang, D.; Doppelbauer, M.  
Investigation of PM eddy current losses in surface-mounted PM motors caused by PWM; IEEE transactions on power electronics; 0885-8993, 1941-0107
- \* Pardo, E.; Grilli, Francesco; Liu, Yingzhen; Wolftadler, S.; Reis, T.  
AC Loss Modeling in Superconducting Coils and Motors with Parallel Tapes as Conductor; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515
- \* Popov, Ruslan; Erbe, Manuela; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard  
Superconducting  $\text{BaHfO}_3\text{-GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  Nanocomposite Thin Films: Influence of Growth Temperature and Deposition Rate on Transport Properties; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515
- \* Preuss, Alan; Wolf, Michael Johannes; Heiduk, Mathias; Lange, Christian; Fietz, Walter H.  
Production and Characterization of Strands for a 35 kA HTS DC Cable Demonstrator; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074
- \* Riva, N.; Richard, S.; Sirois, F.; Lacroix, C.; Dutoit, B.; Grilli, Francesco  
Overcritical Current Resistivity of YBCO-Coated Conductors Through Combination of PCM and Finite-Element Analysis; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515
- \* Shabagin, Eugen; Grohmann, Steffen  
Development of 10 kA Current Leads Cooled by a Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycle; IOP conference series / Materials science and engineering; 1757-899X
- \* Simmendinger, J.; Hänisch, J.; Bihler, M.; Ionescu, A. M.; Weigand, M.; Sieger, M.; Hühne, R.; Rijckaert, H.; van Driessche, I.; Schütz, G.; Albrecht, J.  
Magnetically induced anisotropy of flux penetration into strong-pinning superconductor/ferromagnet bilayers; New journal of physics; 1367-2630
- \* Tamson, J.; Stamm, M.; Grohmann, S.  
Set-up of the cryogenic phase equilibria test stand CryOPHAEQTS; IOP conference series / Materials science and engineering; 1757-899X
- \* Tixador, Pascal; Bauer, Markus; Bruzek, Christian-Eric; Calleja, Albert; Deutscher, Guy; Dutoit, Bertrand; Gomory, Fedor; Martini, Luciano; Noe, Mathias; Obradors, Xavier; Pekarcikova, Marcela; Sirois, Frederic  
Status of the European Union Project FASTGRID; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074
- \* Weber, C.; Henriques, A.; Grohmann, S.  
Study on the heat transfer of helium cryostats following loss of insulating vacuum; IOP conference series / Materials science and engineering; 1757-899X

### Proceedingsbeitrag

Meyer, Sven; Langer, Marco; Grünewald, Lukas; Hänisch, Jens; Gerthsen, Dagmar; Holzapfel, Bernhard  
Pulsed Laser Deposition of quasi-multilayer superconducting  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2\text{-BaHfO}_3$  nanocomposite films; 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2019)

## Vortrag

- Arndt, Tabea  
Cooling Methods for HTS Applications – Challenges and Approaches
- Arndt, Tabea  
HTS for Accelerators – Connections to Industry and Applications
- Arndt, Tabea  
HTS Systems and Value Propositions
- Benkel, Tara; Lao, Mayraluna; Liu, Yingzhen; Pardo, Enric; Wolfstädter, Simon; Reis, Thomas; Grilli, Francesco  
AC loss calculation in electrical machines with HTS coils using T-A formulation
- Boll, Martin; Corduan, Matthias; Biser, Stefan; Weber, Phillip; Kuehn, Lars; Filipenko, Mykhaylo; Schlachter, Sonja; Holzapfel, Bernhard; Berg, Frederick Timothy Neil; Rostek, Peter  
Holistic system approach for electric aircraft using superconducting components
- Cayado, Pablo; Hauck, Daniel; Erbe, Manuela; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard  
Optimization of the oxygenation process in CSD-grown REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> films
- Erbe, Manuela; Cayado, Pablo; Freitag, Wolfram; Meledin, Alexander; Falter, Martina; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard; Bäcker, Michael  
Pinning enhancement in CSD-grown REBCO nanocomposites towards high-field applications
- Erbe, Manuela; Cayado, Pablo; Freitag, Wolfram; Meledin, Alexander; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard  
Advanced CSD-grown REBCO nano-composites for high-field applications
- Goldacker, Wilfried; Fluekiger, René  
Role of strains in superconducting Nb<sub>3</sub>Sn
- Goldacker, Wilfried; Noe, Mathias  
Overview on HTS projects and applications worldwide
- Goldacker, W.; Kario, A.; Otten, S.  
HTS Roebel cables, status and potential
- Grilli, Francesco; Benkel, Tara; Hänisch, Jens; Lao, Mayraluna; Reis, Thomas; Berberich, Eva; Wolfstädter, Simon; Schneider, Christian; Miller, Pail; Palmer, Chloe; Glowacki, Bartek; Climente-Alarcon, Vicente; Smara, Anis; Tomkow, Lukasz; Teigelkötter, Johannes; Stock, Alexander; Büdel, Johannes; Jeunesse, Loïc; Staempflin, Martin; Delautre, Guillaume; Zimmermann, Baptiste; Woude, Ruud van der; Perez, Ana; Samoilenkov, Sergey; Molodyk, Alexander; Pardo, Enric; Kapolka, Milan; Li, Huo; Dadhich, Anang  
Superconducting motors for aircraft propulsion: the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project
- Grilli, F.; Zermeño, V.; Brambilla, R.; Benkel, T.; Morandi, A.; Pardo, E.  
Magnetic vector potential-based formulations for modeling superconducting applications: a valid alternative to the H-formulation
- Grohmann, Steffen  
A new European Standard for the protection of helium cryostats against excessive pressure
- Grohmann, Steffen  
A new European Standard for the protection of helium cryostats against excessive pressure
- Grohmann, Steffen  
Development potential of mid-scale cooling systems for HTS applications
- Grohmann, Steffen  
Standardization and material databases: a successful example
- Gyuráki, Roland; Schreiner, Fabian; Benkel, Tara; Sirois, Frédéric; Grilli, Francesco  
Electrical and thermal behaviours of insulated and non insulated HTS wound pancake coils at 77 K
- Hänisch, Jens  
Jc in Fe-based superconducting films – dimensionality, anisotropy, microstructure
- Lida, K.; Tarantini, C.; Matsumoto, T.; Kondo, K.; Hatanano, T.; Meyer, S.; Hänisch, J.; Jaroszynski, J.; Wang, C.; Saito, H.; Hata, S.; Ikuta, H.  
Electrical transport properties of NdFeAs(O,F) thin films on vicinal substrates
- Neumann, H.  
Kryotechnik – Einführung
- Neumann, H.  
Sicherheitstechnik - Gefahren im Umgang mit Kryogenen
- Neumann, H.  
Thermische Isolation
- Neumann, H.  
Thermodynamische Grundlagen
- Neumann, H.  
Tieftemperaturmess- und Regeltechnik
- Neumann, H.  
Wärmeübertragung an Kryogene – Kühltechniken
- Neumann, Holger  
MSR – kryogene Temperaturmessung
- Neumann, Holger  
MSR – Kryoventile
- Vortrag Neumann, Holger  
MSR – Prozessmesstechnik

Neumann, Holger  
MSR – Sicherheitstechnik

Neumann, Holger  
Vakuumtechnik und Gefahren im Umgang mit Kryogenen

Schlachter, Sonja I.; Brand, Jörg; Elschner, Steffen; Fink, Stefan; Holzapfel, Bernhard; Lietzow, Ralph; Kudymow, Andrej; Neumann, Holger; Müller, Ralf; Strauß, Severin  
HTS Cable for Power Distribution in Hybrid-Electric Propulsion System for Aircraft

Shabagin, Eugen; Grohmann, Steffen  
Einsatz eines kompakten, mikrostrukturierten Wärmeübertragers im kryogenen Gemischkältekreislauf

Shabagin, Eugen; Grohmann, Steffen  
Influence of mixture composition on the performance of cryogenic mixed refrigerant cooled current leads

Shabagin, Eugen; Raczka, Kevin; Grohmann, Steffen  
Investigation of cryogenic mixed-refrigerant cooled current leads in combination with Peltier elements

Tamson, Jens; Grohmann, Steffen; Blanck, P.  
Inbetriebnahme des Cryogenic Phase Equilibria Test Stand CryOPHAEQTS

Tamson, Jens; Stamm, Michael; Grohmann, Steffen  
Aufbau des Cryogenic Phase Equilibria Test Stand CryOPHAEQTS

Weber, Christina  
Status of a european standard for the protection of helium cryostats against excessive pressure

### Zeitschriftenaufsatz

\* Antunes, Rodrigo; Frances, Laëtitia; Incelli, Marco; Santucci, Alessia  
Numerical study and experimental verification of protium permeation through Pd/Ag membranes for fusion applications; Fusion engineering and design; 0920-3796

\* Blanken, T. C.; et.al.  
Real-time plasma state monitoring and supervisory control on TCV; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Coad, J. P.; Rubel, M.; Likonen, J.; Bekris, N.; Brezinsek, S.; Matthews, G. F.; Mayer, M.; Widdowson, A. M.  
Material migration and fuel retention studies during the JET carbon divertor campaigns; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Coleman, M.; Hörstensmeyer, Y.; Cismondi, F.  
DEMO tritium fuel cycle: performance, parameter explorations, and design space constraints; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Day, Christian; Butler, B.; Giegerich, Thomas; Ploeckl, B.; Varoutis, Stylianos  
A smart three-loop fuel cycle architecture for DEMO; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Drenik, A.; et.al.  
Analysis of the outer divertor hot spot activity in the protection video camera recordings at JET; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Frattolillo, A.; Baylor, L.R.; Bombarda, F.; Cismondi, F.; Colangeli, A.; Combs, S.K.; Day, Chr.; D'Elia, G.; Gebhart, T.E.; Iannone, F.; Lang, P.T.; Meitner, S.J.; Migliori, S.; Moro, F.; Mozzillo, R.; Pégourié, B.; Ploeckl, B.; Podda, S.; Poggi, F.  
Addressing the feasibility of inboard direct-line injection of high-speed pellets, for core fueling of DEMO; Fusion engineering and design; 0920-3796

\* Giegerich, T.; Battes, K.; Schwenzer, J. C.; Day, C.  
Development of a viable route for lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Gliss, Curt; Ambrosino, Roberto; Bachmann, Christian; Ciattaglia, Sergio; Flammini, Davide; Giegerich, Thomas; Jimenez, Samuel; Wilde, Andrew  
Initial integration concept of the DEMO lower horizontal port Fusion engineering and design; 0920-3796

\* Hatano, Y.; et.al.  
Tritium distributions on W-coated divertor tiles used in the third JET ITER-like wall campaign; Nuclear materials and energy; 2352-1791

\* Heller, Reinhard; Blanchier, Paul; Fietz, Walter H.; Wolf, Michael J.  
Quench Analysis of the HTS CrossConductor for a Toroidal Field Coil; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074

\* Heller, R.; Bau, H.; Nagel, M.; Rummel, T.  
Operation Experience of the Wendelstein 7-X High-Temperature Superconductor Current Leads; IEEE transactions on applied superconductivity; 1051-8223, 1558-2515

\* Ho, A.; Citrin, J.; Auriemma, F.; Bourdelle, C.; Casson, F.J.; Kim, Hyun-Tae; Manas, P.; Szepesi, G.; Weisen, H.  
Application of Gaussian process regression to plasma turbulent transport model validation via integrated modelling; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Kiptily, V.G.; Belli, F.; Eriksson, J.; Hellesen, C.; Goloborodko, V.; Schoepf, K.  
On a fusion born triton effect in JET deuterium discharges with H-minority ion cyclotron range of frequencies heating Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Kirov, K.K.; Baranov, Yu.; Carvalho, I.S.; Challis, C.D.; Eriksson, J.; Frigione, D.; Garzotti, L.; Graves, J.; Jacquet, P.; Keeling, D.L.; Lerche, E.; Lomas, P.J.; Lowry, C.; Mantsinen, M.; Rimini, F.  
Fast ion synergistic effects in JET high performance pulses; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Labit, B.; et.al.  
Dependence on plasma shape and plasma fueling for small edge-localized mode regimes in TCV and ASDEX Upgrade; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Lawson, K. D.; et.al.

Population modelling of the He II energy levels in tokamak plasmas: I. Collisional excitation model; Journal of physics / B; 0022-3700, 0368-3508, 0953-4075, 1361-6455, 1747-3713, 1747-3721

\* Meyer, H.; et.al.

Overview of physics studies on ASDEX Upgrade; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Neverov, V. S.; et.al.

Determination of isotope ratio in the divertor of JET-ILW by high-resolution H alpha spectroscopy: H-D experiment and implications for D-T experiment; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Orsitto, F P; Segre, S E

Approximate analytic expressions using Stokes model for tokamak polarimetry and their range of validity; Plasma physics and controlled fusion; 0741-3335, 1361-6587

\* Perez von Thun, C.; Frassinetti, L.; Horvath, L.; Saarelma, S.; Meneses, L.; de la Luna, E.; Beurskens, M.; Boom, J.; Flanagan, J.; Hillesheim, J.C.; Maggi, C.F.; Pamela, S.J.P.; Solano, E.R.

Long-lived coupled peeling ballooning modes preceding ELMs on JET; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Plouin, J.; Baudouy, B.; Four, A.; Charrier, J.P.; Maurice, L.; Novo, J.; Peters, B.J.; Liao, K.

Experimental study of second sound quench detection for superconducting cavities; Physical review accelerators and beams; 2469-9888

\* Reinking, Johannes; Schlösser, Magnus; Hase, Frank; Orphal, Johannes

First high-resolution spectrum and line-by-line analysis of the  $2\nu_{\{2\}}$  band of HTO around 3.8 microns; Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer; 0022-4073, 1879-1352

\* Röllig, Marco; Aso, T.; Hara, M.; Priester, F.

Galet – Benchmark of a Geant4 based application for the simulation and design of Beta Induced X-ray Spectrometry systems; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Santucci, Alessia; Antunes, Rodrigo; Bruni, Giacomo; Mallozzi, Federica; Incelli, Marco; Sansovini, Mirko  
Recent achievements of the Pd-Ag membrane technologies in tritium extraction system applications [in press]; Fusion engineering and design; 0920-3796

\* Sias, G.; et.al.

A locked mode indicator for disruption prediction on JET and ASDEX upgrade; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

\* Sirunyan, A. M.; et.al.

Measurement of exclusive  $\rho(770)^0$  photoproduction in ultraperipheral pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV; The European physical journal / C; 1434-6044, 1434-6052

\* Ström, P.; et.al.

Analysis of deposited layers with deuterium and impurity elements on samples from the divertor of JET with ITER-like wall; Journal of nuclear materials; 0022-3115

\* Tierens, W.; et.al.

Validation of the ICRF antenna coupling code RAPLICASOL against TOPICA and experiments; Nuclear fusion; 0029-5515, 1741-4326

\* Trier, E.; et.al.

ELM-induced cold pulse propagation in ASDEX Upgrade; Plasma physics and controlled fusion; 0032-1028, 0368-3281, 0741-3335, 1361-6587, 1879-2979, 2057-7648

\* Varoutis, S.; Igitkhanov, Yu.; Day, Chr.

Assessment of the 3D geometrical effects on the DEMO divertor pumping efficiency; Nuclear materials and energy; 2352-1791

\* Vasilopoulou, T.; et.al.

Improved neutron activation dosimetry for fusion; Fusion engineering and design; 0920-3796, 1873-7196

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

Design and analysis of HTS subsize-conductors for quench investigations towards future HTS fusion magnets [in press]; Cryogenics; 0011-2275

\* Zappatore, A.; Fietz, W. H.; Heller, R.; Savoldi, L.; Wolf, M. J.; Zanino, R.

A critical assessment of thermal-hydraulic modeling of HTS twisted-stacked-tape cable conductors for fusion applications; Superconductor science and technology; 0953-2048, 1361-6668

### Proceedingsbeitrag

\* Fink, Stefan; Zwecker, Volker

15 Min Dc breakdown tests with liquid nitrogen; 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Roma, Italy, June 23-27, 2019; 978-1-72811-718-8; 2153-3725

\* Vollmer, Michael; Enghardt, Adrian; Trittenbach, Holger; Bielski, Pawel; Karrari, Shahab; Böhm, Klemens  
Energy Time-Series Features for Emerging Applications on the Basis of Human-Readable Machine Descriptions; Tenth ACM International Conference on Future Energy Systems (ACM e-Energy) and its co-located workshops, Phoenix, AZ, United States, 25th - 28th of June 2019; 978-1-4503-6671-7

# Veröffentlichungen

## Eingeladene Vorträge

### Tabea Arndt

- T. Arndt, "Cooling Methods for HTS Applications – Challenges and Approaches", 3. International Workshop on Cooling Systems for High-Temperature Superconductor Applications (2019), GE Global Research, Niskayuna, NY, USA, 15.10.2019–17.10.2019
- T. Arndt, "HTS for Accelerators – Connections to Industry and Applications", 105. Plenary ECFA Meeting (2019), CERN, Genf, Schweiz, 14.11.2019–15.11.2019
- T. Arndt, "HTS Systems and Value Propositions", 32. International Symposium on Superconductivity (ISS 2019)
- Kyoto, Japan, 03.12.2019–05.12.2019

### Christian Day

- Day, Christian, The metal foil pump – How cold plasma helps to meet hot plasma, 7th International Conference on Advanced Plasma Technologies (ICAPT-7), Hue, Vietnam, 24 Feb – 1 Mar 2019.
- Katharina Battes, Christian Day, Volker Hauer, Systematic study of the outgassing behavior of different ceramic materials, Int. Vacuum Congress (IVC), Malmö, Schweden, 1–5 Jul 2019
- Christian Day, Vacuum Technology in Nuclear Fusion Int. Vacuum Congress (IVC), Malmö, Schweden, 1–5 Jul 2019.
- Giegerich, Thomas; Butler, Barry; Day, Christian; Hanke, Stefan; Härtl, Thomas; Hörstensmeyer, Yannick; Neugebauer, Cyra; Ploeckl, Bernhard, Innovative fuel cycle concepts for the EU-DEMO, 28th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE), Jacksonville, FL, USA, 2–6 June 2019.
- Thomas Giegerich, Katharina Battes, Christian Day, Jonas Schwenzer, Tim Teichmann, The HgLab Karlsruhe – A key facility for mercury related work in the development of the EU-DEMO fuel cycle, 6th Int. Symposium on liquid metal applications in fusion (ISLA), Urbana, IL, USA, 30 Sep–3 Oct 2019.
- Giegerich, T.; Day, C.; Gliss, C.; Hanke, S.; Härtl, T.; Hörstensmeyer, Y.; Ionescu-Bujor, M.; Müller, R.; Peters, B.; Scannapiego, M.; Strobel, H., Design status of the torus vacuum pumping system for tritium processing in the EU-DEMO, 12th International Conference on Tritium Science and Technology (Tritium 2019), Busan, Südkorea, 22–26 April 2019
- Y. Hörstensmeyer, Optimization of the DEMO Fuel Cycle using Dynamic Modelling, 14th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Budapest, Ungarn, 22–27 Sept 2019.

### Mathias Noe

- M. Noe, „Superconducting Materials and Applications R&D at Institute for Technical Physics at KIT“ PSI Colloquium, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland 28 January, 2019

- E. Marzahn, M. Noe, „Hochtemperatur-Supraleiter Kabel und Strombegrenzer“, 91. Kabelseminar, 19–20 February 2019, Leibniz Universität Hannover
- M. Noe, „Review of Power Applications for HTS“, 5th Workshop on Accelerator Magnets in HTS, Budapest 8–12 April, 2019
- M. Noe, M. Wolf, W. Fietz „Entwicklung von HTS Leiterkonzepten für Hochstromanwendungen“, 10. Braunschweiger Supraleiterseminar, 25–26 June, 2019
- M. Noe, "High-field conductor for future high-field applications", 26th Magnet Technology Conference, Vancouver, Canada, September 22–27, 2019.

### Sonja Schlachter

- Sonja I. Schlachter, Jörg Brand, Steffen Elschner, Stefan Fink, Bernhard Holzapfel, Ralph Lietzow, Andrej Kudymow, Holger Neumann, Ralf Müller, Severin Strauß, HTS Cable for Power Distribution in Hybrid-Electric Propulsion System for Aircraft, CEC-ICMC 2019, Hartford, July 21–25, 2019
- M. Erbe, P. Cayado, W. Freitag, J. Hänisch, B. Holzapfel, Advanced CSD-grown REBCO nanocomposites for high-field applications, CEC-ICMC 2019, Hartford, July 21–25, 2019
- Jens Hänisch et al., Jc in Fe-based superconducting films – dimensionality, anisotropy, microstructure, EUCAS 2019, Glasgow, 1.–5.9.2019
- M. Lao, J. Hänisch, D. Fuchs, B. Holzapfel, Examining vortex creep via electrical transport measurements of coated conductors, EUCAS 2019, Glasgow, 1.–5.9.2019
- F. Grilli et al., Superconducting motors for aircraft propulsion: the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project, ISS 2019, Kyoto, Japan, Dec 3-5
- Boll, Martin; Corduan, Matthias; Biser, Stefan; Weber, Phillip; Kuehn, Lars; Filipenko, Mykhaylo; Schlachter, Sonja; Holzapfel, Bernhard; Berg, Frederick Timothy Neil; Rostek, Peter, Holistic system approach for electric aircraft using superconducting components, 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2019), Glasgow, Vereinigtes Königreich, 01.09.2019–05.09.2019

### Michael Wolf

- M. J. Wolf: "High Temperature Superconductor Cable in Conduit Conductors for Future Fusion Magnets", 28th International Toki Conference (ITC-28) Toki, Japan, Nov. 2019
- M. J. Wolf: "HTS CroCo – a Strand for High Direct Current Applications", International Symposium on Superconductivity, Kyoto, Japan, Dec. 2019

# Veröffentlichungen

## Schutzrechtsbestände

(\* Neue Schutzrechtsanmeldungen in 2019)

\*\* Schutzrechtserteilungen mit Wirkung für Deutschland in 2019

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

Jüngst, Klaus-Peter; Kuperman, Grigory

DE 1149452  
US 6654222

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

Kläser, Marion

DE 102006012508  
US 8255023

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

Schneider, Theo

CH 1999764  
DE 102006012511  
FR 1999764  
GB 1999764  
US 8255022

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

Gehring, Rainer; Sander, Michael (verstorben)

DE 102007042711

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

Noe, Mathias; Schacherer, Christian

DE 2532016  
FR 2532016  
GB 2532016  
JP 5907894  
US 9583258

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

Neumann, Holger; Sander, Michael (verstorben)

DE 2684198  
FR 2684198  
GB 2684198

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

Brand, Jörg; Elschner, Steffen; Fink, Stefan; Goldacker, Wilfried; Kudymow, Andrej

AT 2729969  
CH 2729969  
DE 2729969  
FR 2729969  
GB 2729969  
IT 2729969  
KR 10192955  
US 939840

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

Grohmann, Steffen

CA 2857065  
CH 2791629  
DE 2791629  
FR 2791629  
GB 2791629  
IT 2791629  
JP 6042449  
KR 10-2014-7017781  
US 9964423  
AU 2016200479

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

Day, Christian; Giegerich, Thomas

CN 105706175  
DE 3061098  
FR 3061098  
GB 3061098  
KR 1020167007345

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

Holzappel, Bernhard; Rodriguez Zermeno, Victor

EP 14002754.1  
US 10153071

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

Cristescu, Ion

EP 15154339.4

**Schienegebundene Magnetschwebbahn**

Holzapfel, Bernhard; Noe, Mathias

CN 201680010135.3  
DE 102015001746.2  
EP 16705424.6-1754  
US 15/549,188

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

Hellmann, Sebastian

DE 102015114208.2  
EP 16758091.9-1212  
US 15/754,298

**Supraleitfähiger Leiter und Verwendung des supraleitfähigen Leiters**

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

CN 201680059630.3  
DE 102015010636.8  
EP 16757151.2  
US 15/752.235

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

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

CN 201680059651.5  
DE 102015010634.1  
EP 16756585.2  
US 15/752.221

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

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

CN PCT/EP2016/001369  
DE 102015010676.7  
EP 16756943.3-1212  
US 15/752.224

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

Rodriguez Zermeno, Victor

EP 17000099.6

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

Gomse, David; Grohmann, Steffen

EP 17401041.3 \*  
WO PCT/EP2018/000057\*

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

Day, Christian; Giegerich, Thomas; Hörstensmeyer, Yannik; Müller, Ralf; Peters, Benedikt

DE 102017213886.6  
EP 18185454.8\*

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

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

DE 202017102659

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

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

EP 18720292.4

**Automatic liquid cool-down of mixed-refrigerant cycles (ALC-MRC)**Gomse, Dvis, Grohmann, Steffen; Shabagin, Eugen  
DE**Microstructured current leads for application of superconductivity (Micro-CL)**

Gietzelt, Thomas; Grohmann, Steffen; Lambach, Heinz; Rabsch, Georg; Schorle, Cornelia; Shabagin, Eugen; Stamm, Michael

DE

# Kontakt

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

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

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

## Leitung

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)  
Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)  
Prof. Dr. Tabea Arndt (-23515)

## Stellvertretende Leitung

Dr. Walter Fietz (-24197)

## Sekretariat

Dagmar Klimmek (-23501)

## Kryotechnik

Dr. Holger Neumann (-22625)

## Supraleitermaterialentwicklung und energietechnische Anwendungen

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

## Geschäftsführer

Kai Bauer (-23705)

## Fusionsmagnete

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

## Vakuumtechnik

Dr. Christian Day (-22609)

## **Kontakt**

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

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

---

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

## **Herausgeber**

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

Stand April 2020

---

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