

# ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung  
Jahresbericht 2020



## 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, Giovanni De Carne, Christian Day, Walter Fietz, Thomas Giegerich, Francesco Grilli, Steffen Grohmann, Stefan Hanke, Jens Hänisch, Bernhard Holzapfel, Frank Hornung, Ingeborg Meyer, Mathias Noe, Stylianos Varoutis, Klaus Weiss, Michael Wolf

### Fotos und Grafiken:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### Titelbild:

Technologiedemonstrator eines supraleitenden 10 kW Generators mit nicht isolierten HTS Erregerspulen vor dem Zusammenbau.

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“

März 2021

# 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	26
<b>Preise und Auszeichnungen</b>	<b>34</b>
<b>Abgeschlossene Doktorarbeiten</b>	<b>35</b>
<b>Dr. Sven Meyer:</b> Einführung der Quasi-Multilayer-Technik zur gepulsten Laserdeposition für verbesserte supraleitende Eigenschaften von $\text{Ba}(\text{Fe}_{0,92}\text{Co}_{0,08})_2\text{As}_2$ -Dünnschichten	35
<b>Dr. Matthias Corduan:</b> Auslegung von supraleitenden AC-Maschinen für hybrid-elektrische Flugzeuge	36
<b>Dr. Aurélien Godfrin:</b> AC-Verluste in Hochtemperatur-Supraleiter-Bändern und -Kabeln für Leistungsanwendungen	37
<b>Dr.-Ing. Benedikt Peters:</b> Entwicklung einer auf Superpermeation basierenden wasserstoffselektiven Vakuumpumpe	38
<b>Lehre und Bildung</b>	<b>39</b>
Vorlesungen, Seminare und Workshops	39
Doktorarbeiten – Masterarbeiten – Bachelorarbeiten	40
Fach- und Gastvorträge	43
<b>Zahlen und Daten</b>	<b>44</b>
Organigramm	44
Personalstand	44
Personalveränderungen	45
Studentische Hilfskräfte	46
Gastwissenschaftler	46
Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien	47
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>49</b>
Veröffentlichungen „Fusion“	49
Veröffentlichungen „New Power Network Technology (SCI)“	52
Eingeladene Vorträge	56
Schutzrechtsbestände	57
<b>Kontakt</b>	<b>59</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 Versuchseinrichtungen und Labore mit entsprechenden technischen Infrastrukturen.

Dazu gehören:

- Labor zur Entwicklung supraleitender Komponenten für die Energietechnik
- Technikum zur Entwicklung supraleitender Materialien
- Magnetlabor zur Entwicklung von spezifischen supraleitenden Wicklungen und Magneten
- kryogenes Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe
- kryogene Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei sehr tiefen Temperaturen

Auch im Jahr 2020 erzielte unser Institut beachtliche wissenschaftliche Ergebnisse, bearbeitete erfolgreich etliche Projekte und meisterte einige besondere Herausforderungen. Wir gehen im Folgenden genauer darauf ein. Zwei bedeutende Auszeichnungen möchten wir voranstellen.

PD Dr. habil. Francesco Grilli erhielt eine außerplanmäßige Professur der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (Abbildung 1). Damit würdigte die Fakultät die langjährigen exzellenten Beiträge von Francesco Grilli in Forschung und Lehre, die in der Vergangenheit bereits mehrfach ausgezeichnet worden waren.

Dr. Giovanni De Carne warb eine Helmholtz Nachwuchsgruppe für die Entwicklung von hybriden Netzen ein. Mit den Nachwuchsgruppen bietet die Helmholtz-Ge-



**Abb. 1:** Dr. Francesco Grilli (Mitte) bekommt vom Prodekan der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professor Bernhard Holzapfel (rechts), die Urkunde überreicht.

meinschaft international herausragenden Postdoktorandinnen und Postdoktoranden die Möglichkeit, eine eigene Forschungsgruppe aufzubauen und die Sichtbarkeit ihrer Forschung zu erhöhen.

Im Forschungsfeld **Supraleiter- und Kryomaterialien** liegt ein wichtiger Schwerpunkt auf der Untersuchung und Weiterentwicklung von YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-Bandleitern. 2020 wurde mit dem Definite Screening Design eine neue Methode bei der Herstellung von Hochtemperatur-Supraleitern eingesetzt und etabliert. Dabei handelt es sich um ein äußerst effektives Verfahren zum Eingrenzen des Parameterraums für die Herstellung komplexer Materialien, deren Qualität von zahlreichen Wachstumsparametern abhängt. Ein Enabling Research Project des Konsortiums EUROfusion zur Entwicklung hochfester Strukturmaterialien für Magnete wurde erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden Materialien hergestellt und charakterisiert, die bei Temperaturen von 4,2 K bzw. 77 K eine ausgesprochen hohe Festigkeit (> 1000 MPa) und eine ausreichende Bruchzähigkeit besitzen. Zudem starteten 2020 mehrere neue Projekte. Dazu gehören ein DFG-Projekt zur simultanen Beschreibung der kalorischen und thermischen Eigenschaften von kryogenen Stoffgemischen sowie ein Verbundprojekt der Luftfahrtforschung zur Entwicklung von Hybridbauweisen für Hochleistungs-Elektromotoren mithilfe additiver Verfahren und von Faserverbund-Metall-Hybridbauweisen für den Einsatz in tiefkalter Umgebung in Wasserstoffatmosphäre.

Im Forschungsfeld **Energetische Anwendungen der Supraleitung** wurde in einem Verbundprojekt zur Entwicklung einer supraleitenden Industriestromschiene mit einer Stromstärke von 200 000 Ampere das Design der modularen Stromschiene finalisiert; zudem wurden vorbereitende Materialcharakterisierungen durchgeführt. Weiterhin startete ein neues Verbundprojekt zur Entwicklung eines kompakten 110 kV, 500 MVA supraleitenden Kabels für die Innenstadt von München. Das ITEP übernimmt darin die vollständige elektromagnetische und thermische Modellierung des Kabelsystems. Das Power-Hardware-in-the-Loop Labor wurde nach der ersten erfolgreichen Inbetriebnahme 2019 weiter ausgebaut; mit einem Schwungmassenspeicher wurden hochdynamische Messungen durchgeführt. Weiterhin sind die Modellierung und die Echtzeitintegration eines Mini-BHKWs und einer Mikrogasturbine so weit vorangeschritten, dass der Hardwareaufbau größtenteils fertiggestellt ist und erste Inbetriebnahmen bereits erfolgten.

Eine wichtige Aufgabe im Forschungsfeld **Supraleitende Magnettechnologie** ist die Entwicklung hochtemperatur-supraleitender Magnete. Im Rahmen eines Verbundprojekts zur Entwicklung und zum Vergleich von Konzepten für vollsupraleitende Windkraftgeneratoren modellierte das ITEP genau, wie sich die Wechselstromverluste im Stator durch eine optimierte Anordnung der supraleitenden Wicklungen um mehr als 80 Prozent reduzieren lassen. Bei der eigenen Entwicklung eines supraleitenden Windkraftgenerators mit Gleichstrom wurde der Wicklungsverbund aufgebaut, vorgetestet und so weit zusammengebaut, dass 2021 die abschließenden Tests erfolgen können. Im Rahmen einer internationalen Kooperation zwischen der EU und China wurde eine hochtemperatur-supraleitende Leiterprobe des am ITEP patentierten Kreuzleiters für Quenchuntersuchungen unter fusionsrelevanten Bedingungen entwickelt, eine Probelänge des Kreuzleiters von mehr als 50 m wurde erfolgreich gefertigt und getestet. Weiterhin wurde das Wickellabor um eine robotische Wickeltechnik mit drei Mehrachsrobotern erweitert. Künftig können im Wickellabor supraleitende 3D-Spulen gefertigt werden.

Im Forschungsfeld **Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs** entwickelt das ITEP grundlegend neue Vakuumtechnologien und Verfahren zur Tritiumextraktion und -rückgewinnung. Im Jahr 2020 liefen viele vorbereitende Arbeiten und Reviews für das neue europäische Fusionsprogramm von 2021 bis 2027. Das

detaillierte Design des Kryopumpensystems der Fusionsanlage JT-60SA wurde abgeschlossen und zur Herstellung ausgeschrieben. In dem komplexen System wurden neben den normalen Lastfällen auch Störungen durch Quenchfälle und Erdbeben untersucht. Eine erste Anwendung der am ITEP entwickelten Modellierungswerkzeuge erfolgte in einem Stellarator, wo für die Anlage W7-X die Simulation und Auslegung der Übergangsströmung im Divertor durchgeführt wurde. Im Bereich Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation wurde erstmals eine Quecksilber-Ringpumpe aus der Anlage THESEUS ausgebaut und zerlegt. Dadurch gewann das ITEP wertvolle Erfahrungen mit Umgang und Wartung, die zukünftig deutlich längere Lebensdauern ermöglichen. Bei der Wasserstoffseparation wurde die Anlage HESTIA (Hydrogen Experiments for Separation with Temperature Initiated Absorption) zur Untersuchung der Trennung von Wasserstoffisotopen innerhalb des Fusionsbrennstoffkreislaufs fertig aufgebaut.

In der **Ausbildung** betreuten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP 2020 insgesamt 31 Doktoranden sowie fünf Masteranden und 20 Bachelorarbeiten.

Die Corona-Pandemie stellte das Institut 2020 vor ungewöhnliche Herausforderungen. Bei dieser Gelegenheit möchten wir allen unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie allen Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie für ihr Verständnis für die zahlreichen Einschränkungen und ihre Umsicht bei der Einhaltung der notwendigen Maßnahmen herzlich danken. Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit im Jahr 2021 und wünschen Ihnen alles Gute.

Herzlichst

Ihre Institutsleitung



Mathias Noe

Bernhard Holzapfel



Tabea Arndt



*Herstellung von verlustarmen Hochstrom ROEBEL-Kabeln aus HTSL-Bandleitern im Rahmen einer KIT-CERN Forschungskooperation zur Entwicklung von HTSL-Dipolmagneten*

# 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 Realisierung von Leiterstrukturen bilden die Grundlage jeder supraleitenden Energie- oder Magnetanwendung. Daher bearbeitet das ITEP im Forschungsfeld Supraleiter- und Kryomaterialien aktuell folgende Forschungsthemen:

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

### Supraleitende Materialien

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

### Hochtemperatur-Supraleiter

In einer vergleichenden Studie zu verschiedenen Seltenen Erden (RE) in mithilfe chemischer Lösungsabscheidung (CSD) hergestellten  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Schichtmaterialien (REBCO, RE = Y, Nd, Sm, Gd, Dy, Ho, Er, Yb) wurden physikalische und mikrostrukturelle Eigenschaften eingehend untersucht [1]. Entgegen der allgemeinen Auffassung in der Literatur, die steigende  $T_c$ -Werte mit steigenden Radien der RE postuliert, zeigten die meisten untersuchten lanthanoidbasierten REBCO-Filme bei den höchsten erzielten  $T_c$ -Werten ein ähnliches Niveau von rund 94 K. Bei den  $J_c$ -Werten bei 77 K im Eigenfeld zeigte sich ein ähnliches Bild mit Werten zwischen 5 und 6 MA/cm<sup>2</sup>. Lediglich die ganz großen bzw. kleinen Lanthanoide Neodym und Ytterbium zeigten größere Schwierigkeiten in der Phasenbildung und wurden daher von der Betrachtung ausgeschlossen. Dies gilt

auch für Yttrium selbst, das als Nicht-Lanthanoid trotz ähnlicher Ionenradien abweichend leicht geringere Werte zeigte. Eine weitere interessante Erkenntnis war die starke Bindung der  $T_c$ -Werte der meisten RE an einen idealen c-Achsenparameter; lediglich Sm zeigte deutlich mehr Spielraum mit einer zunehmenden Erniedrigung von  $T_c$  mit steigenden Werten von c, wohingegen Dy in einem weiten Bereich sogar fast keinen Einfluss von c auf  $T_c$  zeigte (Abbildung 1).

In weiteren Studien zu einer möglichen Pinning-Verstärkung in CSD-gewachsenen REBCO-Schichten wurden Proben mit gemischten Seltenen Erden und/oder zusätzlichen Perowskit-Nanopartikeln untersucht.

Zum ersten Mal stellte das ITEP solche Gemischt-RE-Schichten mit großen RE-Ionen-Größenunterschieden her, besonders Sm und Yb [2] mit CSD, und zeigte, dass die Mischphasen  $\text{Yb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  bei tiefen Temperaturen besonders vorteilhaft sein können.  $\text{BaHfO}_3$ -haltige CSD-gewachsene REBCO-Schichten wurden eingehend hinsichtlich Wachstum, Mikrostruktur und Transporteigenschaften untersucht. Für  $\text{BaHfO}_3$ -Nanopartikel, die über den Ex-situ-Prozess, das heißt aus vorgeformten  $\text{ZrO}_2$ -Nanopartikeln in den Präkursorlösungen gewachsen sind, musste vor allem der Pyrolyseprozess angepasst werden, um eine homogene Nanopartikelverteilung zu erhalten, die für verbesserte Pinning-Eigenschaften notwendig ist. Mittlere Rampenraten und niedrige Pyrolysetemperaturen sind erforderlich, um große Grenzflächendichten von Nanopartikeln zu vermeiden, welche die Mikrostruktur der REBCO-Matrix und damit die Transporteigenschaften verschlechtern [3]. Die Pinning-Mechanismen solcher Nanokomposite in hohen Feldern bis zu 20 T wurden an einem GdBCO- $\text{BaHfO}_3$ -Nanokomposit aufgeklärt, das mithilfe der In-situ-Phasenbildungsmethode hergestellt wurde, das heißt mit Nanopartikeln, die sich während des GdBCO-Wachstums bilden. Regionen in Temperatur, Feld und Orientierung sowohl des ab-planaren intrinsischen Pinnings (Vortex Trapping und Lock-in) als auch des extrinsischen Pinnings an den  $\text{BaHfO}_3$ -Nanopartikeln wurden identifiziert [4].

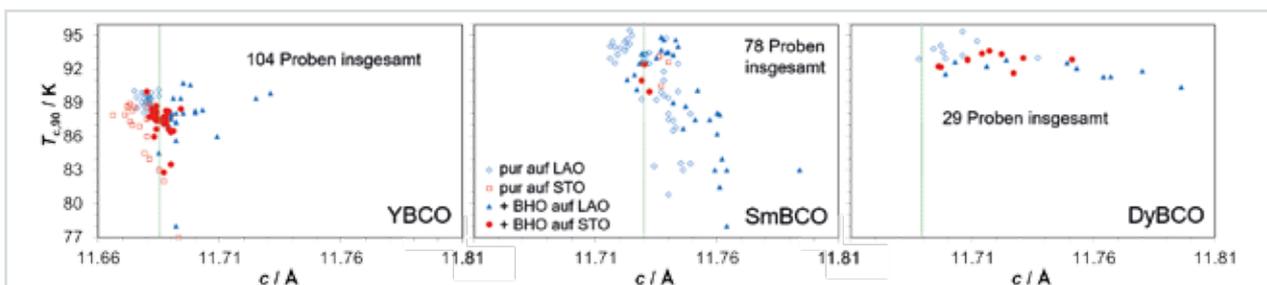


Abb. 1: Abhängigkeit der kritischen Temperatur  $T_c$  vom c-Achsen-Parameter für YBCO, SmBCO und DyBCO.

Die Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM) in Kombination mit der chemischen Analyse durch energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDXS) ist eine leistungsstarke Technik zur Untersuchung der Mikrostruktur solcher Nanokomposit-Dünnschichten. Verschiedene Arten von Defekten auf der Nanometerskala haben einen direkten Einfluss auf die supraleitenden Eigenschaften. Zum Beispiel können die eingebetteten BaHfO<sub>3</sub>-Nanopartikel anhand ihres Hf-Signals (Abbildung 2a, rot) identifiziert werden, um ihre Größe, Form und Verteilung zu bestimmen. Die Nanopartikel von etwa 20 nm Durchmesser sind innerhalb der Schichten homogen verteilt. Darüber hinaus wurden RE-Oxide (grün, Gd) in der Nähe der Grenzfläche zum SrTiO<sub>3</sub>-Substrat (gelb) beobachtet. Die Hochwinkelring-Dunkelfeld-STEM-Bildgebung (HAADF) zeigt die atomare Struktur solcher Nanopartikel und des umgebenden Films. Bei HAADF-STEM korreliert die Bildintensität direkt mit der mittleren Ordnungszahl, und schwerere Elemente erscheinen heller. Das RE-Oxid wächst nicht direkt an der Substratgrenzfläche, sondern nach einer einzelnen REBCO-Lage (Abbildung 2b). BaHfO<sub>3</sub>-Nanopartikel sind zufällig orientiert und können zusätzliche planare Defekte einführen (Pfeile, Abbildung 2c). Das ITEP führt die elektronenmikroskopische Analyse in Zusammenarbeit mit dem Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) am Campus Süd durch.

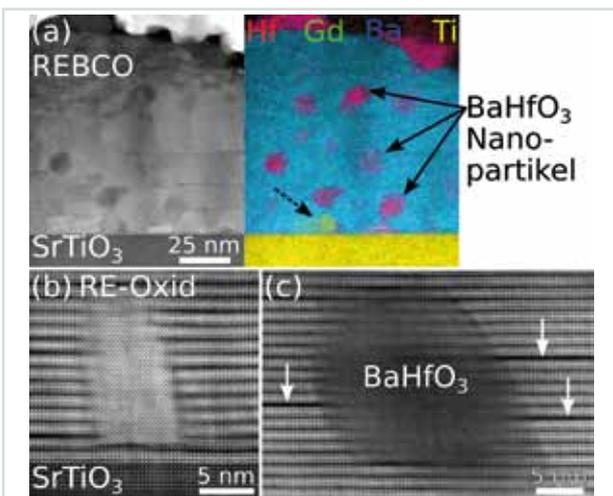


Abb. 2: Mikrostruktur einer ~ 200 nm-REBCO-BaHfO<sub>3</sub>-Nanokomposit-Schicht durch analytisches und atomar auflösendes HAADF-STEM (a). Querschnittsbild und Elementverteilungskarten von Hf, Gd, Ba und Ti. (b) RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in der Nähe der Substratgrenzfläche (gestrichelter Pfeil in (a)) und (c) BaHfO<sub>3</sub>-Nanopartikel mit planaren Defekten (Pfeile).

Um die mit CSD hergestellten REBCO-Schichten zu verbessern, müssen verschiedene Prozessparameter wie Kristallisationstemperatur ( $T_{crys}$ ), Sauerstoffpartialdruck ( $p_{O_2}$ ), Gesamtdruck, Taupunkt und Verweilzeit optimiert werden. Eine übliche Methode sind sogenannte Ein-Faktor-Experimente, bei denen nur ein Parameter geändert wird, während alle anderen konstant bleiben. Dies ist nicht nur aufwendig, sondern auch unvollständig, da sich eine Interaktion zwischen Parametern nicht erkennen lässt.

Eine neuartige Methode auf dem Gebiet der Statistischen Versuchsplanung (DOE) ist das Definitive Screening Design (DSD), bei dem jeder Parameter (Faktor) auf drei Ebenen – hoch, mittel, niedrig – eingestellt wird. DSD ermöglicht es, Haupteffekte – Effekte erster Ord-

nung eines einzelnen Faktors –, Zwei-Faktor-Wechselwirkungen – Korrelationen zwischen zwei Faktoren – und quadratische Effekte in einem linearen Modell abzuschätzen und gleichzeitig die Zahl der erforderlichen Experimente weitestgehend zu reduzieren. Das ITEP nutzt diese Technik, um die Verbesserung der kritischen Stromdichte im Eigenfeld bei 77 K ( $J_c^{E77}$ ) für ErBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-Schichten auf IBAD-Substraten zu untersuchen [5].

Abbildung 3 (links) zeigt die Abhängigkeit von  $J_c^{E77}$  von Taupunkt und  $T_{crys}$ : Niedrigere  $T_{crys}$ -Werte und niedrigere Taupunkte sind entscheidend für die Verbesserung von  $J_c^{E77}$ . Das Auftragen der  $J_c^{E77}$ -Werte weiterer Proben (15 bis 26) zusammen mit ihren 95-Prozent-Vorhersageintervallen (PI 95 %) bestätigt die Gültigkeit des Modells (Abbildung 3 rechts). Die meisten Daten fallen in dieses Vorhersageintervall. Ähnliche Optimierungen wurden für YBCO-BaZrO<sub>3</sub>-Nanokomposit-Schichten aus Lösungen mit vorgefertigten ZrO<sub>2</sub>-Nanopartikeln unternommen.

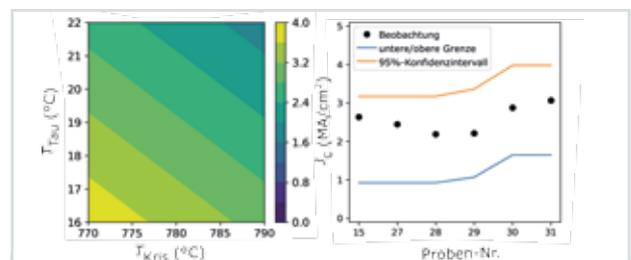


Abb. 3: Abhängigkeit von  $J_c^{E77}$  von Taupunkt und  $T_{crys}$  bei festem  $p_{O_2}$  (links) und Modellbestätigung für  $J_c^{E77}$  (rechts).

Studien zu den mit gepulster Laserdeposition (PLD) gewachsenen supraleitenden REBCO-Dünnschichten fokussierten auf den Einfluss des Sauerstoffglühvorgangs auf Struktur- und Transporteigenschaften. Das Sauerstoffglühen ist ein wichtiger Schritt bei der Dünnschichtpräparation, da es für die Bildung von CuO-Ketten und die Bildung der supraleitenden Phase verantwortlich ist. Zur Untersuchung des Sauerstoffglühens in situ, das heißt in der PLD-Kammer, und ex situ, das heißt im Röhrenofen, wurden PLD-gewachsene GdBCO-Dünnschichten unter Verwendung verschiedener Sauerstoffanreicherungsrou-

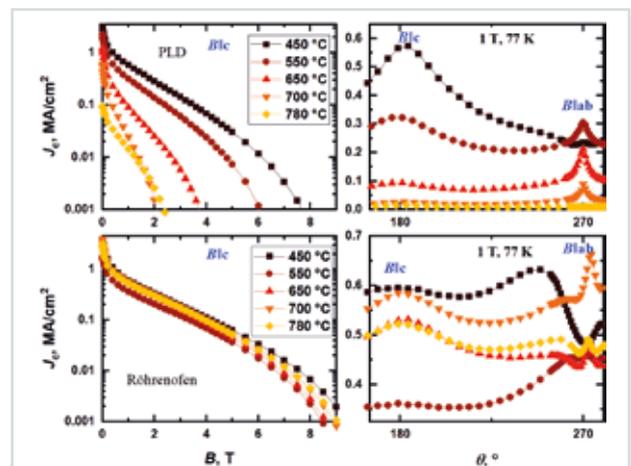
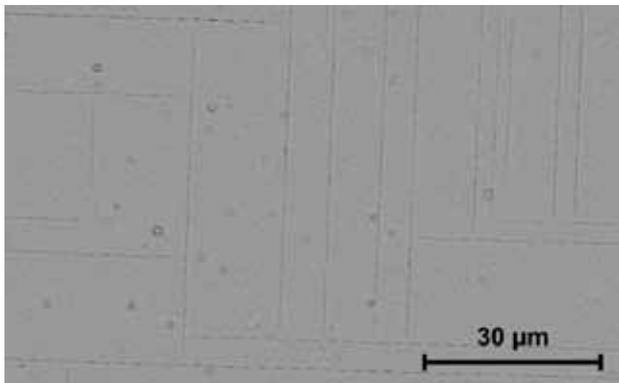


Abb. 4: Feldabhängigkeit ( $B-I_c$ ) und Winkelabhängigkeit ( $1 T$ ) der kritischen Stromdichte für verschiedene Glühtemperaturen im In-situ-Prozess (PLD) und im Ex-situ-Prozess (Röhrenofen).

ten mit variierten Parametern wie Temperatur, Haltezeit, Sauerstoffdruck und Abkühlrate hergestellt. Das Ex-situ-Sauerstoffglühen zeigte mit einer Erhöhung der kritischen Stromdichten im Feld um den Faktor zwei einen klaren Vorteil im Vergleich zum In-situ-Beladen (Abbildung 4). Für beide Beladungsarten werden die höchsten kritischen Stromdichten bei niedrigen Beladungstemperaturen erreicht, wobei für Nanokomposite ( $\text{GdBCO-BaHfO}_3$ ) höhere Beladungstemperaturen erforderlich sind.

Diese Studien zur Sauerstoffbeladung erstreckten sich auch auf CSD-gewachsene YBCO-Schichten auf technischen Substraten. Die vom Partner Dnano gelieferten Proben wurden während verschiedener Haltezeiten bei 285 °C mit Sauerstoff beladen, um die Kinetik des Sauerstoffbeladungsvorgangs zu untersuchen. Einige dieser Filme wurden mit Silber beschichtet, um dessen Rolle im Sauerstoffbeladungsprozess zu untersuchen.

Während der Untersuchungen an PLD-gewachsenen  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Schichten auf verschiedenen Substraten war das Auftreten von Rissen in den auf LSAT-Einkristallen abgeschiedenen Schichten zu beobachten. Der charakteristische Verlauf parallel zur a- beziehungsweise b-Richtung der Kristallstruktur (Abbildung 5) deutete auf eine Rissbildung durch thermische Verspannung beim Abkühlen nach der Deposition hin. Es zeigte sich jedoch, dass die Risse erst nach der Beladung mit Sauerstoff auftreten, sodass ein Zusammenhang mit der Bildung von ab-Achsen-Zwillingen zu bestehen scheint. Die Bildung der Risse ist dabei weitgehend unabhängig von der Beladungstemperatur; sie tritt nur während eines zu schnellen Abkühlvorgangs auf.

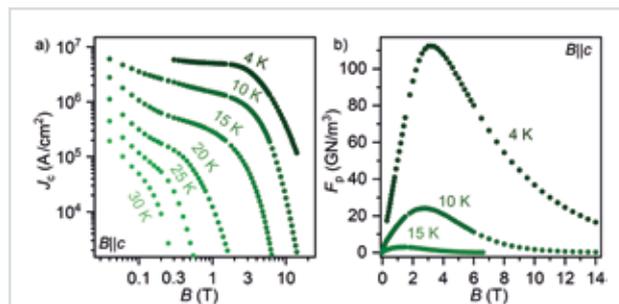


**Abb. 5:** Rissbildung in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  auf LSAT-Einkristallsubstraten bei zu schneller Abkühlung. Die Risse verlaufen parallel zur a- bzw. b-Kristallrichtung von  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

## Fe-basierte Supraleiter

Mit dem Ziel, die Pinning-Eigenschaften in Fe-basierten supraleitenden Materialien zu verbessern, setzte das ITEP seine Untersuchungen an  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ -Nanokompositen fort. Es wurden  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ -InAs-Nanokompositenschichten in Quasi-Multilagen-Technik mit typischerweise ~ 140 Schichten präpariert, wobei der InAs-Gehalt über die Pulszahl auf diesem Target pro Lage variiert wurde. Indium wurde durch ICP und in TEM-EDXS-Untersuchungen nachgewiesen, obwohl InAs-Nanopartikel nicht zu beobachten waren. Eine mittlere nominale InAs-Konzentration von ~ 1 mol% führte zu starkem c-Achsen-Pinning und einer Zunahme von  $J_c$  um den Faktor sechs [6].

In einer internationalen Zusammenarbeit zu anwendungsrelevanten Eigenschaften FeSe-basierter Schichten untersuchte das ITEP die anisotropen elektrischen Transporteigenschaften von  $(\text{Li,Fe})\text{OHFeSe}$ -Schichten [7]. Diese Schichten wurden mithilfe matrix-unterstützter Epitaxie in der Gruppe von Xiaoli Dong am Institut für Physik der Chinesischen Akademie der Wissenschaften hergestellt.  $(\text{Li,Fe})\text{OHFeSe}$  lässt sich auf zwei Arten auffassen: erstens als FeSe-Verbindung mit stark gedehnter c-Achse, das heißt als Bindeglied zwischen FeSe-Einkristallen mit niedriger Anisotropie und einem  $T_c$  von ~ 8 K und FeSe-Einzellagen-Schichten mit einem  $T_c$  von bis zu 100 K, zweitens als Chalkogenid-Äquivalent der  $\text{LnFeAsO}$ -Pniktidverbindungen (Ln Lanthanoid), wenn die Hydroxylgruppe als Einheit betrachtet wird. Die Filme mit einem  $T_c$  von ~ 42 K, scharfer biaxialer Textur und hoher Phasenreinheit zeigten außergewöhnlich hohe Eigenfeld- $J_c$ -Werte bei niedrigen Temperaturen (extrapoliert auf 16 MA/cm<sup>2</sup> bei 0 K), was durch die kurze Eindringtiefe  $\lambda \sim 200$  nm zu erklären ist, und eine maximale Pinningkraftdichte von ~ 115 GN/m<sup>3</sup> bei 4 K für  $\text{B}||c$  (Abbildung 6). Eine elektronische Anisotropie von ~ 11 in der Nähe von  $T_c$  (abnehmend mit sinkender Temperatur) führt zu starken 2D-Effekten, wie intrinsisches Pinning für Feldrichtungen nahe den ab-Ebenen, einem stark temperaturabhängigen Irreversibilitätsfeld  $H_{irr}$  und einem 2D-3D-Übergang in der Flusslinien-Flüssigkeitsphase.

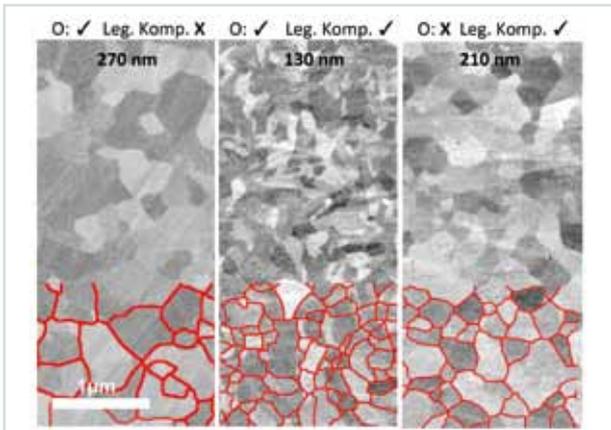


**Abb. 6:** Magnetfeldabhängigkeit von  $J_c$  (a) und korrespondierendem  $F_p$  (b) einer  $(\text{Li,Fe})\text{OHFeSe}$ -Schicht bei verschiedenen Temperaturen.

## $\text{Nb}_3\text{Sn}$

In der Hochenergiephysik, beispielsweise für den Future Circular Collider (FCC) am CERN, werden supraleitende Drähte benötigt, die den momentanen Leistungsstand um 30 bis 50 Prozent übertreffen. Das Material, auf dem diese Leiter basieren, ist  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , eine brüchige intermetallische Phase, die sich erst in einer Wärmebehandlung des Drahts bei Enddimensionen in einer Diffusionsreaktion zwischen einer Zinnquelle und einem Nb-Ausgangsmaterial bildet. Die Stromtragfähigkeit des gebildeten Supraleiters lässt sich steigern, indem seine Korngröße reduziert wird [8]. Dies lässt sich beispielsweise durch interne Oxidation einer zusätzlichen Legierungskomponente im Nb-Ausgangsmaterial realisieren. Die durch die Oxidation erzeugten Ausscheidungen agieren als Nukleationskeime bei der Bildung von  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  und reduzieren dessen Korngrenzenmobilität. Beide Faktoren führen zu einer Kornfeinung. Laut Literatur lässt sich eine Reduktion der  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Korngröße auch dadurch erzielen, dass bei der  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Phasenbildung besonders feinkörniges Nb vorliegt und eine oxidierbare Legierungskomponente allein und ohne interne Oxidation zugege-

ben wird. Tatsächlich lässt sich das Kornwachstum in der Nioblegierung durch Zugabe einer zu oxidierenden Legierungskomponente reduzieren. Eine vollständige Unterdrückung des Kornwachstums lässt sich jedoch nur dadurch erreichen, dass die Nb-Legierung auch intern oxidiert wird. Nur dann ist auch die gewünschte Reduktion der  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Korngröße zu beobachten (Abbildung 7). Kornfeinung im  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  wird also nach wie vor durch feiverteilte, nanoskalige Ausscheidungen erzeugt. Daher korreliert die beobachtete Unterdrückung der Rekristallisation im Nb zwar mit der Kornfeinung im  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , ist jedoch nicht deren Ursache. Zusätzliche positive Effekte eines feinkörnigen Nb-Ausgangsmaterials, wie eine erleichterte Sn-Diffusion entlang der Korngrenzen, werden in weiteren Untersuchungen behandelt.



**Abb. 7. Korngröße der Nb-Legierung nach 300 h bei 640 °C. Kornfeinung tritt auf, wenn entweder Sauerstoff oder eine Oxidationskomponente vorhanden ist. Die Rekristallisation wird jedoch nur unterdrückt, wenn beide Komponenten vorhanden sind.**

## Infrastruktur

Für die Abscheidung neuartiger sowie anwendungsrelevanter komplexer Funktionsmaterialien mit erhöhtem Durchsatz und verbesserter Wachstumskontrolle wurde ein neuer UHV-Dünnschicht-Abscheidungscluster (PRE-VAC) installiert (Abbildung 8). Er besteht aus zwei Beschichtungskammern – für gepulste Laserdeposition und Sputtern –, einer Argon-Handschuhbox und einer Target/Substrat-Speichereinheit, die durch einen zentralen Probentransfer verbunden sind. Probengrößen bis zu 4" Durchmesser oder 15 cm Länge und Proben Temperaturen bis zu 1200 °C sind möglich. Der Cluster lässt sich für die Zukunft um eine weitere UHV-Depositions- oder Analyse kammer erweitern.



**Abb. 8: UHV-Depositions-Cluster mit PLD, Sputtern, Ar-Box und Proben-speicher.**

Kontakt: jens.haenisch@kit.edu

- [1] M. Erbe et al., Supercond. Sci. Technol. **33** (2020) 094002
- [2] P. Cayado et al., R. Soc. Open Sci. **7** (2020) 201257
- [3] P. Cayado et al., Sci. Rep. **10** (2020) 19469
- [4] K. Iida et al., Supercond. Sci. Technol. **34** (2021) 015009
- [5] R. Hayasaka et al., Sci. Rep. **10** (2020) 19934
- [6] S. Meyer, Introduction of quasi-multilayer pulsed laser deposition for enhanced superconducting properties of  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$  thin films, Dissertation 2020, KIT
- [7] J. Hänisch et al., Supercond. Sci. Technol. **33** (2020) 114009
- [8] C. Bühler et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **30** (2020) 6000805

## Kryogene Stoffeigenschaften

Im Rahmen der **Technologieentwicklung kryogener Gemischkältekreisläufe** (cryogenic mixed-refrigerant cycles – CMRC) für HTS-Anwendungen wurde eine zweite Doktorarbeit abgeschlossen [9]. Aus der Arbeit entstanden in Kooperation des ITEP mit dem Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) und dem Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) des KIT zwei Patentanmeldungen. In einer dritten Doktorarbeit wurden in [9] entwickelte Prototyp-Wärmeübertrager erfolgreich getestet, und ein neuer Prüfstand zur Entwicklung CMRC-gekühlter 10 kA-Stromzuführungen wurde konzipiert. Die Stromquelle für diesen Prüfstand wurde über ein Programm für Sonderinvestitionen im Rahmen von KIT Future Fields eingeworben. Auf der Basis der Nutzung der von ITEP und ITTK gemeinsam errichteten Versuchsanlage CryOPHAEQTS (**Cryogenic Phase Equilibria Test Stand**) wurde das DFG-Projekt **Simultane Beschreibung der kalorischen und thermischen Eigenschaften von kryogenen Stoffgemischen** eingeworben, in dem eine präzise Zustandsgleichung für Neon-Helium-Gemische entwickelt wird. Zum Thema **Wärmetransportbeschichtungen** (heat transfer coatings, HTC) wurde das Europäische Patent [10] erteilt. Physikalische Grundlagenuntersuchungen dazu liefen in der Magnettestanlage MTA-I am ITEP.

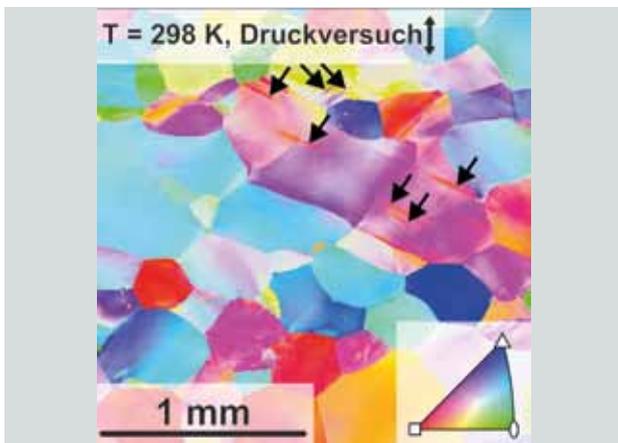
Kontakt: steffen.grohmann@kit.edu

- [9] Gomse, D.: Development of heat exchanger technology for cryogenic mixed-refrigerant cycles. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, 2020.
- [10] Grohmann, S., Gomse, D. and Dutoit, B.: Use of a coating layer on a heat exchanger surface. EP 3 385 656 (B1). Sept. 2020

## Kryo-Strukturmaterialien

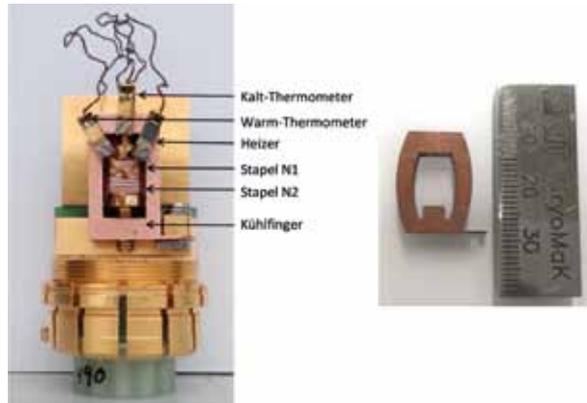
Aufgrund ihrer herausragenden Duktilität in einem großen Temperaturbereich eignet sich die äquiatomare High Entropy Legierung  $\text{HfNbTaTiZr}$  gut dafür, Verformungsmechanismen in konzentrierten, kubisch-raumzentrierten Mischkristallen zu untersuchen. Im DFG-Projekt **High Entropy Alloys** wurden unterbrochene Druckversuche in einem Temperaturbereich von 77 K bis 1073 K bei einer Variation der plastischen Dehnung durchgeführt. Die Proben wurden in Zusammenarbeit mit Kollaborationspartnern des Instituts für Angewandte Materialien (IAM-WK) bei hohen Temperaturen

getestet. Mithilfe der Karlsruhe Nano Micro Facility (KNMF) wurde Rückstreu-Elektronenbeugung (EBSD) eingesetzt. Dabei ließ sich nachweisen, dass sich HfNbTaTiZr durch Gleitung und Bildung von Kinkbändern plastisch verformt. Abbildung 9 zeigt die Orientierungskarte des Längsschnitts einer HfNbTaTiZr-Probe, die bei 298 K verformt wurde. Die Richtung der Druckachse ist durch den Doppelpfeil oben im Bild angedeutet. Die Karte wurde aus Orientierungen generiert, die anhand von EBSD ermittelt wurden. Dabei zeigt die Mikrostruktur abgeflachte Körner, die von plastischer Verformung durch Gleitung herrühren. Zusätzlich sind Kinkbänder zu erkennen, die im Bild mit Pfeilen markiert sind. Die Farbgebung der Orientierung ist der inversen Polfigur aus dem Bildeinsatz zu entnehmen. Die gleichen Verformungsmechanismen zeigen sich nach einer Verformung bei 77 K bis hin zu 4,2 K. Im Jahr 2021 wird der Fokus auf der Untersuchung der Verformungsmechanismen bei Temperaturen unterhalb von 77 K liegen. Dafür sind weitere Druckversuche zusammen mit EBSD-Experimenten geplant [12].



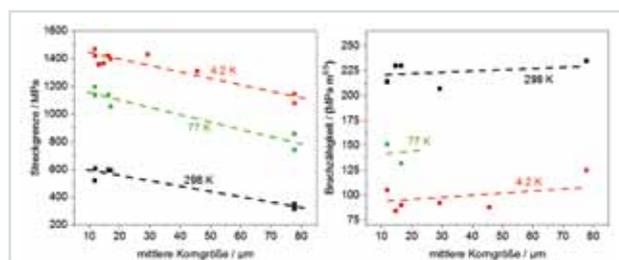
**Abb. 9:** Orientierungskarte des Längsschnitts einer HfNbTaTiZr-Probe verformt bei 298 K. Der Doppelpfeil oben im Bild zeigt die Druckachse; die Pfeile markieren Kinkbänder; der Bildeinsatz zeigt die Orientierung.

Der **thermische Kontaktwiderstand** ist ein grundlegender Parameter bei HTS-Kabeln, um deren Quenchverhalten vorherzusagen und zu steuern. Gerade bei verseilten HTS-Kabeln mit äußerer Stahlhülle (cable-in-conduit-conductor CICC) bestimmt die Wärmeübertragung zwischen einzelnen Teilen des Leiters, wie HTS-Bändern und Bauteilen aus normalleitenden Metallen, das Verhalten im Quenchfall. Ein thermischer Kontakt lässt sich realisieren, indem dünne Platten aus entsprechenden Materialien – Kupfer oder Edelstahl – geschnitten und gestapelt werden. Stapel lassen sich jeweils ausschließlich aus dünnen Kupferplatten oder dünnen Edelstahlplatten herstellen, um Kupfer-Kupfer- oder Stahl-Stahlkontakte zu charakterisieren. Beim abwechselnden Stapeln von Kupfer und Stahl lässt sich der Kupfer-Stahlkontakt betrachten. Anhand der bekannten Wärmeleitfähigkeit der Grundmaterialien wurde der thermische Kontaktwiderstand aus der Messung im Temperaturbereich von 2 K bis 300 K ermittelt. Bei den Untersuchungen zeigte sich die wesentliche Abhängigkeit vom Anpressdruck, der auf den Kontaktstapel ausgeübt wird. Eine spezielle Messeinheit wurde entwickelt, um den Anpressdruck, der auf den Stapel wirkt, anhand von Dehnungsmessstreifen zu bestimmen (Abbildung 10). Sie wird für Messungen im Jahr 2021 vorbereitet.



**Abb. 10:** Kupferrahmen auf Messplattform mit eingebauten Stapel N1 und N2 (links). Angepasster Rahmen, um gleichzeitig den Anpressdruck zu messen (rechts).

Angeichts der stetig steigenden Anforderungen an die in supraleitenden Magneten verwendeten Strukturmaterialien widmet sich das Enabling Research Projekt **High Strength Materials** der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von austenitischem rostfreiem Stahl bei kryogenen Temperaturen. Ziel ist, eine industriell realisierbare thermomechanische Verarbeitungsmethode des Edelstahls 316LN zu etablieren, um die mechanischen Eigenschaften für kryogene Anwendungen systematisch anzupassen. Basierend auf verfügbaren Prozessparametern und numerischen Simulationen wurden spezifische Umformungsverfahren definiert, um die Korngröße gezielt einzustellen. Mit der numerischen Simulationssoftware DEFORM HT/3D und der Finite-Elemente-Methode wurde die Verteilung von Dehnung und Temperatur im heiß/kalt verarbeiteten Material bestimmt; damit wurde die resultierende Korngröße im Gefüge ermittelt. Mechanische Experimente bei Raumtemperatur, 77 K und 4,2 K zeigen im Zugversuch die erwartete Steigerung der Festigkeit mit reduzierter Korngröße. Zugleich wurde die Bruchzähigkeit konstant gehalten (Abbildung 11) [13].

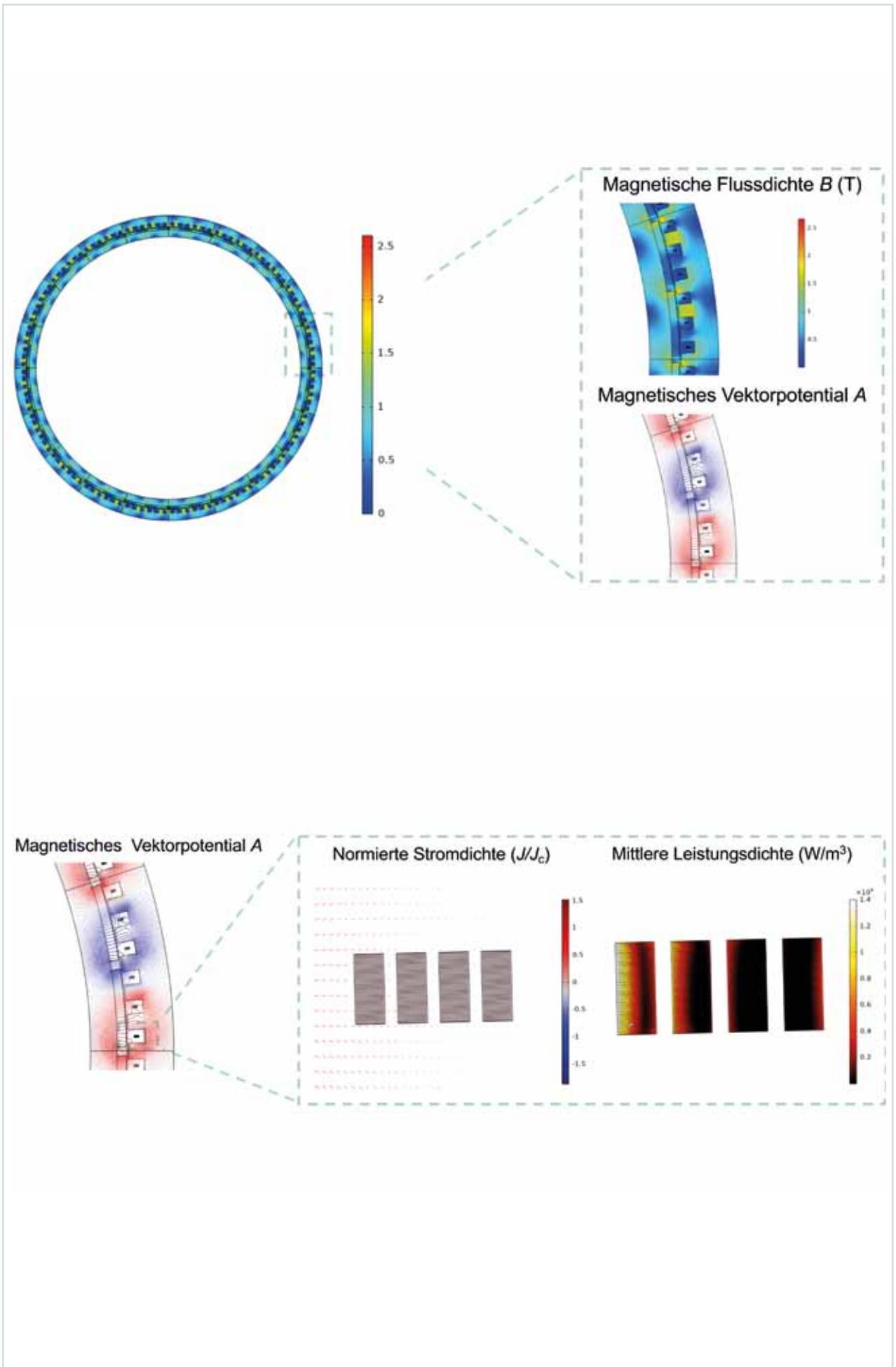


**Abb. 11:** Zunehmende Streckgrenze mit abnehmender Korngröße (links), Bruchzähigkeit mit konstantem Verlauf bei verschiedenen Temperaturen (rechts).

[12] Chen et al, "Influence of temperature and plastic strain on deformation mechanisms and kink band formation in homogenized HfNbTaTiZr", to be published in Crystals

[13] Weiss et al. "Mechanical Properties after Thermo-mechanical Processing of Cryogenic High-Strength Materials for Magnet Application", to be published in Fusion Engineering and Design

Kontakt: klaus.weiss@kit.edu



Simulation des elektromagnetischen Felds eines voll supraleitenden Windkraftgenerators (oben) mit gleichzeitiger Berechnung der AC-Verluste in den Einzelleitern (unten).

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Energietechnische Anwendungen der Supraleitung

Koordination: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe

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

- Supraleitende Netz- und Energiekomponenten
- Modellierung von Supraleitern und Komponenten
- Echtzeit-Systemintegration

### Supraleitende Netz- und Energiekomponenten

Die Schwerpunkte des Themas Supraleitende Netz- und Energiekomponenten liegen auf der Entwicklung neuartiger Betriebsmittel für Elektroenergiesysteme sowie der Entwicklung von ressourcen- und energieeffizienten Anwendungen für die Energietechnik. Dazu erzielten die Forscher im Jahr 2020 die im Folgenden dargestellten Ergebnisse.

Im 2019 begonnenen und vom BMWi geförderten Verbundprojekt **DEMO200** (Neuartiges Supraleitendes Hochstromsystem für 200 kA Gleichstrom) arbeitet das ITEP gemeinsam mit den Partnern Vision Electric Superconductors, Messer, Trimet und THEVA daran, 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. Dies würde gegenüber dem Stand der Technik von 20 kA eine Verzehnfachung des Stroms bedeuten und ein breites Anwendungsspektrum in der Industrie eröffnen. Innerhalb des Projekts hat das ITEP die Aufgabe übernommen, die supraleitenden Bandleiter zu charakterisieren, die grundlegende Geometrie und die Kontakte mit zu entwickeln und einen Test an einem skalierten Stromschienenele-

ment durchzuführen. Abbildung 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Tests mit drei 20 kA Teilleitern (TL), der am ITEP erfolgen wird. Neben zwei Teilleitern auf der Basis gestapelter Bandleiter wird ein Teilleiter auf der Basis von Kreuzleitern (CrossConductor – CroCo) aufgebaut. In beiden Varianten werden die Ausdehnungen aufgrund von Temperaturänderungen intrinsisch kompensiert. Von entscheidender Bedeutung sind die Kontaktierungen der Supraleiter zum Kupfer und untereinander. Dazu wurden zahlreiche Versuche durchgeführt; die Kontaktausführung wurde detailliert festgelegt. Ebenso sind hohe Kräfte zwischen den Supraleitern abzufangen. Dazu liefen einige Vortests an mehreren Leiterproben und realen Anordnungen.

Zum Einsatz in der Innenstadt von München begann das ITEP mit Projektpartnern die Entwicklung eines kompakten supraleitenden Kabels für eine Leistung von 500 MVA bei einer Spannung von 110 kV. Perspektivisch kann dieses supraleitende Kabel ein konventionelles 380 kV-Kabel und das dazu notwendige Tunnelbauwerk ersetzen. Das Projektkonsortium verfolgt das Ziel, innerhalb von zwei Jahren alle notwendigen technischen Voraussetzungen zu erfüllen und die wichtigsten Komponenten zu entwickeln. Dazu gehören ein 200 Meter langes Kabelteilstück, Endverschlüsse sowie die Kühlung. Nach erfolgreichem Abschluss des Projekts ist geplant, die Technologie für eine Strecke von zwölf Kilometern weiterzuentwickeln. Die Forschungsarbeiten des KIT umfassen vor allem die komplexe Simulation des elektromagnetischen und thermischen Verhaltens des Kabels. Die Forschungen sind Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts **SWM SuperLink** (Innerstädtisches HTS-Hochspannungskabel zur Absicherung kritischer Infrastruktur im Zuge der Energiewende). Dem Projektkonsortium gehören neben dem KIT und der Fachhochschule Südwestfalen die Stadtwerke München sowie die Unternehmen THEVA, NKT Cables Group und Industriegase-Konzern Linde an.

Elektrisches Fliegen stellt eine vielversprechende technische Möglichkeit dar, CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr deutlich zu verringern. Im Rahmen der Luftfahrtforschung des Bundes entwickelte das ITEP im Verbundprojekt **TELOS** (HTS-Leitertechnologie für thermisch-elektrisch optimierte Luftfahrtantriebssysteme) die Technologie dazu weiter. Dazu gehören auch leichte und kompakte Stromleitungen zwischen den einzelnen elektrischen Komponenten. Im Rahmen der Entwicklung eines DC-Kabels für hybrid-elektrische Flugzeugantriebssysteme wurden zunächst verschiedene Untersuchungen an Leitern und Kontakten durchgeführt. Darüber hinaus wurde ein Demonstrator für den elektrischen Test eines auf einen Betriebsstrom von

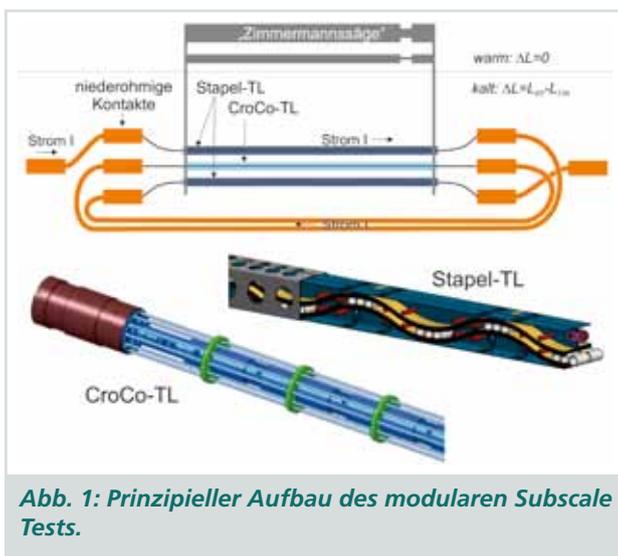


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau des modularen Subscale Tests.

13.3 kA bei 20 K bzw. 3.3 kA bei 77 K ausgelegten kompakten supraleitenden Kabels aufgebaut; verschiedene Tests wurden in flüssigem Stickstoff durchgeführt. Parallel dazu wurde ein Kryodemonstrator entwickelt, mit dem das Kühlverhalten solcher Kabel bei Betriebstemperaturen von 20 K bis 80 K getestet werden soll. Der Kryodemonstrator wurde 2020 weiter aufgebaut (Abbildung 2). In diesem Projekt arbeitet das ITEP eng mit Partnern wie Airbus und Siemens zusammen und kooperiert im Rahmen zweier Doktorarbeiten eng mit Rolls-Royce und Siemens.



Abb. 2: Aufbau der Ventilbox und des Kryodemonstrators für eine 20-K-Hochstromleitung mit Hochtemperatur-Supraleitern.

2020 startete auch ein neues EU-Projekt im Rahmen des Programms Horizon 2020 mit Beteiligung des ITEP: In **MEESST** (MHD Enhanced Entry System for Space Transportation) geht es um die Entwicklung eines neuartigen Systems zur Plasmaabschirmung beim Eintritt von Raumfahrzeugen in die Atmosphäre der Erde und anderer Planeten. Mithilfe eines supraleitenden Magneten wird das beim Eintritt in die Atmosphäre in der Schockfront entstehende Plasma vor der Raumkapsel so beeinflusst, dass sich eine wesentlich geringere Temperatur an der Außenhülle der Raumkapsel ergibt. Außerdem soll das Plasma durch magneto-hydrodynamische Effekte so beeinflusst werden, dass Radiowellen nicht abgeschirmt werden, damit der Funkkontakt zu Satelliten oder Erdstationen nicht gestört wird. Das ITEP hat in diesem Projekt die Aufgabe übernommen, den supraleitenden Magneten für Experimente am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart und am Karman Institute for Fluid Dynamics in Belgien zu fertigen und zu testen.

Supraleitende Magnetheizer ermöglichen bei der Erwärmung von Metallen in der Industrie gegenüber bisherigen Methoden eine Energieeinsparung um mehr als 30 Prozentpunkte. Sie wurden bereits in Einzelstücken gebaut und betrieben. Bisher sind jedoch noch nicht alle betrieblichen Anforderungen erfüllt. Wesentliche Aufgabe des ITEP im BMWi-Verbundprojekt **RoWaMag** (Robuster und wartungsarmer Magnetheizer mit Hochtemperatur-Supraleiter-Spulen für Warmumformprozesse) zum Aufbau und Test eines robusten und wartungsarmen Magnetheizers mit Supraleitern ist, ein langlebiges Kryosystem inklusive des Kryo-

staten und der Kälteanlagen zu entwickeln. Gemeinsam mit den Partnern THEVA, Bültmann und Maschinenfabrik Beck wurde 2020 das Kryodesign finalisiert. Alle Hauptkomponenten befinden sich zur Fertigung in der Werkstatt. Da der Magnet leitungsgekühlt wird, nahmen die Forscher eine genaue Analyse der Temperaturverteilung im supraleitenden Wickelpaket vor. Abbildung 3 zeigt eine Aufsicht auf den Kryostat, in den das supraleitende Spulenpaket integriert wird. Weiterhin liefen 2020 wichtige Vortests zum Betrieb der Kleinkühler und zur Ausführung von festen und lösbaren Verbindungen.

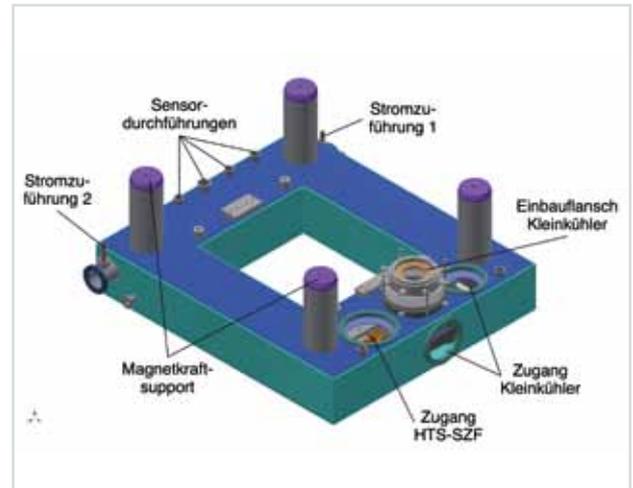


Abb. 3: Aufsicht auf den Kryostat des supraleitenden Magnetheizers.

Ein künftiger Bedarf an supraleitenden Strombegrenzern für die Hochspannung erfordert weitere experimentelle Daten für den **Durchschlag von flüssigem Stickstoff**, die bisher nicht verfügbar sind. Die Anlage **FATELINI 2** (Facility for TEsting Liquid Nitrogen) am ITEP wurde bisher zur Durchbruchspannungsprüfung von gesättigtem und unterkühltem Flüssigstickstoff mit Wechselspannung bis zu 230 kV (eff) und Standard-Blitzstoßspannung bis zu 365 kV genutzt. Für das europäische Projekt **FASTGRID** wurde die Anlage modifiziert, um Gleichstromprüfungen bis zu einer Spannung von 325 kV durchführen zu können. Das eingesetzte Glocke-Platte-Elektrodensystem (Abbildung 4) ermöglicht Durchbruch- und Überschlagentests. Der Flüssigstickstoffraum über der geerdeten Ebene lässt sich mit einer Webcam durch Fenster des Kryostaten beobachten, um das Siedeverhalten bei der Erzeugung von Wärmeimpulsen innerhalb der Platte unter Hochspannungsanwendung zu untersuchen. Der Kryostat kann mit einem Druck von bis zu 0,3 MPa (absolut) beaufschlagt werden. Die Durchschlagtests wurden mit einem einzigen einstündigen Schritt begonnen. Dann wurden 15-minütige Spannungsschritte bei ansteigender Spannung bis zum Durchbruch durchgeführt. Bei einem Testlauf mit Heizerbetrieb wurden innerhalb jeder Spannungsstufe fünf Heizerimpulse mit einer Dauer von zehn Sekunden und einer Pause von drei Minuten durchgeführt.

Während der Durchschlagstests traten deutliche Ausreißer auf, aber alle Durchschläge traten oberhalb einer mittleren Feldstärke von 3,5 kV/mm auf. Mit steigender Spannung, sogar bis zu 325 kV, war keine deutliche Verringerung der mittleren Durchschlagfeldstärke



Abb. 4: Glocke-Platte-Anordnung zur Untersuchung des Durchschlagverhaltens in flüssigem Stickstoff (oben), Aufbau; des Testkryostaten im kryogenen Hochspannungslabor des ITEP (unten).

zu beobachten, was für das Hochspannungsdesign zukünftiger supraleitender Strombegrenzer äußerst wichtig ist. Die Hochspannungstests zeigten eine Verschlechterung der Durchschlagfestigkeit unter gesättigten Bedingungen von flüssigem Stickstoff im Fall der Gasblasenbildung.

Kontakt: mathias.noe@kit.edu

## Modellierung von Supraleitern und Komponenten

Im Rahmen des BMWi-Verbundprojekts **SupraGenSys** wurden Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (basierend auf der T-A-Formulierung) verwendet, um die Verluste in einem supraleitenden Generator einer Windkraftanlage zu bewerten. Das Modell erlaubt die Berechnung der zeitabhängigen Magnetfeldverteilung in der gesamten Maschine sowie die Berechnung der Details der Stromdichteentwicklung in den einzelnen supraleitenden Windungen (Abbildung 5). Das Modell wird derzeit zur Optimierung von Form und Anordnung der HTS-Statorspulen verwendet, um die Energiedissipation und die kryogene Belastung weiter zu reduzieren.

Die T-A-Formulierung wurde auch verwendet, um die Wechselstromverluste der supraleitenden Feldspulen in einem 10-MW-Doppelstator-Supraleiter-Flussmodulationsgenerator abzuschätzen. Bei dieser Art von Generatoren sind sowohl die supraleitenden Feldspulen als auch die Ankerwicklungen in zwei getrennten Statorn untergebracht, was eine bürstenlose Stromübertragung und eine stationäre Abdichtung für Kühlmittel ermöglicht. Wie sich zeigte, ist die Energiedissipation in den HTS-Spulen nicht sehr hoch, wenn ein geeigneter Abstand des Betriebsstroms zum kritischen Strom vorhanden ist, was sich durch eine Reduzierung entweder der Arbeitstemperatur oder des Betriebsstroms erreichen lässt. Allerdings sind die Wirbelstromverluste der thermischen Abschirmung aus Kupfer be-

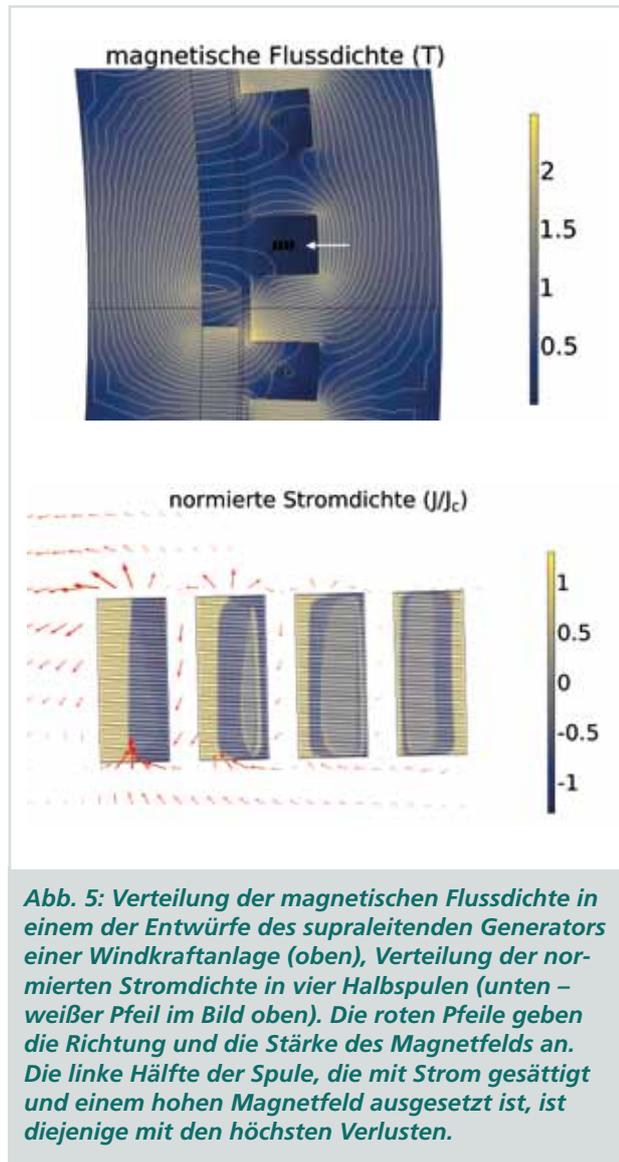
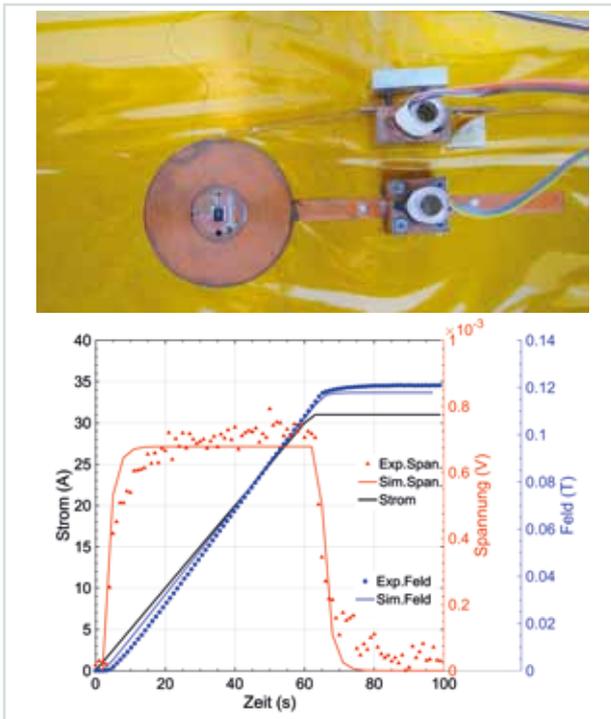


Abb. 5: Verteilung der magnetischen Flussdichte in einem der Entwürfe des supraleitenden Generators einer Windkraftanlage (oben), Verteilung der normierten Stromdichte in vier Halbspulen (unten – weißer Pfeil im Bild oben). Die roten Pfeile geben die Richtung und die Stärke des Magnetfelds an. Die linke Hälfte der Spule, die mit Strom gesättigt und einem hohen Magnetfeld ausgesetzt ist, ist diejenige mit den höchsten Verlusten.

trächtlich. Daher sollten sich künftige Arbeiten auf Methoden zur Verringerung der Wirbelstromverluste in der thermischen Abschirmung konzentrieren.

Die Einführung der **NI-Technik (No Insulation) für HTS-Spulen** gilt als einer der innovativsten Ansätze für die Entwicklung der Magnettechnologie. Ohne Isolierung zwischen benachbarten Lagen kann eine solche NI-Spule im Fall eines Quenchs dank des Vorhandenseins von Wendestrompfaden selbstschützend sein. Diese Strompfade zwischen benachbarten Lagen werden maßgeblich durch den spezifischen Kontaktwiderstand beeinflusst. In der Praxis ist es schwierig, diesen Kontaktwiderstand einer NI-Spule durch direkte Experimente an kurzen HTS-Drähten zu messen, da der spezifische Kontaktwiderstand supraleitender Bänder durch Oberflächenrauheit und -toleranz, Spannung, Temperatur etc. beeinflusst wird. Daher wurde ein verteiltes Schaltungsmodell verwendet, um den Kontaktwiderstand einer NI-Spule mit 157 Windungen in speziellen Experimenten zu untersuchen (Abbildung 6). Die Untersuchung ergab, dass der Kontaktwiderstand der NI-Spule eine inhomogene Verteilung aufweist und dass sich der aus der plötzlichen Entladung berechnete äquivalente Kontaktwiderstand nicht zuverlässig als Input für Simulationen zur Reproduktion experimenteller Daten verwenden lässt.



**Abb. 6: HTS-NI-Spule mit 157 Windungen (oben). Die Zuleitungen für die Stromeinspeisung sind ebenfalls sichtbar. Gesamtspannung und zentrales Magnetfeld mit einer Rampenrate von 0,5 A/s und einem spezifischen Kontaktwiderstand von  $90 \mu\Omega \text{ cm}^2$  (unten).**

In der **Internationalen Gemeinschaft für numerische Modellierung von HTS** nahm das ITEP an der Definition und dem Test eines Simulations-Benchmarks für einen HTS-Dynamo teil (2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 105009). Weiterhin entwickelte und verbreitete das ITEP ein **numerisches Open-Source-Modell**, um Studierende in die Berechnung von Wechselstromverlusten in Supraleitern einzuführen (2020 *Eur. J. Phys.* **41** 045203)

Kontakt: francesco.grilli@kit.edu

### Echtzeit-Systemintegration

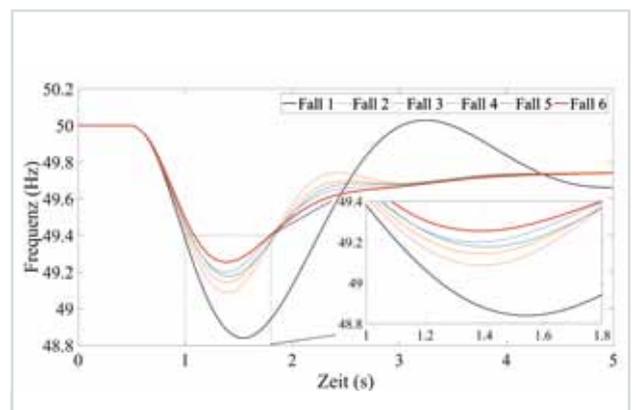
Zum Thema Echtzeit-Systemintegration entwickelte das ITEP 2020 seine Infrastruktur weiter und führte die ersten Experimente rund um Energiespeichersysteme, Sektorkopplung und Supraleiter durch. Das **1 MVA-Power-Hardware-in-the-Loop System (PHIL)** ist derzeit in Betrieb (Abbildung 7), wobei die Abnahmeprüfung der fünf Egston 200 kVA-Compiso-Leistungsverstärker unter verschiedenen Modi läuft – AC und DC, Reihen- und Parallelschaltung. Bei den Prüfungen werden die Hochspannungs-/Hochstromfähigkeiten der Verstärker validiert. Die Verstärkergruppe kann bis zu einer Spannung von 1,5 kVdc arbeiten und einen Strom von 650 A einspeisen; bei 150 Vdc können die Verstärker einen Strom von 4,5 kA kontinuierlich und einen Strom bis zu 6 kA kurzfristig einspeisen.

Eine erste realistische **PHIL-Validierung** wurde mit einem 60 kW-Hochgeschwindigkeits-Schwungrad der Firma Stornetic durchgeführt. Der CIGRE-Mikronetz-Benchmark wurde in den digitalen Echtzeitsimulator OPAL-RT implementiert, und das Schwungrad wurde



**Abb. 7: PHIL-Halle des Energy Lab 2.0**

über die Leistungsverstärker-Schnittstelle virtuell mit einer simulierten Sammelschiene verbunden. Zwei Testanwendungen wurden anvisiert. Zunächst wurde die Einhaltung der Niederspannungsnetzanschlussregeln VDE-AR-N-4105 verifiziert. Anschließend wurde die Leistung des Schwungrads bei der Bereitstellung von Dienstleistungen zur Unterstützung der Netzfrequenz bewertet. Bei der PHIL-Prüfung wurden mehrere Strategien zur Steuerung der Frequenzregelung in Mikronetzen in die Schwungradregler integriert. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, verbessert das Schwungrad das Management der Netzfrequenz und verringert sowohl die Frequenzableitung als auch die Abweichung vom Nennwert im Vergleich zu einem Basismodell ohne Schwungrad.



**Abb. 8: Unterstützung der Schwungradfrequenz in Mikronetzen für verschiedene Regler.**

Weitere Untersuchungen zur Frequenzregelung sind für 2021 innerhalb des BMWi-Verbundprojekts FlyGrid geplant. Ein 500 kW-5 kWh-superkondensator-basiertes System wird im Energy Lab 2.0 installiert und an das PHIL-Labor angeschlossen. Wichtigstes Ziel ist, die Leistungsfähigkeit der Superkondensator-Technologie bei der Bereitstellung kurzfristiger Frequenzregelung (unter fünf Sekunden) zu demonstrieren und sie mit der Schwungrad-Technologie für längere Frequenzregelungsstrategien (bis zu mehreren Minuten) zu vergleichen sowie zu integrieren.

Im BMBF-Verbundprojekt **SEKO** (Sektorkopplung) ging die Mikrogasturbine (Abbildung 9) in Betrieb,

gekoppelt mit einem Kühlsystem und einer Gasversorgung. Die Turbine hat 3 kW elektrische und 15 kW thermische Leistung; damit eignet sie sich für Haus-

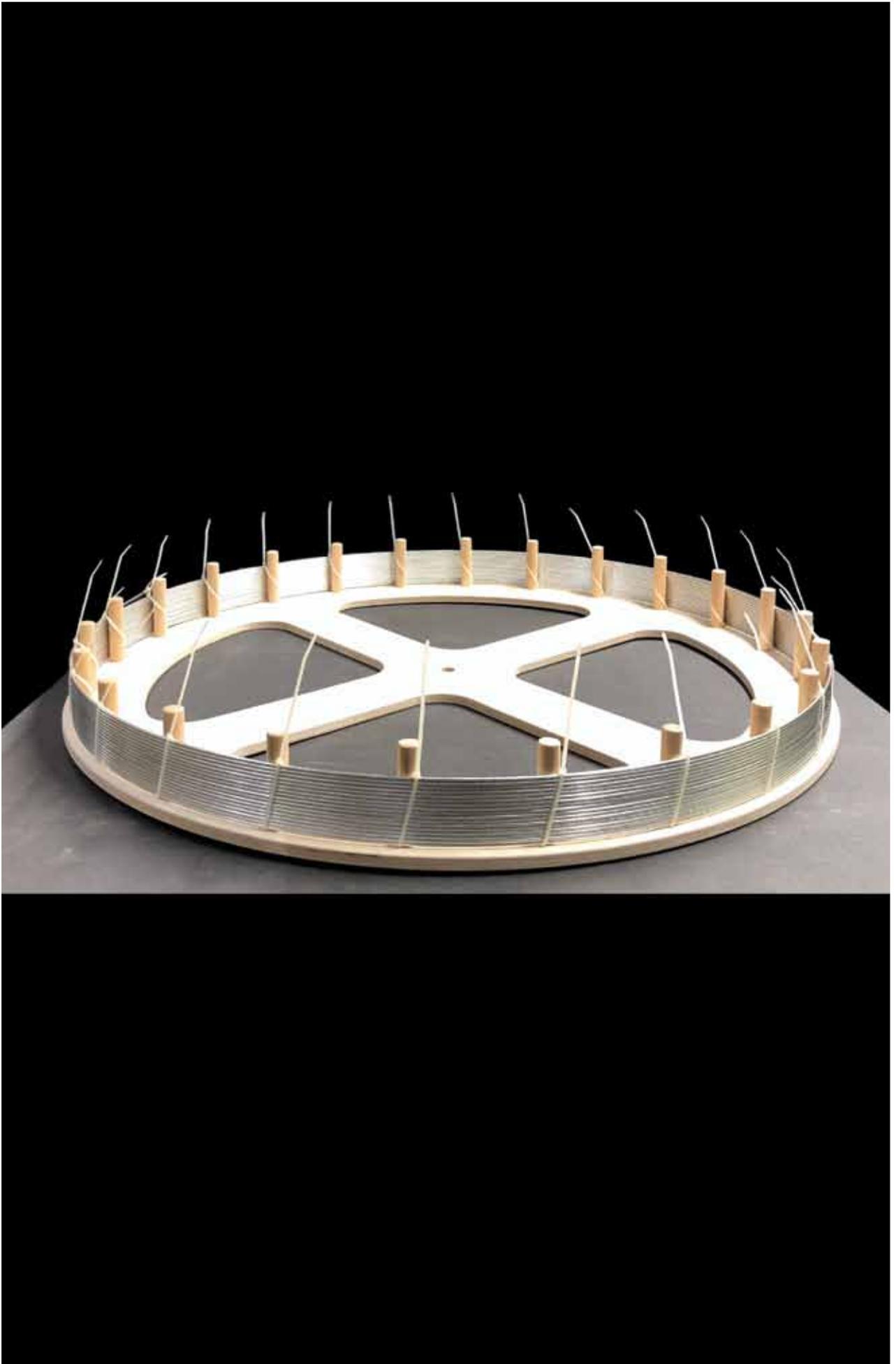


**Abb. 9: Versuchsaufbau der Mikrogasturbine**

haltsanwendungen. Bei ersten experimentellen Prüfungen wurde die Turbine mit variablen Leistungsvariationen in Amplitude und Frequenz beaufschlagt, um ihr dynamisches Verhalten zu beurteilen. Weitere Experimente liefen in Verbindung mit dem 15 kW-PHIL-Aufbau. Die gesammelten Daten werden derzeit zur Entwicklung eines Black-Box-Modells der Turbine für digitale Echtzeitsimulationsanwendungen verwendet. Parallel zum Black-Box-Modell wird 2021 ein detailliertes analytisches Modell des Systems fertiggestellt. Zusammen mit der Gasturbine wurde ein Blockheizkraftwerk (BHKW) mit 4 kW elektrischer und 15 kW thermischer Leistung gebaut und in Betrieb genommen. Die Leistungen des BHKW werden derzeit mithilfe des PHIL-Systems überprüft.

Im Bereich Supraleitung wurde die Modellierung von supraleitenden Kabeln für Echtzeitanwendungen optimiert. Neue Modelle wurden entwickelt, welche die erforderliche Ausführungszeit bei gleichbleibender Anfangsgenauigkeit reduzieren.

Kontakt: [giovanni.carne@kit.edu](mailto:giovanni.carne@kit.edu)



*53-Meter-Wickel eines HTS CroCos, gefertigt aus 3 mm/2 mm-REBCO-Bändern in einem kontinuierlichen Herstellungsprozess. Das Foto zeigt den Wickel mit 17 Windungen nach der Übertragung auf den Holzrahmen.*

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Supraleitende Magnettechnologie

*Koordination: Dr. Walter Fietz*

Das ITEP verfügt über langjährige Erfahrungen in den Bereichen Supraleitung sowie Bau und Test supraleitender Magnete. Auf der Basis des erworbenen Know-how haben sich im Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie folgende aktuelle Themen herausgebildet:

- Spulen- und Magnettechnologie
- HTS-Fusionsmagnete
- Rotierende Maschinen

Das Forschungsthema Spulen- und Magnettechnologie war 2019 neu ausgerichtet worden und zielt nun auf die Entwicklung von optimierten Technologien für Wicklungen, Spulen und Magnete. Dabei geht es vor allem um robotisches Wickeln mit folgender Vakuumimprägnierung sowie fortgeschrittene Kühltechnologien.

Das Forschungsthema HTS-Fusionsmagnete fokussiert aktuell die Entwicklung von HTS-Hochstromleitern sowie theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Quenchproblematik. Im Rahmen der Arbeiten wurde die Herstellung eines über 50 Meter langen HTS CroCos demonstriert, der zu einer Spule gewickelt wurde.

Im Forschungsthema Rotierende Maschinen modelliert und entwickelt das ITEP Komponenten elektrischer Maschinen basierend auf Supraleitertechnologie. Dazu gehören unter anderem Windturbinen, Antriebsmotoren für Schiffe und große Landfahrzeuge sowie Konzepte für das durch Supraleiter-Komponenten unterstützte elektrische Fliegen.

### Spulen- und Magnettechnologie

Im Forschungsthema Spulen- und Magnettechnologie hatten sich die Arbeiten bis 2019 auf supraleitende Hochfeldmagnete konzentriert. Seit der Neuausrichtung 2019 ist das Thema breiter aufgestellt und zielt darauf, relevante Technologien für das ganze Spektrum von Spulen, Wicklungen und Magneten zu entwickeln. Aktuelle Schwerpunkte liegen auf Konzeptarbeiten, robotischem Wickeln, funktionaler Vakuum-Druck-Imprägnierung sowie alternativen Kühlkonzepten, speziell der Ankopplung von Kryokühlern mit Thermosiphons.

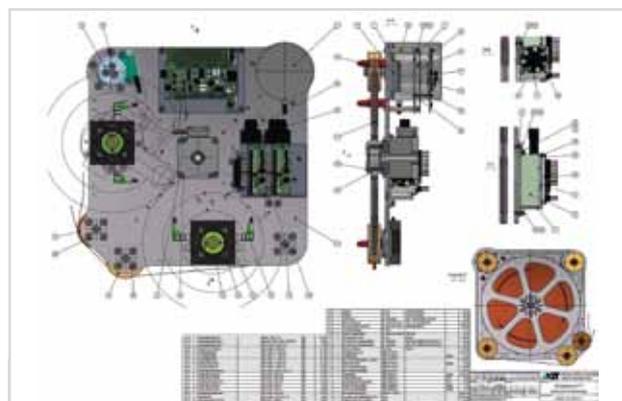
### Robotisches Wickeln

Weltweit steigt die Nachfrage von Laboren, Forschungseinrichtungen und – vor allem industriellen – Anwendern nach spezifischen HTS-Spulen, -Wicklungen und -Magneten. Die geforderten Geometrien werden zunehmend komplexer, bis hin zu echt dreidimensionalen Spulen. Für die Fertigung solcher aufwendiger Spulen konzipierte das ITEP eine **Wickelanlage**, bestehend aus zwei Industrierobotern und einem Positioniertisch der

Firma ABB. Der zu bewickelnde Spulenkörper wird vom dreh- und schwenkbaren Positioniertisch gehalten; die beiden Roboter verwickeln den Supraleiter. Zwei Roboter sind erforderlich, um umgreifen und durchgreifen zu können. Die Leiterführung selbst erfolgt mithilfe einer Wickelhand, die sich mit einem Schnellwechseladapter wechselweise an die Flansche der Roboter andocken lässt und den zu verwickelnden HTS in einer Vorratsspule mit sich führt. Da es sich um nicht-kollaborierende Roboter handelt, ist die Anlage aus Gründen der Arbeitssicherheit mit einer Schutzumhausung zu umgeben. 2020 konzipierte das ITEP die Roboterzelle, wählte die benötigten Komponenten aus und beschaffte diese und begann mit dem Aufbau. Abbildung 1 zeigt den fortgeschrittenen Aufbau der Anlage im Dezember 2020.



**Abb. 1: Fortgeschrittener Aufbau der Roboterzelle mit zwei Robotern, Positioniertisch und teilaufgebauter Schutzumhausung. Im Vordergrund ist die Steuerungselektronik der Roboter zu sehen.**



**Abb. 2: Konstruktionszeichnung der Wickelhand für das robotische Wickeln. Auf der Vorderseite (links) befinden sich Servomotor, Zugkraftsensor und Drehgeber mit zugehöriger Elektronik sowie die beiden Schnellwechseladapter; auf der Rückseite (rechts unten) befindet sich die HTS-Vorratsspule.**

Die scheibenförmige Wickelhand (Abbildung 2) dient zur Leiterführung beim Wickelprozess. Um eine definierte Wickelzugspannung zu gewährleisten, wird die HTS-Vorratsspule auf der Welle eines Servomotors montiert; dessen Zugkraft wird über einen Zugkraftsensor geregelt. Ein Drehgeber ermittelt die verwickelte Leiterlänge. 2020 wurde die Wickelhand konstruiert, alle benötigten Bauteile wurden beschafft. Derzeit wird die Wickelhand aufgebaut.

### Vakuum-Druck-Imprägnierung

Die Entwicklung neuartiger effektiver Wickeltechniken geht mit der Entwicklung neuer Imprägniertechnologien einher. Dazu beschaffte das Team eine **Vakuum-Druck-Imprägnier-Anlage** (VPI – vacuum pressure impregnation), bestehend aus einer Vakuum-Chargenmischkammer und einer Vakuum-Vergusskammer (Abbildung 3). In der Chargenmischkammer werden die Komponenten eines Vergussmaterials mithilfe eines Rührwerks entgast und homogen durchmischt. Der Verguss erfolgt unter Vakuum in die unterhalb der Chargenmischkammer gelegene Vergusskammer. Die aufbereitete Vergussmasse wird über ein Abgabeventil bei evakuierter Vergusskammer in das Wickelobjekt gefüllt. Die Vergusskammer hat eine Größe von 1 m x 1 m x 0,6 m, sodass auch große Objekte, wie beispielsweise Race-track-Wicklungen für Beschleuniger oder die Fusion, vergossen werden können.



Abb. 3: Neu beschaffte Vakuum-Druck-Imprägnier-Anlage.

Weiter befasste sich das ITEP mit einem Thermosiphon mit Kryokühler. Wicklungen aus metallischen Supraleitern werden wegen ihrer niedrigen Sprungtemperatur üblicherweise mit kryogenen Flüssigkeiten badgekühlt, in der Regel mit flüssigem Helium bei 4,2 K. HTS der zweiten Generation (REBCO) können zwar mit flüssigem Stickstoff bei 77 K gekühlt werden, aber dabei ist der Stabilitätsbereich der Supraleitung eingeschränkt – besonders in Anwesenheit von Magnetfeldern. Daher empfiehlt sich für REBCO-Spulen eine Betriebstemperatur unter 77 K, wie sie sich mit Kryokühlern bereitstellen lässt. Die Ankopplung des Kühlers an

das Objekt erfolgt meist über Wärmeleitung durch Massiv-Kupfer. Vorteilhafter ist allerdings die Ankopplung mit einem Thermosiphon, weil damit der Wärmetransport bei vergleichbaren Geometrien um etwa zwei Größenordnungen größer ist. Ein Thermosiphon ist in seiner einfachsten Ausführung ein Rohr oder Wellschlauch, in dem sich eine geringe Menge einer kryogenen Flüssigkeit befindetet, beispielsweise Neon mit einer Siedetemperatur von 27 K. Am warmen Ende, wo sich das zu kühlende Objekt befindet, verdampft das Neon und kondensiert wieder am kalten Ende, wo sich der Kaltkopf des Kryokühlers befindet. Mit diesem zirkulierenden Stoffstrom und den dabei auftretenden Phasenübergängen ist ein vergleichsweise großer Wärmetransport aus dem zu kühlenden Objekt verbunden. Zur Untersuchung dieses Kühlmechanismus erstellte das ITEP 2020 ein Konzept (Abbildung 4), plante einen entsprechenden Teststand und beschaffte die meisten der dafür benötigten Komponenten. Die Konstruktion des eigentlichen Thermosiphons in modularer Ausführung mit Evaporator, Kondensator und Verbindungsrohr ist weit fortgeschritten.

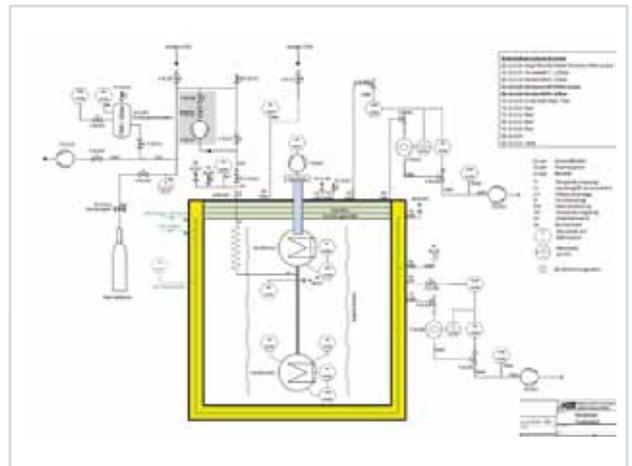


Abb. 4: Fließbild des geplanten Teststands zur Untersuchung des Thermosiphon-Kühlkonzepts.

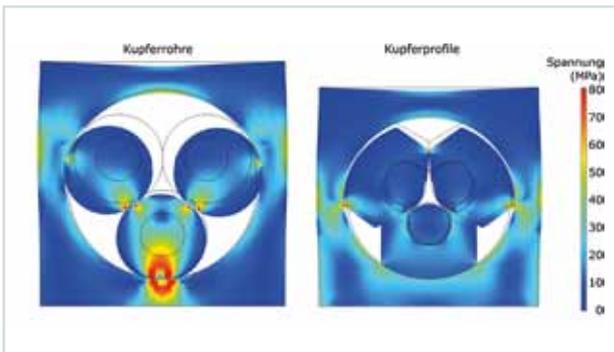
Kontakt: frank.hornung@kit.edu

### HTS-Fusionsmagnete

#### Entwicklung einer HTS-CroCo-Triplett-Probe für Quenchuntersuchungen

Für den Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) in zukünftigen Fusionsmagneten ist das Verhalten eines HTS-Fusionsleiters im Fehlerfall, dem sogenannten Quench, bei dem ein Stück des Leiters seine supraleitenden Eigenschaften verliert und dann einen endlichen elektrischen Widerstand aufweist, von besonderem Interesse. Anders als bei aktuell in Fusionsmagneten eingesetzten Tieftemperatur-Supraleitern (LTS) breitet sich eine solche resistive Zone in HTS nur langsam aus; es besteht die Gefahr, dass der HTS lokal überhitzt und zerstört wird. Daher werden derzeit in einem internationalen Projekt Proben basierend auf unterschiedlichen Leiterkonzepten designt und gefertigt, die dann in der Testeinrichtung SULTAN (Test Facility des Swiss Plasma Centers – SPC) unter für einen Fusionsmagneten relevanten Bedingungen getestet und gezielt gequench werden sollen.

Die bereits 2019 begonnenen Untersuchungen zum Bau einer kleinstmöglichen Probe aus drei verseilten HTS CroCos, als **HTS-CroCo-Triplett** bezeichnet, wurden 2020 weitergeführt, das Design der Probe wurde fertiggestellt, erste experimentelle Voruntersuchungen wurden vorgenommen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Designvarianten des Triplett-Kabels untersucht; sie unterscheiden sich in der Art des Hinzufügens von zusätzlichem Kupfer zum eigentlichen supraleitenden Teil, dem HTS CroCo. In der ersten Variante ist der HTS CroCo ringsum von einem Kupferrohr umhüllt, in der zweiten Variante ist der HTS CroCo in ein Kupferprofilstück eingelötet.

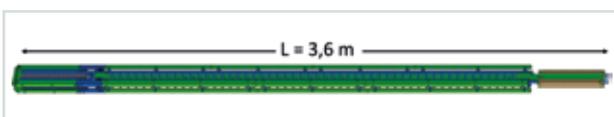


**Abb. 5: Spannungsverteilung bei Raumtemperatur und unter Lorentzkräften von 180 kN/m in den beiden Designvarianten der HTS CroCo Triplett-Proben für Quenchuntersuchungen**

Die hohen Ströme und Magnetfelder in einem Fusionsmagneten führen zu hohen Lorentzkräften. Zur Verteilung der mechanischen Spannungen in den beiden Designvarianten bei 180 kN/m, resultierend aus 15 kA bei 12 T, wurden Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Diese zeigen deutlich geringere Spannungen im Supraleiter für die Profilvariante, wie in Abbildung 5 besonders für den unteren Leiter des Triplett zu sehen ist.

Da zudem numerische Berechnungen des Quenchverhaltens 2019 gezeigt hatten, dass das Design mit Kupferprofilen auch im Quenchfall vorteilhafte Eigenschaften aufweist, wurde entschieden, ausschließlich dieses Design in der Probe zu realisieren.

Neben diesen konzeptionellen Untersuchungen des zu erwartenden Verhaltens der Probe bei Testbedingungen wurde das mechanische Design der Probe fertiggestellt. Analysen zum Wärmeübergang im Quenchfall zwischen Kupfer-Kupfer- bzw. Kupfer-Stahl-Kontaktflächen unter variablem Anpressdruck werden derzeit vorbereitet. Die Probengeometrie ist durch die Anlage festgelegt und besteht aus einer haarnadelförmigen Leiteranordnung in einem ca. 9 cm x 14 cm großen Querschnitt auf einer Länge von 3,6 Metern. Beide elektrischen

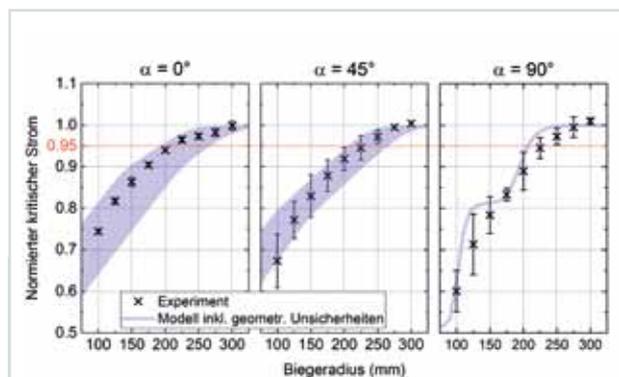


**Abb. 6: Übersicht der kompletten HTS-CroCo-Probe für Quenchuntersuchungen. Der elektrische Anschluss befindet sich auf der rechten Seite. Beide Leiter der Probe werden von überkritischem Helium von links nach rechts durchströmt.**

schlen Anschlüsse befinden sich am oberen Probenende. Die Probe ist unten elektrisch verbunden, was effektiv zu einer elektrischen Serienschaltung führt, wohingegen beide Leiter durch separate hydraulische Leitungen gekühlt werden, gegebenenfalls auch bei unterschiedlicher Temperatur. Das Probendesign sieht Edelstahl-Halbschalen zur mechanischen Stabilisierung des Supraleiters mit eingesetzten Kupferteilen an den benötigten Anschlussstellen vor. Beide Leiter werden von einem Klammergerüst gegen die wirkenden Lorentzkräfte stabilisiert. Die Ausbreitung des Quenchs soll sowohl elektrisch durch eine Messung des Verlaufs der elektrischen Spannung entlang der Probe als auch anhand der resultierenden Erwärmung unterschiedlicher Teile der Probe (HTS CroCo, Helium, Stahlmantel) mithilfe verschiedener Messtechniken bestimmt werden. Dies ermöglicht den Vergleich mit der bereits erfolgten thermohydraulischen Modellierung und soll bei Bedarf der Verfeinerung des Modells dienen, um in Zukunft das Verhalten von HTS-Fusionsmagneten mit größerer Sicherheit vorherzusagen. Abbildung 6 zeigt eine Übersicht des entwickelten Probendesigns.

### Biegeeigenschaften von HTS CroCos

Für die Auslegung von Kabeln für Fusionsmagnete basierend auf dem HTS-CroCo-Konzept ist die Kenntnis der einzuhaltenden minimalen **Biegeradien** der individuellen HTS CroCos essenziell. Daher lief im Rahmen einer Masterarbeit eine kombinierte Studie zum Verhalten von HTS-CroCo-Leitern bei Biegung auf unterschiedliche Radien. Die Studie befasste sich mit dem Verhalten von HTS-CroCo-Leitern experimentell durch Messungen des kritischen Stroms bei  $T = 77$  K und Biegeradien von 100 mm bis 300 mm. Zudem entwickelte sie ein mechanisches Modell, welches das Degradationsverhalten basierend auf dem Degradationsverhalten der im HTS CroCo verwendeten Supraleiter und der Probengeometrie sowie geometrischer Fertigungstoleranzen beschreibt. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Studie. In den Schaubildern wurde für drei Biegerichtungen der normierte kritische Strom über den Biegeradius aufgetragen. Die Biegerichtung wird anhand des Winkels zwischen Band- und Biegeebene definiert. Im Fall  $\alpha = 0^\circ$  (Abbildung 7 links) liegen die Bandebenen parallel zur Biegeebene, bei  $\alpha = 90^\circ$  stehen sie senkrecht zueinander. Als Kriterium für die Degradation des Supraleiters wurde die Abnahme des kritischen Stroms um 5 % festgelegt (rote Linie in Abbildung 7).



**Abb. 7: Abhängigkeit des kritischen Stroms von HTS CroCos als Funktion des Biegeradius für verschiedene Ausrichtungen der HTS-Bänder zur Biegeebene.**

Unter Anwendung dieses Kriteriums lässt sich ein tolerierbarer Biegeradius von etwa 250 mm ermitteln, welcher nahezu unabhängig von den untersuchten Biegerichtungen ist. In allen Fällen zeigt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen dem entwickelten Modell und den experimentellen Resultaten. In allen Fällen zeigt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen dem entwickelten Modell und den experimentellen Resultaten.

Kontakt: michael.wolf@kit.edu

## HTS-CroCo-Fertigung in langen Längen

In den Jahren 2018/19 hatte ein KIT Technologietransfer-Vorprojekt die Basis dafür geschaffen, HTS CroCos aus 2 mm und 3 mm Cu- und HTS-Band direkt von den Vorratsspulen auf eine **Aufnehmertrommel** mit 100 cm Durchmesser zu ziehen. 2020 wurde demonstriert, dass diese Technik auch für lange Fabrikationslängen geeignet ist. Um die Kosten zu begrenzen, wurden statt einer vollen Bestückung mit HTS-Bändern lediglich zwei HTS-Bänder (in Abbildung 8 grün dargestellt) in 3 mm und zwei HTS-Bänder in 2 mm Breite in der in Abbildung 8 dargestellten Konfiguration verwendet. Bei einem voll bestückten HTS CroCo würden alle 0,1 mm starken Cu-Bänder (braun) durch HTS Bänder ersetzt werden, die mit ihrer supraleitenden Seite zum jeweils zentralen 0,2 mm dicken Cu-Band (rot) zeigen würden.

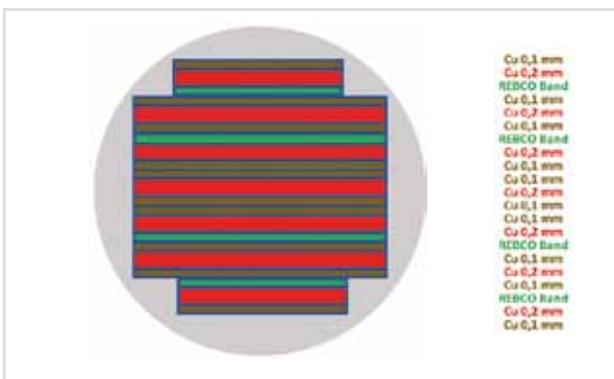


Abb. 8: Aufbau des HTS CroCos, der teilweise mit HTS-REBCO-Bändern bestückt war.

Obwohl eines der 2 mm-Bänder nur als ca. 47 Meter langes Band verfügbar war, wurde es bei der Bestückung verwendet. Damit ließ sich ermitteln, ob der CroCo Ziehprozess gestört werden würde, beispielsweise durch das Reißen eines HTS-Bands. Die Simulation ergab, dass das kürzere 2 mm-Band den Ziehprozess nicht beeinträchtigte. Das heißt, der Ziehprozess wurde durch den Übergang von 21 auf 20 Bänder nicht beeinträchtigt. Abbildung 9 zeigt die Trommel, die einen Durchmesser von einem Meter aufweist, während der Herstellung des HTS-CroCo-Wickels.

Für die weiteren Messungen wurde derjenige Bereich abgetrennt, in dem nur drei HTS-Bänder vorhanden waren, sodass noch eine Windungslänge von ca. 42 Metern vorhanden war, wie Abbildung 10 zeigt.

Erste Messungen über die komplette Leiterlänge schienen die erwartete Performance zu betätigen, wobei



Abb. 9: Aufnehmertrommel mit den ersten 14 Windungen des HTS CroCos während der Herstellung des Wickels.



Abb. 10: Wickel mit 14 Windungen mit Stromzuleitung und Spannungsabgriffen.

allerdings bei schnelleren Stromrampen Relaxationseffekte auftraten. Aber es zeigte sich schnell, dass dies eine Folge der fehlenden Isolation zwischen den einzelnen Windungen war. Daher wurde die Messung mit isolierten Windungen wiederholt (vergleiche High-light).

Kontakt: michael.wolf@kit.edu

## Rotierende Maschinen

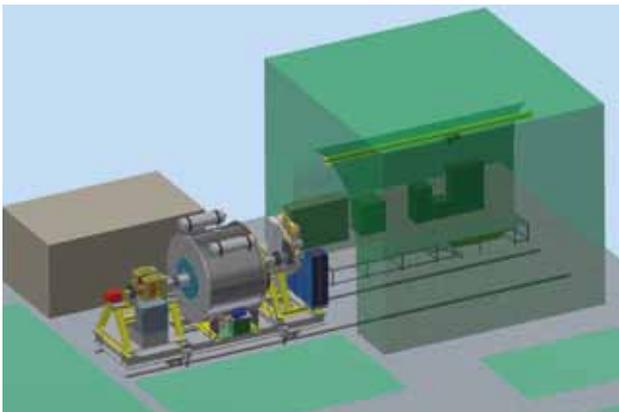
In der Luftfahrtbranche laufen die internationalen Forschungsarbeiten zu rotierenden Maschinen trotz der aktuellen durch die Corona-Pandemie bedingten wirtschaftlichen Schwierigkeiten weiter. Die Vorteile von supraleitenden Maschinen im Leistung-zu-Gewicht-Verhältnis zeigen sich deutlich für Generatoren großer Umdrehungsgeschwindigkeiten, beispielsweise der 10 MW-Klasse, sowie für schnelldrehende Antriebsmotoren, typischerweise der 1 MW-Klasse. Für den Einsatz von Generatoren in (Offshore-) Windturbinen stehen zwar geringere

Umdrehungsgeschwindigkeiten, dafür aber größere Polzahlen im Vordergrund. Das ITEP ist mit Forschungsprojekten für beide Anwendungsbereiche betraut.

Als weitere mögliche Anwendungen zeichnen sich mittelfristig auch Wasserkraftgeneratoren sowie – angeregt unter anderem durch die deutschlandweit erstarkten Wasserstoff-Bestrebungen – Antriebsmotoren für Schiffe und große Landfahrzeuge ab. Zu diesen möglichen Anwendungen leistet das ITEP Erstberatungen; die Aktivitäten laufen 2021 voraussichtlich in Projekten und Beauftragungen weiter.

### Teststand für hochtemperatur-supraleitende Rotoren

2020 startete das Projekt **HTS-Geno Testrig**. Einige kritische, bereits entwickelte Komponenten wurden beschafft. 2021 beginnen die technischen Projektarbeiten. Dieses Vorhaben zielt darauf, einen Teststand für große – Durchmesser bis ca. ein Meter – hochoberige rotierende Komponenten von elektrischen Maschinen basierend auf Supraleitertechnologie zu errichten. Aufgrund der großen kinetischen Energie der rotierenden Teile wird dieses Testrig (Abbildung 11) in einem Schleuderbunker aufgebaut.



**Abb. 11:** CAD-Darstellung des Testrigs für kalte Rotorkomponenten basierend auf Supraleitertechnologie. Der zylindrische Vakuumbehälter hat einen Durchmesser von ca. zwei Metern.

### Supraleitende Generatoren für Windturbinen

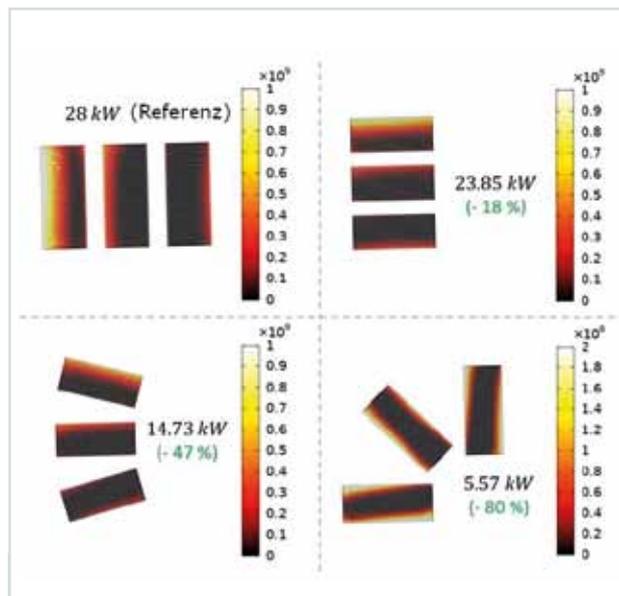
Generatoren für den Einsatz in Offshore-Windkraftanlagen müssen robust, leicht, effizient und zuverlässig in der Leistungsklasse 10 MW+ sein – möglichst direkt angetrieben, um wartungsintensive Getriebe zu vermeiden. Die hohen Stromdichten der Supraleiter ermöglichen kompakte und leichte Maschinen. Allerdings 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 erlaubt, ohne kalte Rotationsdurchführung. Deshalb entwarf das ITEP im Projekt **SuperWind** in enger Kooperation mit den Partnern ein supraleitendes Statorsystem, das 2020 auch aufgebaut wurde. Mit dem Ziel einer großen elektrischen Stabilität wurden die supraleitenden Spulen in der nicht-isolierten Wickeltechnik realisiert.

Das Spulensystem (Abbildung 12) wurde erfolgreich in flüssigem Stickstoff elektrisch getestet. Der Test des gesamten Statorsystems bei Temperaturen unterhalb von 77 K steht noch aus.



**Abb. 12:** Offenes Statorsystem für einen Windkraftgenerator im Projekt SuperWind.

Ein zweites Windenergie-Projekt unter dem Titel **SupraGenSys** startete ausgehend von der Arbeitshypothese, dass für große Offshore-Windkraftanlagen und ihre Generatoren ein voll supraleitendes Maschinen-Design besonders vorteilhaft ist. Dementsprechend untersuchte das ITEP verschiedene Maschinenkonzepte mit den Partnern.



**Abb. 13:** Varianten einer Statorwicklung. Gegenüber der Referenzanordnung lassen sich die AC-Verluste durch geeignete Platzierung der Wickelpakete in der Ständernut um 18 Prozent, 47 Prozent oder 80 Prozent reduzieren.

Da besonders die Supraleiter in der Statorwicklung zum einen aus den elektromagnetischen Anforderungen heraus ganz spezifisch konfektioniert, zum anderen zur Reduktion der AC-Verluste (Hysterese-, Kupplungs- und Rückwirkungsverluste sowie dynamische Verluste) gezielt platziert werden müssen, wurden erhebliche Entwicklungsanstrengungen unternommen, um beide Ansprüche zu vereinen. Dabei zeigte sich, dass die AC-Verluste durch eine geschickte Konfiguration stark reduziert werden können (Abbildung 13).

### Supraleitende Motoren für das elektrische Fliegen

Auch Antriebsmotoren für Flugzeuge können von einem voll supraleitenden Design profitieren. Im Rahmen des Projekts **ASuMED** entwickelte und baute das ITEP mit den Partnern einen solchen Motor, der auch die Ansprüche von großen zivilen Flugzeugen bezüglich Leistung-zu-Gewicht-Verhältnis und Effizienz erfüllt (Abbildung 14). Damit scheinen die Emissionsziele der Roadmap Flightpath 2050 erreichbar.

Die Beiträge des ITEP zu diesem Projekt waren:

- Charakterisierung der HTS-Drähte und Messungen des kritischen Stroms bei unterschiedlichen Temperaturen, Magnetfeldern und Ausrichtungen
- Entwicklung von numerischen Modellen zur AC-Verlust-Berechnung im Stator für die Optimierung der Stator-Topologie
- Numerische Simulation und Bewertung der Entmagnetisierung der anstelle konventioneller Permanentmagnete verwendeten HTS-Stapel im Rotor

- Die finalen Aktivitäten unterstützten im Wesentlichen die Publikations- und Transferarbeit des Projektkonsortiums und die Weiterentwicklung der Modelle.



**Abb. 14: Motor mit Gondel und Fan für Verkehrsflugzeuge mit verteilten Antrieben (1 MW, 6000 Upm, 1:1 Mockup).**

Kontakt: [tabea.arndt@kit.edu](mailto:tabea.arndt@kit.edu)

## Highlight: Spule aus einem HTS CroCo aus 3 mm- und 2 mm-REBCO Bändern

Nach der Isolation der einzelnen Windungen wurde die einlagige HTS-CroCo-Spule in Flüssigstickstoff bei  $T = 77$  K gemessen. Abbildung 15 zeigt die isolierte HTS-CroCo-Spule aus 42 Metern HTS CroCo in 13,75 Windungen mit einem Durchmesser von 97 cm. Dabei wurde der Spannungsabfall über jede Windung (W1 bis W13) und zusätzlich über eine Dreiviertelwindung (W0) gemessen. Die Spannungsabgriffe für W1 bis W13 und der negative Stromanschluss sind in Abbildung 15 im Vordergrund zu sehen.

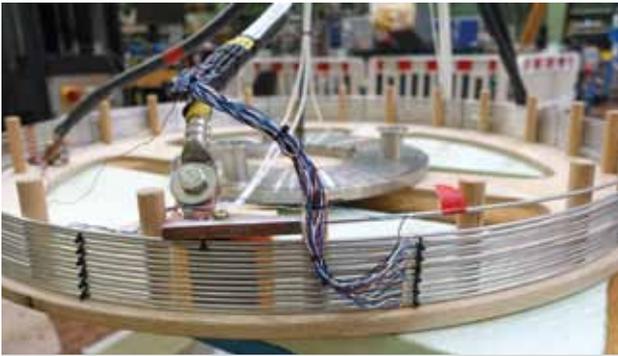


Abb. 15: Einlagige, isolierte Spule aus 42 Metern HTS CroCo vor dem Einbau in die Testeinrichtung zur Messung bei  $T = 77$  K. Im Vordergrund sind ein Stromanschluss und die Instrumentierung zu sehen. Die Spannung wurde entlang jeder einzelnen Windung separat gemessen.

Die magnetische Flussdichte dieser Spulenordnung wurde berechnet und ist in Abbildung 16 dargestellt. (a) zeigt den Betrag der Flussdichte und die Flusslinien für die komplette Spule, in (b) ist die Normalkomponente der Flussdichte relativ zur Orientierung der HTS-Bänder für die obere Hälfte der Spule geplottet. Ihr Mittelwert pro Band nimmt von der Spulenmitte zum Rand kontinuierlich zu. Da der kritische Strom der verwendeten HTS-Bänder mit zunehmender Flussdichte abnimmt, ist für die äußeren Windungen ein kleinerer kritischer Strom als im Spulenzentrum zu erwarten.

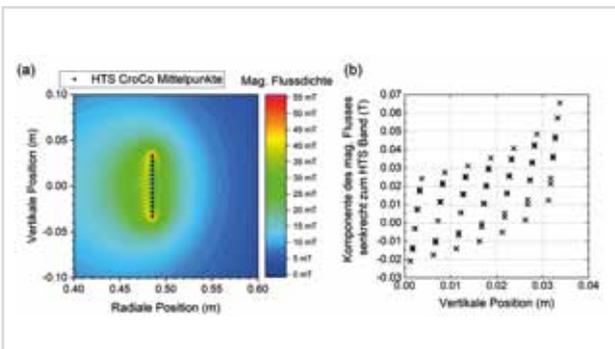


Abb. 16: Berechnete Feldgeometrie und Flussdichteverteilung in der Nähe der HTS-CroCo-Leiter (a). Normalkomponente der Flussdichte relativ zur Orientierung der HTS Bänder (b).

Abbildung 17(a) zeigt eine schematische Skizze der HTS-CroCo-Spule und ihrer Instrumentierung; Farben und Linienstile entsprechen den Linien in Abb. 17(c). Gleiche Farben entsprechen einem gleichem Abstand

der Wicklung von der Spulenmitte. In Abbildung 17(b) ist das elektrische Feld entlang aller 13,75 Windungen als Funktion des Spulenstroms bei einer Stromrampe mit 1 A/s aufgetragen. Die horizontale rote Linie markiert das Kriterium zur Bestimmung des kritischen Stroms, der auf diese Weise zu 305 A in guter Übereinstimmung mit den Erwartungen bestimmt wurde. Analog wurden die kritischen Ströme der einzelnen Windungen bestimmt und in Abbildung 17(c) aufgetragen. Zu beobachten ist eine Abnahme des kritischen Stroms der äußeren drei Windungen, was auf die höhere Feldkomponente senkrecht zu den HTS-Bändern am Rand der Spule (vergleiche Abbildung 16) zurückzuführen ist. Zusätzlich sind eine Reduktion des kritischen Stroms in Windung 6 und eine deutliche Verrundung des Überganges von der Supraleitung zur Normalleitung in dieser Windung zu sehen; dies ist höchstwahrscheinlich auf eine Degradation eines der vier Supraleiterbänder in dieser Windung zurückzuführen. Genauere Analysen dieser Windung werden derzeit vorbereitet.

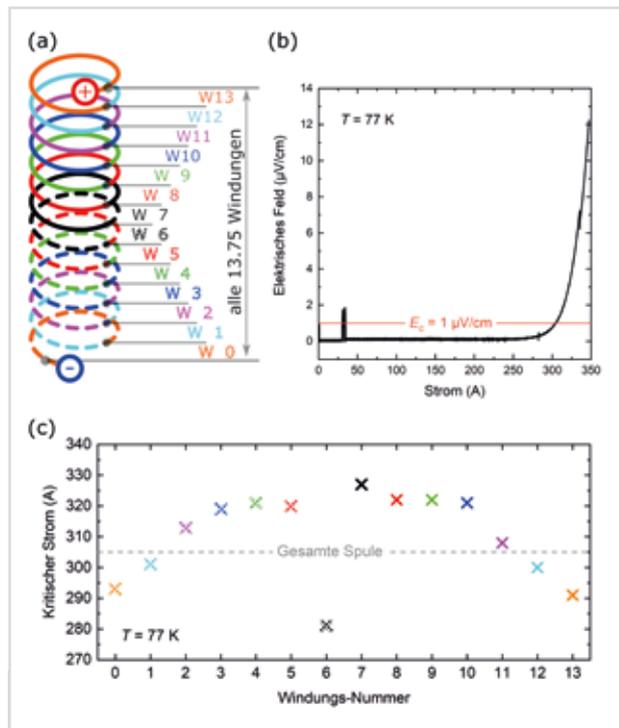


Abb. 17: Messergebnisse der einlagigen HTS-CroCo-Spule im Flüssigstickstoffbad ( $T = 77$  K). Schematischer Aufbau der Spule und ihrer Instrumentierung (a). Die oberen sieben Windungen sind durch durchgezogene, die unteren 6,75 Windungen durch unterbrochene Symbole in (c) dargestellt. Gleiche Farben entsprechen gleichem Abstand der Wicklung von der Spulenmitte. Elektrisches Feld entlang der einzelnen Windungen als Funktion des Spulenstroms (b). Kritischer Strom der einzelnen Windungen (c).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der kontinuierliche Wickelprozess erfolgreich war. Abgesehen von der Länge der supraleitenden Bänder gibt es keine Längenbegrenzung des Prozesses. Das heißt, auch Spulen mit einer Leiterlänge von mehreren Hundert Metern wären herstellbar.

Kontakt: michael.wolf@kit.edu



Arbeiten am offenen Quecksilber in großem Maßstab.

# Ergebnisse aus den Forschungsbereichen

## Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes

*Koordination: Dr. Christian Day*

Im Forschungsfeld Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs entwickelt das ITEP 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: Materieinjektion, Vakuumtechnik und Tritiumtechnologie. Die am ITEP entwickelte neue Architektur des Brennstoffkreislaufs sieht drei Teilkreisläufe vor: Der erste Teilkreislauf 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 Tritiumanlage. Beim dritten Teilkreislauf schließlich handelt es sich um den mit Kryodestillation und Wasserdetrithierung ausgerüsteten Umlauf, der die verbleibenden Wasserstoff-Isotopologie in die reinen Wasserstoff-Isotope überführt, um sie dann abzuspeichern oder an die anderen Kreisläufe abzugeben.

Vor diesem Hintergrund haben sich im Forschungsfeld die folgenden aktuellen Forschungsthemen herausgebildet:

- Vakuumtechnologie und Prozessintegration
- Strömung verdünnter Gase
- Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation

Diese Arbeiten sind fest im Europäischen Fusionsprogramm **EUROfusion** verankert. Als Highlight schloss das ITEP 2020 das vorkonzeptionelle Design erfolgreich ab. Damit tritt das Projekt in die nächste Phase ein, die im neuen EU-Forschungsrahmenprogramm für die Zeit von 2021 bis 2027 angesetzt ist.

2020 war ein besonderes Jahr. Trotz der speziellen Bedingungen der Corona-Pandemie erzielte das ITEP wie jedes Jahr äußerst beeindruckende Ergebnisse, auch und besonders in Experimenten. Zu verdanken ist dies nicht nur dem außergewöhnlichen Engagement der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, sondern auch dem vorbildlichen Einsatz des Technikerteams. Das Institut ist stolz darauf, dass sich dieser Teamgeist auch in schwierigen Zeiten bewährt hat.

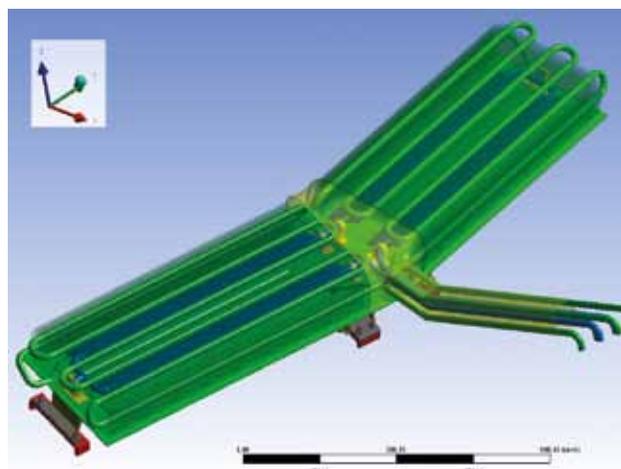
### Vakuumtechnologie und Prozessintegration

Das Forschungsthema Vakuumtechnologie und Prozessintegration adressiert alle vakuumtechnischen Fragen rund um eine Fusionsanlage und entwickelt einen integrativen Ansatz für ihre Beschreibung mithilfe eines

Brennstoffkreislaufsimulators. Die Aktivitäten gehen über die Entwicklung der für die entsprechenden Teilsysteme des Brennstoffkreislaufs relevanten Technologien hinaus und erstrecken sich auch auf die Vakuumsysteme außerhalb des klassischen Brennstoffkreislaufs, beispielsweise die Plasmakammer mit Ausgasung und Gasspeicherung. Die Arbeiten decken auch Vakuumtechnologien für andere Großanlagen in der Fusion ab, wie für die europäische Neutronenquelle IFMIF-DONES oder den derzeit gebauten Fusionsreaktor JT-60SA in Japan.

Der Bereich Vakuumtechnik des ITEP arbeitet seit vielen Jahren mit dem Team des Tokamak **JT-60SA** zusammen, der 2021 in Betrieb geht. Nach einer ersten Experimentierkampagne wird die Maschine 2022 wieder geöffnet und mit weiteren Einbauten komplettiert werden. Dazu gehört ein leistungsfähiges Kryopumpensystem, das direkt in den Divertor integriert werden wird. Das ITEP wurde beauftragt, dafür das komplette Design zu entwickeln. 2020 wurde das Design abgeschlossen und schließlich zur Herstellung ausgeschrieben. Damit endete eine langjährige enge Zusammenarbeit mit dem japanischen Team. Ab 2012 war das ITEP in einem EU-JT-60SA Research Team eng an der Entstehung des Forschungsplans beteiligt. Über die Jahre begleitete es viele technologische Aufgaben, nicht nur zu Vakuumsystemen, sondern auch zur Materieinjektion, zur Divertorphysik, zur Diagnostik und zur Kryotechnik.

Abbildung 1 zeigt das finale Design der Kryopumpe, das dem am Institut entwickelten bewährten Kryosorptionspumpenkonzept folgt: Die Kryoflächen sind modular aus hydrogeformten Panels (blau) aufgebaut, zwei Stück pro Pumpenflügel. Abbildung 2 illustriert die Einbausituation.



**Abb. 1: Design der Kryopumpe für JT-60SA.**

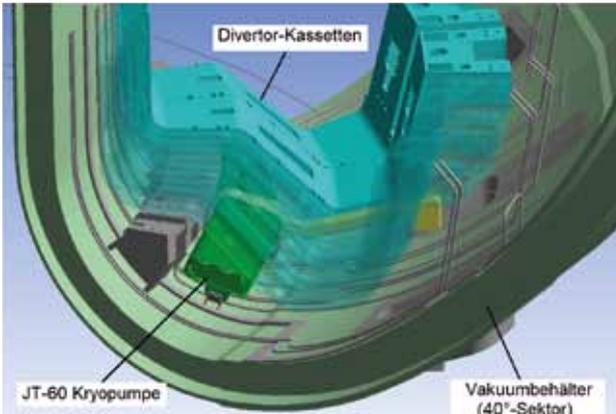


Abb. 2: Ansicht der Einbausituation einer Kryopumpe von neun für das Plasmagefäß von JT-60SA.

Bei der Auslegung der Pumpe waren äußerst komplexe Lastfallkombinationen zu berücksichtigen – zum einen thermische Spannungen infolge der Fixpunkte an der Behälterwand bei Raumtemperatur und den kryogenen Flächen bei 80 K bzw. 3,7 K, zum anderen starke elektromagnetische Kräfte, die im Fall von Plasmadisruptionen auf die innerhalb des Plasmagefäßes eingebauten Pumpen einwirken. Schließlich waren auch noch mögliche seismische Ereignisse im erdbebengefährdeten Japan zu berücksichtigen.

Für die Materialtestanlage **IFMIF-DONES**, die in Granada/Spainien gebaut werden wird, führte das ITEP umfangreiche Vakuummodellierungen aus. DONES ist ein Beschleuniger, der an einem Flüssiglithium-Target ein fusionstypisches Neutronenspektrum erzeugt, mit dem sich Materialien für Anwendungen in der Fusion prüfen lassen. Rechnungen des ITEP zeigten, welches Druckprofil längs der 90 Meter langen Anlage zu erwarten ist (Abbildung 3). Zudem wurde klar, woher die Hauptbeiträge zu den Drücken kommen, nämlich von Strahlverlusten in den ersten drei Systemen, durch Ausgasung im eigentlichen Beschleunigerteil (Linac) und durch die Argon-Gasinjektion im Anlagenteil Richtung Target. Letztgenanntes ist erforderlich, um eine Verdampfung des Lithiums an der frei fließenden Oberfläche zu unterdrücken. Überdies gelangten die Rechnungen zu dem wichtigen Ergebnis, dass der Totaldruck im Linac zu hoch ist – notwendig ist ein Druck von höchstens  $5 \cdot 10^{-8}$  mbar. Da sich das Saugvermögen aus Platzgründen

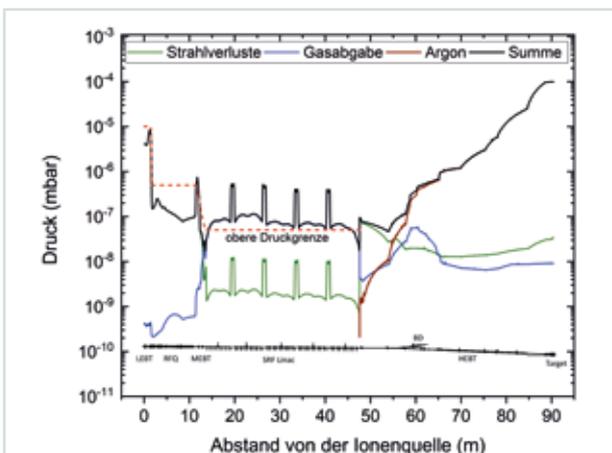


Abb. 3: Druckprofil am IFMIF-DONES Beschleuniger.

nicht wesentlich steigern lässt, muss die Gasabgaberate, die derzeit mit etwa  $4 \cdot 10^{-11}$  mbar·l/s·cm<sup>2</sup> und damit bereits relativ gering angenommen wurde, noch beträchtlich weiter reduziert werden. Dies wird wahrscheinlich einen aufwendigen Konditionierungsschritt der Module vor dem Einbau erfordern, denn ein Ausheizen in situ wird nicht machbar sein.

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. Darauf aufbauend wurde 2020 eine Testpumpe mit mehr als 4 600 Einzelscheiben gebaut, in der Versuchsanlage TIMO installiert, in Betrieb genommen und parametrisch vermessen.

Abbildung 4 illustriert beispielhaft den festgestellten Einfluss der Gettertemperatur auf das Saugvermögen und den Einfluss verschiedener Regenerationstemperaturen. Damit ließ sich der Trend quantifizieren, dass höhere Temperaturen zu besserem Pumpverhalten führen. Darüber hinaus wurde der Isotopieeffekt zwischen H<sub>2</sub> und D<sub>2</sub> extrahiert (Abbildung 5).

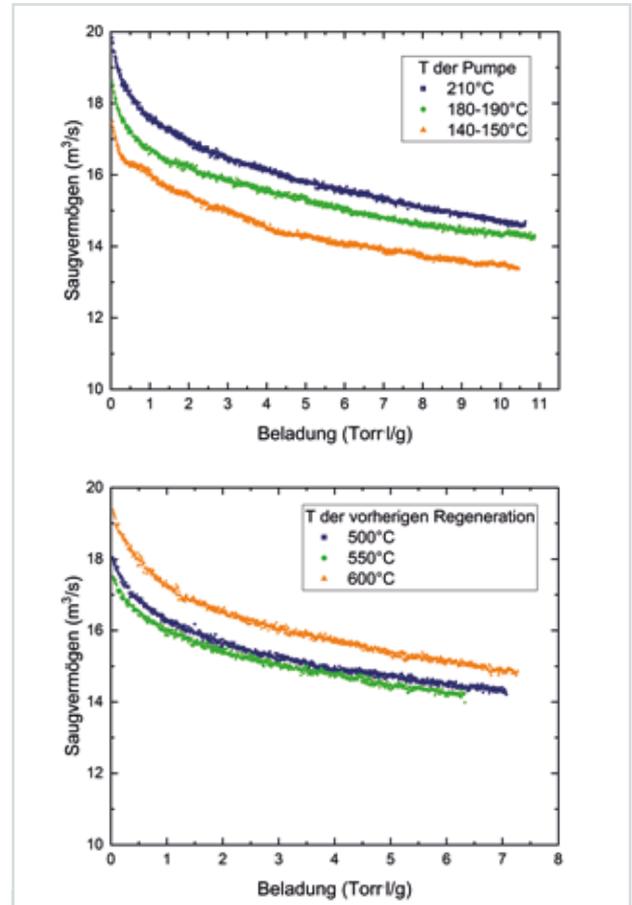


Abb. 4: Einfluss der Gettertemperatur auf das Saugvermögen für H<sub>2</sub>: während des Pumpens (oben) und im Regenerationsschritt vor dem Pumpen (unten).

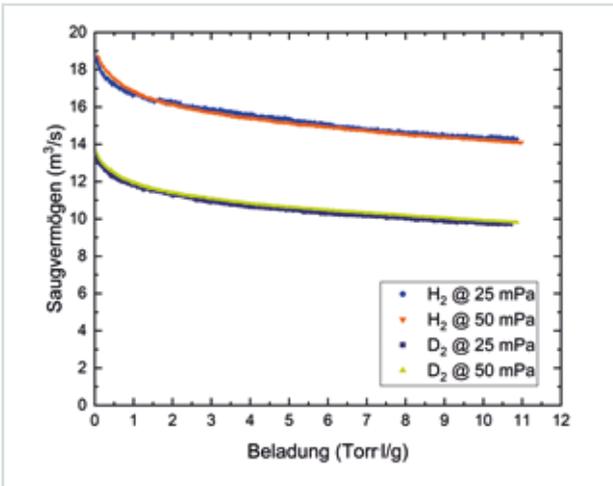


Abb. 5: Isotopenabhängigkeit des Saugvermögens für Wasserstoff, im Vergleich bei jeweils zwei Drücken.

Ein wichtiger Zusammenhang, der sich nun auf Tritium und die anderen Wasserstoff-Isotopologe extrapolieren lässt.

Schließlich wurden die Arbeiten für die neue Fusionsmaschine DTT in Italien weiter fortgesetzt. Die Auslegung der Divertorvakuumssysteme von DTT wird in den nächsten Jahren ein neuer Arbeitsschwerpunkt im Bereich Vakuumtechnik werden.

Kontakt: christian.day@kit.edu

## Strömung verdünnter Gase

Zur korrekten Auslegung von komplexen Vakuumssystemen 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. Allerdings ist die Lösung dieser Gleichung für realistische Anwendungen (3D, komplexe Geometrien, Gasmischungen) ausgesprochen aufwendig. Der Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP verfolgt dazu zwei verschiedene Ansätze: zum einen mit dem DSMC-Algorithmus, der stochastische Methoden anwendet, zum anderen mit deterministischen Verfahren, welche die Gleichung unmittelbar lösen. Besonders der zweite Ansatz wurde 2020 wesentlich weiterentwickelt. Eine ausführliche Benchmarkstudie zeigte, dass beide Verfahren im Allgemeinen bis auf wenige Prozent genau übereinstimmen.

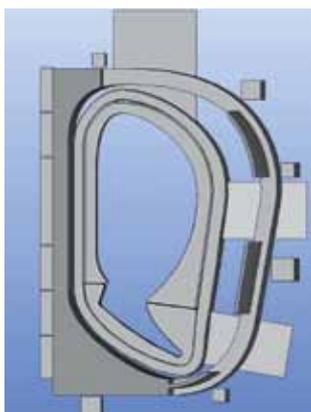


Abb. 6: Die SX-Anordnung – eine neue Divertorkonfiguration mit besonders guten Eigenschaften zum Abtransport des gebildeten Heliums.

Das Forschungsthema Strömung verdünnter Gase konzentriert sich vor allem auf die Physik des Teilchenabtransports im Divertor eines Fusionsreaktors. Für das Demonstrationskraftwerk DEMO werden derzeit alternative Divertorkonfigurationen untersucht. Dabei erwies sich die in Abbildung 6 dargestellte sogenannte SX-Konfiguration als besonderes vielversprechend: Das ITEP stellte fest, dass der extrahierte Teilchenfluss in einem großen Parameterbereich ungefähr doppelt so groß ist wie beim klassischen Divertor. Abbildung 6 zeigt die relative Anordnung des Pumpstutzens zur Lage des Divertors.

2020 wurden solche Rechnungen zum ersten Mal auf eine Stellaratorgeometrie angewendet, nämlich die der Fusionsanlage W7-X. In Abbildung 7 ist die modellierte Ebene des komplizierten Plasmagefäßes in W7-X zu sehen.

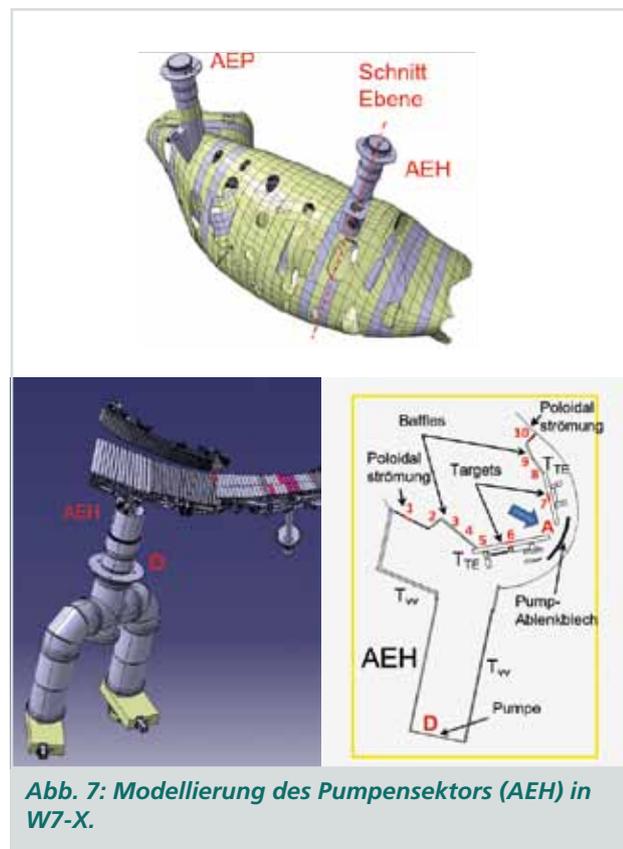


Abb. 7: Modellierung des Pumpensektors (AEH) in W7-X.

Abbildung 8 zeigt die Verteilung des einströmenden Teilchenflusses auf die verschiedenen Spalte und die Pumpöffnung A sowie den rückreflektierten Teilchenfluss.

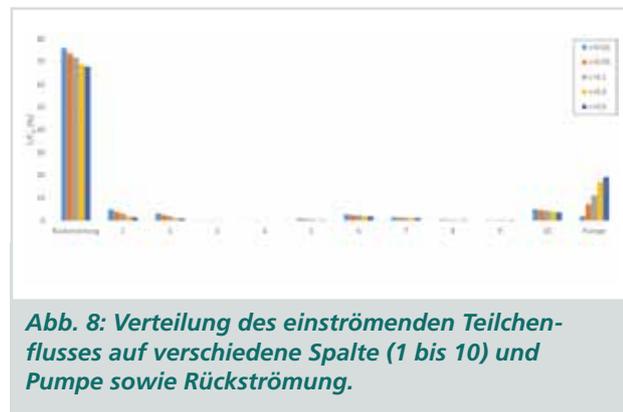


Abb. 8: Verteilung des einströmenden Teilchenflusses auf verschiedene Spalte (1 bis 10) und Pumpe sowie Rückströmung.

Der dabei variierte Parameter  $c$  beschreibt den Pumpenwirkungsgrad. Dabei wird deutlich sichtbar, welche Öffnungen eine größere Rolle spielen. Der Einfluss des Pumpenwirkungsgrads ist näherungsweise linear, aber für jede Öffnung mit unterschiedlicher Steigung. Solche Rechnungen sind wichtig, um ein optimales Design für die Pumpenanordnung zu entwickeln. Die Arbeiten für W7-X laufen in den kommenden Jahren weiter.

Für die DEMO-Neutralteilchenheizung wurde mithilfe der Modellierungen des ITEP eine klare Anforderung an den erforderlichen Pumpenwirkungsgrad festgelegt. So ergab sich die Notwendigkeit, deutlich höhere Wirkungsgrade zu realisieren als ursprünglich geplant. Abbildung 9 zeigt die berechneten Druckprofile längs der Einschussrichtung des Neutralteilcheninjektors (Neutralisator – Restionenfalle [RID] und Calorimeter), mit dem Pumpenwirkungsgrad als Parameter. Es wird deutlich, dass es eines Wirkungsgrads von rund 20 Prozent bedarf, um am Auslass des Kalorimeters den benötigten Druck von maximal 3 mPa zu erreichen. Eine

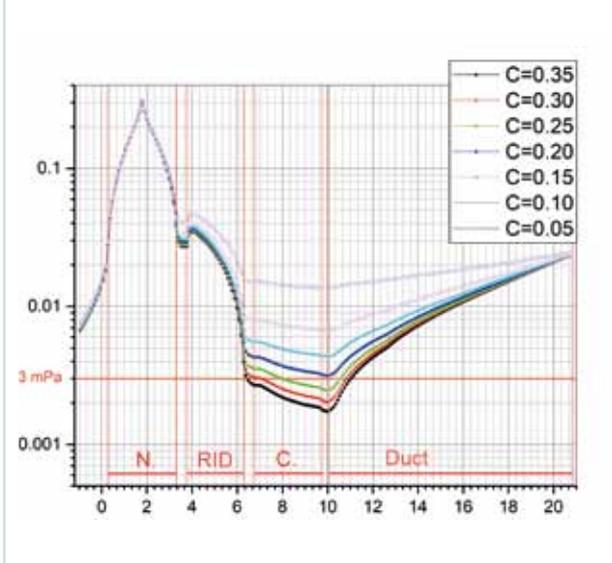
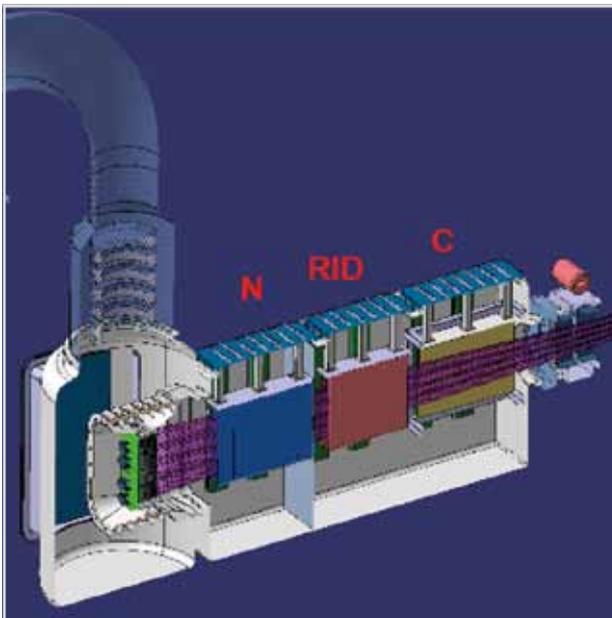


Abb. 9. Berechnete Druckprofile längs des DEMO-Neutralteilcheninjektors für verschiedene angenommene Pumpenwirkungsgrade.

solche Pumpe zu entwickeln, wird in den kommenden Jahren eine der Hauptaufgaben des ITEP sein.

Kontakt: [stylianos.varoutis@kit.edu](mailto:stylianos.varoutis@kit.edu)

## Vakuumphdraulik und Wasserstoffseparation

Das Forschungsthema Vakuumphdraulik und Wasserstoffseparation umfasst sämtliche Arbeiten, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, vor allem Flüssigmetallen, in Maschinen und Prozessen unter Vakuum beschäftigen. Dementsprechend arbeitet der Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP auch an Prozessen für den Umgang mit diesen Arbeitsmitteln, wie Aufreinigung und Prozessierung von Quecksilber, sowie an der Entwicklung zugehöriger analytischer Verfahren. Das Forschungsthema ist in dieser Weise und in diesem Umfang nur am KIT vertreten.



Abb. 10: Zerlegung der Quecksilberringpumpe.

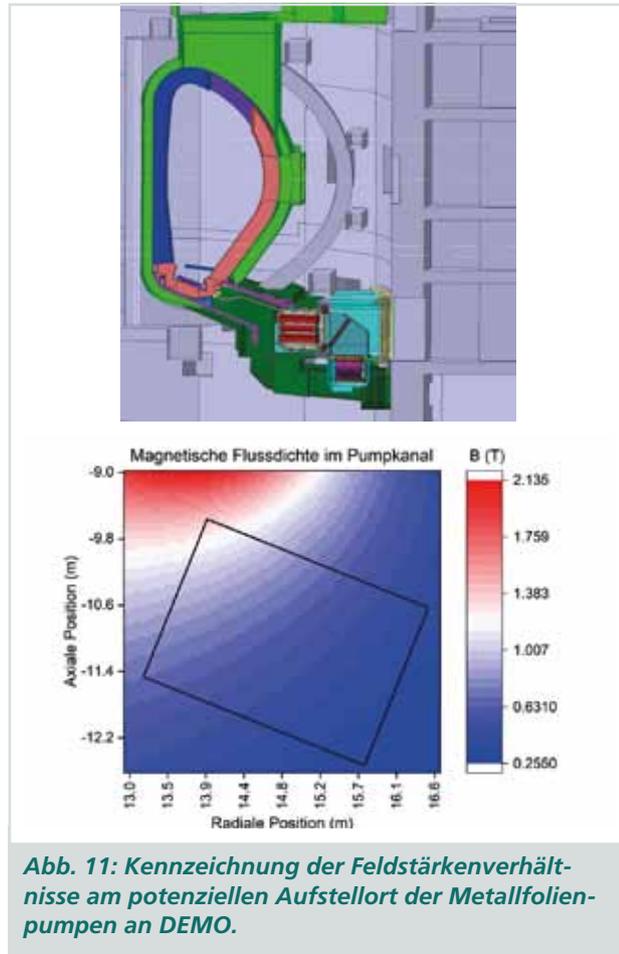
Alle Experimente dazu laufen in einer Halle in Bau 602 am KIT Campus Nord.

Das Referenzkonzept für das Torusvakuumsystem des europäischen Demonstrationsfusionskraftwerks **DEMO** sieht stromabwärts der Metallfolienpumpen (siehe unten) eine Kombination aus Quecksilberbasierten Hoch- bzw. Grobvakuumpumpen vor. Derzeit wird dafür eine lineare Quecksilberdiffusionspumpe entwickelt, die für das Pumpen von Tritium in Magnetfeldern und ein Minimalinventar von Quecksilber als Arbeitsmittel ausgelegt ist. Als Vorpumpen sollen mit Quecksilber betriebene Ringpumpen dienen. 2020 wurde eine Quecksilberringpumpe aus der Anlage THESEUS ausgebaut und zerlegt, um herauszufinden, warum das Pumpverhalten in den vergangenen Jahren schlechter wurde (Abbildung 10). Dies diente auch dazu, den Umgang mit solchen Komponenten zu üben. Das ITEP nutzte diese Aktivität gemeinsam mit MED, dem Arbeitsschutzdienstleister ias Karlsruhe und dem Zentralinstitut für Arbeitsmedizin Hamburg dazu, ein Biomonitoring durchzuführen. Damit wurde schließlich erfolgreich demonstriert, dass sich solche Arbeiten mit geeigneter Schutzausrüstung ohne gesundheitliche Bedenken ausführen lassen. Technisch ergab die Zerlegung, dass es wohl eine Leckage durch eindringendes Kühlwasser gab und dass durch die folgende Korrosion die Ventilsitze der Steuerscheibe nicht mehr dicht waren. Das ITEP wird daher künftig die Ringpumpen mit einem geänderten Dichtungs- und Antriebskonzept versehen.

Das für DEMO in den vergangenen Jahren entwickelte neue Vakuumkonzept des Brennstoffkreislaufs arbeitet im Gegensatz zu den Kryovakuumpumpen für den internationalen Experimentalreaktor ITER kontinuierlich und ohne Kryogen. Es besteht aus drei Pumpstufen, wobei die oben beschriebene Ringpumpe die letzte Stufe darstellt. Zur Separation des unverbrannten Brennstoffs DT sollen in der ersten Stufe superpermeable Metallfolien verwendet werden. Dies ermöglicht gleichzeitig eine Separation von hochreinem Wasserstoff aus dem Fusionsabgas sowie 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.

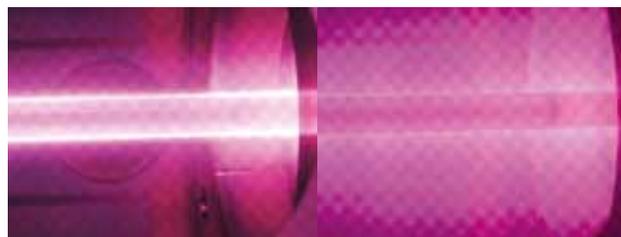
Um gepumpt werden zu können, muss der Wasserstoff in einen energetischen Zustand überführt werden. Für diese Aufgabe wird eine Mikrowellenplasmaquelle entwickelt, die einen hohen Energetisierungsgrad erreichen soll. Diese Entwicklungsarbeit findet auf der Basis einer industriellen Plasmaquelle – Duo-Plasmaline von Muegge – in Zusammenarbeit mit der Industrie statt. Zu den besonderen Anforderungen von DEMO gehört der Betrieb der Metallfolienpumpe in einem örtlich nicht konstanten magnetischen Feld hoher Feldstärke von ca. 1 T (Restfeld der Magnetspulen des Plasmagefäßes), weil die Pumpen divertornah aufgestellt werden müssen (Abbildung 11).

Auf der Untersuchung des Einflusses eines äußeren Magnetfelds auf die Wirkungsweise der Plasmaquelle lag der Schwerpunkt der Arbeiten im Jahr 2020. Diese Aktivität geschieht in Kollaboration mit dem Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie der Universität Stuttgart. In einer speziell



**Abb. 11:** Kennzeichnung der Feldstärkenverhältnisse am potenziellen Aufstellort der Metallfolienpumpen an DEMO.

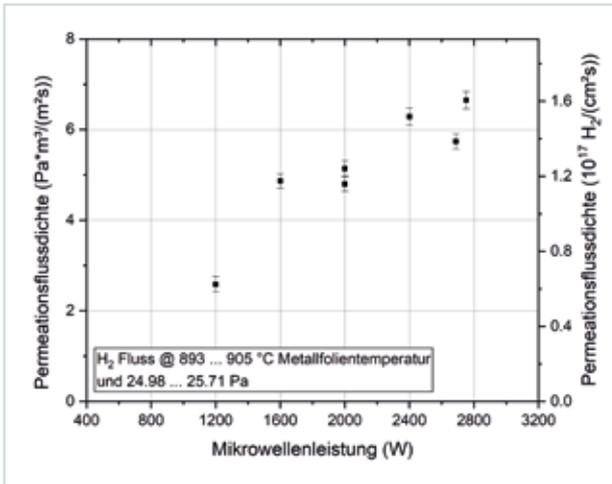
dafür vorbereiteten Versuchsanlage wurden ausführliche Messungen in verschiedenen Feldorientierungen vorgenommen. Bei den Messungen zeigte sich, dass das äußere Feld die Plasmaausformung signifikant beeinflussen kann; so waren Änderungen des Plasmavolumens, der Plasmaform, der Zündbereitschaft und des Zündorts festzustellen. Beispielhaft vergleicht Abbildung 12 den gleichen Betriebszustand mit 3 kW Mikrowellenleistung (H<sub>2</sub>-Plasma) mit und ohne Magnetfeld.



**Abb. 12:** Abhängigkeit der Plasmaausformung bei unterschiedlichen äußeren Magnetfeldern und einem Druck von 10 Pa. Links: 250 mT, rechts: ohne Feld

Zur Interpretation der Messergebnisse laufen derzeit parametrische elektrodynamische Berechnungen der Ausbeute an energetischen Wasserstoffteilchen mit dem Software-Paket COMSOL-Multiphysics. Dies dient auch dazu, die Skalierung des Prozesses auf die Anwendungsgröße in DEMO zu unterstützen.

Zur Charakterisierung des integrierten Aufbaus mit Quelle und Folie liefen 2020 ausführliche Messkampagnen in der Anlage HERMESplus. Abbildung 13 zeigt, wie



**Abb. 13: Leistungsdaten von Wasserstoff durch eine Niob-Folie bei etwa 900 °C bei einem Druck von etwa 25 Pa.**

die Leistungsdaten der Folie von der Mikrowellenleistung der Plasmaquelle abhängen. Für höhere Werte im Bereich von ca. 3 kW scheinen sie in ein Plateau zu laufen. Der dabei gefundene Permeationsstrom ist bereits ausreichend hoch, um diese Technologie für DEMO interessant zu machen. Auch die direkt mit der Mikrowellenleistung zusammenhängenden Betriebskosten sind damit von akzeptabler Größenordnung.

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.

Für die Bereitstellung des Brennstoffs in der gewünschten Zusammensetzung ist es erforderlich, das D:T-Ver-

hältnis 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, basierend auf der Kopplung eines Membranprozesses mit einer zyklischen Temperaturwechselabsorption, das verschiedene Wasserstoff-Metall-Wechselwirkungen ausnutzt. Das Gasgemisch 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. 2020 wurde eine neue TiCr-Legierung als Material mit inversem Isotopieeffekt – das schwerere Isotopolog wird bevorzugt absorbiert – umfänglich charakterisiert. Zur Demonstration des gesamten Verfahrens wurde die neue Testanlage HESTIA vollständig aufgebaut; sie geht demnächst in Betrieb (Abbildung 14).



**Abb. 14: Die neue Testanlage HESTIA.**

Kontakt: thomas.giegerich@kit.edu

## Highlight: DEMO-Brennstoffkreislauf geht in die konzeptionelle Designphase

Das Jahr 2020 war das letzte Jahr des siebenjährigen Projekts zum Erarbeiten eines neuen Brennstoffkreislaufkonzepts für DEMO. Diese Aktivitäten waren innerhalb des Europäischen Programms EUROfusion im Arbeitspaket TFV (Tritium – Fuelling – Vacuum) organisiert: Ein Zusammenschluss mehrerer Forschungsinstitute, europaweit vom ITEP koordiniert, arbeitete daran, eine Design Baseline zu schaffen. Das Projekt zeigt beispielhaft die herausragende internationale Großforschung am KIT. Folgende Institution waren daran beteiligt:

- CEA, Frankreich: Expertise in der Materieinjektion über Pellets
- Consorzio RFX, Italien: Expertise in der Technologie von Neutralteilcheninjektoren
- ENEA, Italien: Expertise in der Membrantechnik, der Pelletinjektion und der Detritierung der Kühlmittel Helium und Wasser
- Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Deutschland: Expertise in der Plasmaphysik und der Materieinjektion
- UKAEA, England: Expertise in der Tritiumtechnologie
- Universität Volos, Griechenland: Expertise in der Vakuummodellierung

Abbildung 15 zeigt die beteiligten Personen zu Beginn des Projekts (2014) und beim Abschluss (2020).



Abb. 15: TFV Projektteam in den Jahren 2014 und 2020.

Über die sieben Jahre Laufzeit wuchs das Team von 15 Personen auf 35 Personen an, der Anteil von Doktorandinnen und Doktoranden stieg dabei kontinuierlich. Unterdessen entstand ein Netzwerk mit einigen Industrieunternehmen, das in den kommenden Jahren noch weiter ausgebaut werden soll (Abbildung 16).

Neben den interessanten technischen Neuentwicklungen in diesem anspruchsvollen Projekt gab es bemerkenswerte Auszeichnungen. Gleich zwei Mal gewannen Mitglieder des TFV Teams den Fusion Innovation Prize für Exzellenz und Innovation in der Fusionsforschung: Christian Day und Thomas Giegerich erhielten ihn 2014

für das Konzept des Direct Internal Recycling; Silvano Tosti und Alessia Santucci bekamen ihn 2016 für wesentliche Fortschritte in der Membrantechnologie. Das Projekt TFV wurde außerdem für die Förderung von Frauen in der Nukleartechnik ausgezeichnet.



Abb. 16: Forschungs- und Industriepartner im Projekt TFV.

Mit dem Mercury User Group Meeting (1. Veranstaltung März 2019 am KIT), und dem NEG for Fusion Seminar (1. Veranstaltung November 2019 in Mailand) starteten zwei regelmäßige Workshopserien, die den TFV Arbeiten in der wissenschaftlichen Community bleibend besondere Sichtbarkeit verleihen.

Über die gesamte Projektlaufzeit entstanden etwa 150 Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften sowie Vorträge und Posterbeiträge zu internationalen Konferenzen. Besonders hervorzuheben ist die Veröffentlichung des „Fusion Technology Textbook“, zu dem TFV wesentlich beigetragen hat. Er wird Mitte 2021 von der IAEA veröffentlicht werden.

Während der Laufzeit des Projekts wurde ein neues Konzept für den Brennstoffkreislauf entwickelt und so etabliert, dass es nun den Anfangspunkt für die konzeptionelle Designphase von DEMO darstellt (2021 bis 2027) (Abbildung 17).

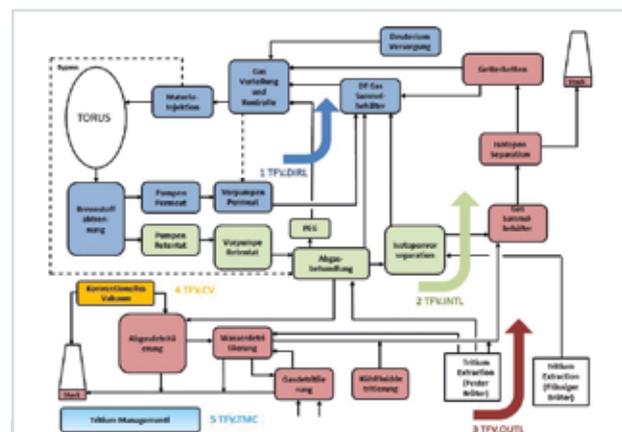


Abb. 17: Die neue Referenzarchitektur des Brennstoffkreislaufs von DEMO.

In einer Reihe von externen Reviews wurde die neue Architektur gründlich geprüft und für gut befunden. Diese Reviews fanden in verschiedenen Stufen statt; insgesamt wurden dafür rund 450 Seiten Dokumentation neu erstellt. Dies war eine ganz besondere Leistung in diesem herausfordernden Jahr 2020.

Das Team freut sich nun darauf, mit neuer Kraft, neuen Ideen und neuen Möglichkeiten die nächste Phase 2021 bis 2027 zu meistern.

# Preise und Auszeichnungen

Im Jahr 2020 erhielten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP einige wichtige Preise und Auszeichnungen für ihre Verdienste.

**Dr. Holger Neumann** wurde zum **Vorstand des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins e.V. (DKV)** gewählt. Beim DKV handelt es sich um den einzigen deutschen technisch-wissenschaftlichen Verein für die Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik. Er wurde 1909 in Berlin gegründet. Hauptziel des Vereins ist die Förderung wissenschaftlicher und technischer Arbeiten in den genannten Bereichen.



**Abb. 1:** DKV-Vorstandsmitglieder mit Dr. Holger Neumann (zweiter von links) als neuem Vorstand.

Das **Gebäude Energy Lab 2.0, Bau 668 am KIT Campus Nord**, erhielt den **Hugo-Häring-Preis des Bundes Deutscher Architekten (BDA)** sowie den **International Design Award Gold in der Kategorie Institutionelle Bauten**. Die Jury des Hugo-Häring-Preises würdigte unter anderem die gelungene Anordnung der verschiedenen Bereiche und die visuelle Verbindung der Räume. Im Bau 668 sind das Power-Hardware-in-the-Loop Labor des ITEP und zugehörige Büroarbeitsplätze untergebracht.



**Abb. 2:** Blick in das Gebäude 668 am KIT Campus Nord.

**Dr. Sonja Schlachter, Dr. Ralf Lietzow und Dr. Holger Neumann** erhielten für ihre Veröffentlichung „Experimental Study on Superconducting Level Sensors in Liquid Hydrogen“ den **Van Duzer Price 2018 vom IEEE Council of Superconductivity**. Der Preis würdigt das beste eingereichte Paper der Zeitschrift IEEE Transactions on Applied Superconductivity in einem Jahr und wurde anlässlich der Applied Superconductivity Conference 2020 verliehen.

**Dr. Giovanni De Carne** warb eine **Helmholtz Nachwuchsgruppe** zum Thema „Hybrid Networks: a multi-modal design for the future energy system“ ein und nimmt am **Helmholtz Mentoring Programm** teil. Damit erhält er die Möglichkeit, eine eigene Forschergruppe zur Entwicklung von hybriden Netzen aufzubauen.



**Abb. 3:** Dr. Giovanni De Carne

**PD Dr. habil. Francesco Grilli** erhielt eine **außerplanmäßige Professur der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik**. Damit würdigte die Fakultät die langjährigen exzellenten, bereits vielfach ausgezeichneten Beiträge von Dr. Francesco Grilli in Forschung und Lehre.



**Abb. 4:** Dr. Francesco Grilli (Mitte) bei der feierlichen Verleihung der Urkunde.

Wir freuen uns sehr über diese Anerkennungen der außergewöhnlich guten Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und danken ihnen herzlich für ihr Engagement.

# Abgeschlossene Doktorarbeiten

Dr. Sven Meyer

## Einführung der Quasi-Multilagen-Technik zur gepulsten Laserdeposition für verbesserte supraleitende Eigenschaften von $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ -Dünnschichten

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Implementierung von künstlichen Pinning-Zentren durch den Einsatz der Quasi-Multilagen-Technik zur gepulsten Laserdeposition (PLD) in Co-dotierten  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  (Ba122)-Verbindungen (siehe Abbildung 1). Ziel ist, die kritischen Stromdichten und die Pinning-Kräfte zu erhöhen. Durch Optimierung des epitaktischen Wachstums von Ba122-Verbindungen wird ein reproduzierbarer Prozess zum Experimentieren mit verschiedenen Mengen künstlicher Pinning-Zentren etabliert, um einen für den Versuchsaufbau optimalen Ba122-Film ohne Gitterdefekte oder Fremdphasen zu erhalten. Co-dotierte Filme, die auf  $\text{CaF}_2$  gewachsen sind, zeigen die besten Ergebnisse, was die kritische Temperatur, die kritische Stromdichte und die geringe Menge wachstumsbedingter Pinning-Zentren betrifft.

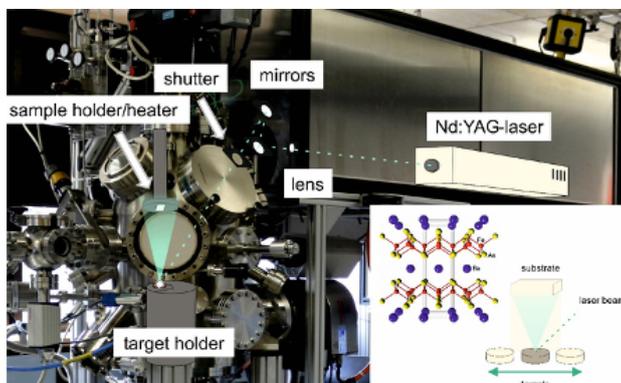


Abb. 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, der Struktur des Ba122 und des Prinzips der Multi-Target-PLD.

Form von Nanosäulen für das Pinning bei niedrigeren Dotierungen verantwortlich waren. Mit zunehmender Dotierung traten mehr Nanosäulen auf. Die Nanosäulen wurden anhand energiedispersiver Röntgenspektroskopie als aus BHO bestehend identifiziert. Experimente mit identischen, auf LAO gewachsenen Filmen zeigten ebenfalls das erwartete Verhalten. Die kritischen Stromdichten und Pinning-Kraftdichten streuten aufgrund des starken Pinnings an Wachstumsdefekten im Co-dotierten Ba122. Die zusätzlichen künstlichen Pinning-Zentren führten zu mehr Störung im Gitter, ohne die supraleitenden Eigenschaften zu verbessern.

Diese Untersuchungen wurden mit der Implementierung von InAs als künstlichem Pinning-Material wiederholt. Der Sphalerit-Halbleiter InAs war zuvor noch nie als künstliches Pinning-Material untersucht worden. Um die optimale Zusammensetzung zu finden, wurden mehrere Experimente durchgeführt. Die kritischen Stromdichten zeigten ein Maximum bei 468 Pulsen von InAs. Festzustellen war, dass das Pinning im wesentlichen durch Punktdefekte verursacht wird, die nur mit jeweils einer Flusslinie interagieren können. Daher führt eine Erhöhung des InAs-Gehalts in der Schicht zu einer steigenden Zahl von Punktdefekten, die mit einer Flusslinie wechselwirken, bis ein Optimum der kritischen Stromdichte erreicht wird. Jenseits dieses Optimums verursacht der steigende InAs-Gehalt lediglich Unordnung im Gitter, und die kritische Stromdichte nimmt wieder ab. Die quasi-mehrschichtige gepulste Laserabscheidung wurde in dieser Arbeit erstmals für die Herstellung und Verbesserung von eisenbasierten supraleitenden Dünnschichten eingesetzt.

Verschiedene Experimente mit unterschiedlichen Pulszahlen und Targetwechseln führten zu der Entscheidung, sich auf die Implementierung von  $\text{BaHfO}_3$  (BHO) als künstlichem Pinning-Material zu konzentrieren, da  $\text{BaZrO}_3$  bereits untersucht worden war, wobei jene Proben nicht in Quasi-Multilagen-Technik gewachsen waren. Die untersuchten Proben wiesen 0 mol%, 1,03 mol%, 1,59 mol% und 3,85 mol% BHO auf. Diese Gehalte wurden anhand der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) gemessen. Sowohl die kritische Stromdichte als auch die Pinning-Kraftdichte wurden auf  $10^6 \text{ A/cm}^2$  bzw.  $50,6 \text{ GN/m}^3$  für den höchsten getesteten Dotierungsgrad gesteigert. Weitere Untersuchungen zeigten, dass Nanopartikel in

## Dr. Matthias Corduan

### Auslegung von supraleitenden AC-Maschinen für hybrid-elektrische Flugzeuge

Die Luftfahrtindustrie steht vor der Herausforderung, wirtschaftliche und umweltverträgliche Antriebssysteme zu entwickeln, um die steigende Nachfrage zu erfüllen und zugleich Emissionen zu reduzieren. Dabei verspricht eine Elektrifizierung des Antriebssystems gewisse Vorteile dank neuartiger variabler Konzepte, wie hybrid-elektrische oder dezentrale Antriebe. Wegen der mehrfachen Energieumwandlung muss das Antriebssystem hocheffizient sein, um im Vergleich zu einem konventionellen Antriebssystem weniger Kraftstoff zu verbrauchen. Darüber hinaus ist ein deutlich geringeres Gewicht erforderlich, um das Leistungsgewicht konventioneller Motoren zu erreichen. Modernste elektrische Maschinen erfüllen aufgrund ihrer thermischen und magnetischen Grenzen diese Anforderungen nicht. Supraleiter versprechen aufgrund der hohen Strombelastbarkeit und des vernachlässigbaren Gleichstromwiderstands (DC), diese Einschränkungen zu überwinden.

Diese Arbeit untersucht supraleitende Wechselstrommaschinen (AC-Maschinen) als Teil eines hybrid-elektrischen Antriebssystems. Sie entwickelt einen detaillierten Maschinenentwurfsprozess, der die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen und thermischen Eigenschaften des Supraleiters integriert. So werden die technischen Eigenschaften der Supraleitung, der elektrischen Maschine und des Flugzeugs unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Anforderungen in einem Werkzeug kombiniert, um gegenseitige Abhängigkeiten zu untersuchen. Verschiedene Maschinentopologien schaffen einen großen Bauraum für synchrone Radialflussmaschinen und erfordern für die Untersuchung schnelle ganzheitliche analytische Ansätze. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Modellierung von supraleitenden Spulen auf der Basis von Magnesiumdiborid (MgB<sub>2</sub>), die von alternierenden magnetischen Feldern im Stator durchdrungen werden.

Ein 114-Filament-MgB<sub>2</sub>-Draht wird charakterisiert; der Einfluss seines Wechselstromverlusts auf die Strombelastbarkeit wird untersucht, und der Draht wird in das Maschinendesign integriert. Darüber hinaus wird eine zweiphasige Kühlung mit flüssigem Wasserstoff zur Kühlung von MgB<sub>2</sub>-Spulen implementiert, die es auch erlaubt, den Wasserstoffverbrauch von Maschinen zu bestimmen. Der Entwurf wird daher in das analytische elektrothermische Modell und das elektromagnetische Modell unterteilt. Die Magnetfeldberechnung wird mit hoher Genauigkeit in allen Maschinenbereichen durchgeführt und mit der Finite-Elemente-Methode validiert. Dies ermöglicht die Bestimmung der feldabhängigen Wechselstromverluste der Statorspulen. Die mechanischen und thermischen Stützkomponenten innerhalb des magnetischen Luftspalts werden entsprechend der Maschinentopologie angepasst und ausgelegt. Sowohl die aktive Masse als auch die passive Masse der Hauptstrukturteile werden berechnet.

Zur Bewertung des Potenzials von voll und teilweise supraleitenden Maschinen diente der Entwurf einer 21,6-MW-Maschine (Abbildung 1), die den konventionellen Propeller eines Airbus A321neo-LR antreibt. Diese Maschinentypologien, die sowohl auf supraleiten-

den als auch auf normalleitenden Spulen und Magneten basieren, werden miteinander verglichen, indem die Zahl der Polpaare, der Durchmesser der Maschine sowie die Spulen- und Magnetdicke optimiert werden. Dazu gehört auch die Konstruktion eines Tanks für flüssigen Wasserstoff, der viermal in den Rumpf integriert ist und 280 kg flüssigen Wasserstoff pro Tank speichert.

Darüber hinaus wird die Reichweite dieses Flugzeugs für eine vorgegebene Flugmission und eine Auswahl von optimierten Maschinen berechnet, und die Reduzierung der Stator-Wechselstromverluste wird durch eine optimierte Regelstrategie von Rotor- und Statorstrom untersucht.



Die Arbeit zeigt, dass die Stromdichte einer MgB<sub>2</sub>-Statorspule im Vergleich zu der einer konventionellen Spule auf der Basis von Kupferlitzten bei Umgebungstemperatur bis zu 18-mal höher ist. Daher ermöglichen supraleitende Maschinen sowohl ein hohes Leistungsgewicht als auch geringere Stator-Wechselstromverluste. Die leichteste vollständig supraleitende Maschine, die auf MgB<sub>2</sub>-Statorspulen und Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)-Rotorspulen basiert, erreicht ein maximales Leistungsgewicht von 56,4 kW/kg und ist damit auch die leichteste Maschine aller Topologien. Die effizienteste Maschinentopologie dieser Art erzeugt minimale Stator-Wechselstromverluste von 6 kW. Teilweise supraleitende Maschinen, die aus MgB<sub>2</sub>-Statorspulen und Halbach-Rotor-Arrays bestehen, erzeugen noch geringere Stator-Wechselstromverluste von minimal 3,9 kW. Darüber hinaus sind geringe Verluste erforderlich, um die Gewichtsbilanz des gesamten Antriebssystems nicht durch einen großen Flüssigwasserstofftank oder einen Wärmetauscher zu belasten, wie bei Kupferstatoren notwendig. Daher wird mit einem Flüssigwasserstofftank eine maximale Flugzeit von ca. 600 Minuten erreicht, was über der Brennstoffreichweitengrenze des hybridisierten Airbus A321neo-LR liegt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nach Erreichen eines minimalen Leistungsgewichts im Maschinendesign, um den durch den Bauraum gegebenen Anforderungen gerecht zu werden, die Optimierung der Stator-Wechselstromverluste Priorität erhält. Abschließend schlägt die Arbeit ein Design für den untersuchten Maschinentyp vor.

## Dr. Aurélien Godfrin

### AC-Verluste in Hochtemperatur-Supraleiter-Bändern und -Kabeln für Leistungsanwendungen

Dank ihrer hohen Stromdichte, ihres guten Feldverhaltens und ihrer mechanischen Festigkeit gelten Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) in Form von beschichteten Bandleitern auf Seltenerd basis als geeignet für Großanwendungen wie Transformatoren, Magnete und Elektromotoren. Die beschichteten Leiter weisen jedoch wegen ihres hohen Aspektverhältnisses mit einer Breite von mehreren Millimetern und einer Dicke von ca. 1  $\mu\text{m}$  große Wechselstrommagnetisierungsverluste auf, was ihren Einsatz in den genannten Anwendungen behindert.

Ein üblicher Weg zur Verringerung der Wechselstromverluste von beschichteten Leitern besteht darin, die Supraleiter in schmale Filamente zu unterteilen. Die Laserablation ist eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Herstellung von Filamenten, wird allerdings durch die in Leistungsanwendungen benötigte ausreichend dicke Kupferstabilisierung der Supraleiter erschwert. Das beste Verfahren, um Filamente in kupferstabilisierten beschichteten Leitern herzustellen, wird noch entwickelt.

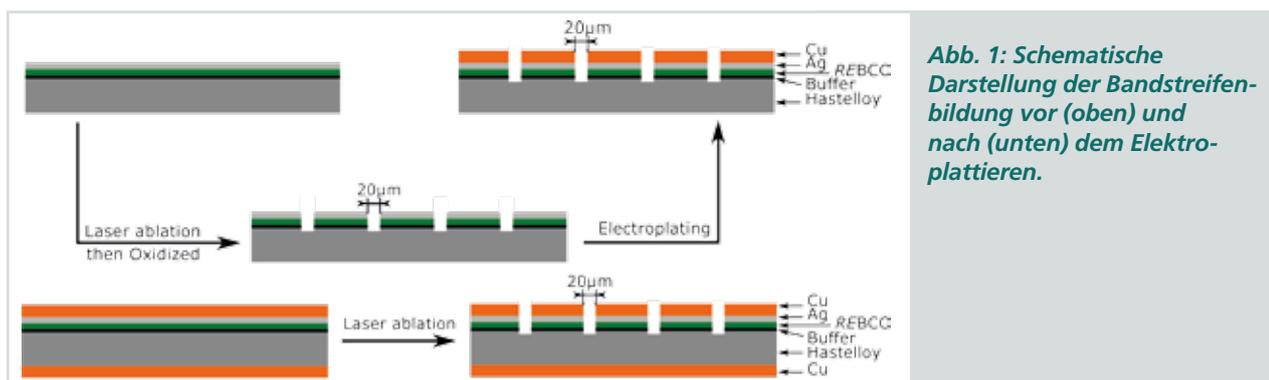
Die Schwerpunkte dieser Arbeit liegen auf zwei Themen: Erstens untersucht sie die Herstellung von Filamenten auf kupferstabilisierten beschichteten Leitern, wobei die Filamente nach oder vor der galvanischen Beschichtung des Bands erzeugt werden. In der gesamten Arbeit werden die nach diesen beiden Ansätzen hergestellten Proben als „Striated After Electroplating“ (SAE) und „Striated Before Electroplating“ (SBE) bezeichnet. Untersucht werden Proben mit unterschiedlicher Filamentzahl (10 bis 60) und Kupferdicke (5  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$ ). Zweitens befasst sich die Arbeit mit der Anwendbarkeit der Filamentierung zur Reduzierung der Wechselstromverluste von Kabeln, besonders der CORC®- und RACC-Kabel, die mit filamentierten HTS-Bändern hergestellt werden.

Die Wechselstromverluste werden für Bänder mit der kalibrierungsfreien Methode gemessen, für Kabel mit der kalorimetrischen Methode. Beide Methoden eignen sich für die Untersuchung von HTS-Bändern und -Kabeln. Beide arbeiten bei 77 K in einem weiten Frequenzbereich des externen Magnetfelds, sodass sich der Beginn der Kopplungsströme und die Bedeutung der Kopplungsverluste bestimmen lassen. Ergänzende Gleichstrommessungen des Querwiderstands zwischen Filamenten helfen, den Pfad der Kopplungsströme zu verstehen.

Dank der Vielzahl der getesteten Proben und Betriebsbedingungen bietet die Arbeit einen direkten Vergleich der

beiden Filamentprozesse in handelsüblichen HTS-Bandleitern. Bei Bändern hilft die Filamentierung, die Wechselstromverluste zu verringern. Je höher die Zahl der Filamente, desto geringer die Wechselstromverluste. Die Verlustreduzierung hängt jedoch auch stark vom Prozess des Filamentierens und von der Dicke des Kupfers ab. Bei den Wechselstromverlustmessungen mit höheren Frequenzen ist davon auszugehen, dass ein Pfad vorhanden ist, auf dem die Kopplungsströme leicht fließen können. Dies bestätigen SEM-Bilder und Querwiderstandsmessungen. Bei beiden Filamentprozessen – SAE und SBE – ermöglicht eine dünnere Kupferschicht eine effektivere Verringerung der Wechselstromverluste und eine Begrenzung der Kopplung. Die Verwendung von SAE-Bändern in Anwendungen kann durch Delaminierungsprobleme erschwert werden. Daher bedarf es weiterer Untersuchungen zu diesem potenziellen Problem. Die Komplexität und Dauer der beiden Prozesse und die Ergebnisse der Wechselstromverluste legen jedoch nahe, dass der SAE-Prozess die günstigere Option darstellt.

Die Verwendung von Filamenten reduziert auch die Verluste von CORC®-Kabeln. Allerdings ist die Verlustreduzierung für CORC®-Kabel geringer als die für einzelne filamentierte Bänder. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die inneren Schichten durch die äußeren Schichten abgeschirmt sind. Bei dem aus filamentierten Teilleitern hergestellten RACC-Kabel werden die Wechselstromverluste leicht reduziert. Dies ist auf die Filamentgeometrie des RACC-Kabels zurückzuführen. Das Filament, das sich an einer der Kanten des Teilleiters befindet, geht bei der Hälfte der Transpositionslänge nicht zur gegenüberliegenden Kabelkante. Die Wechselstromverluste von CORC®- und RACC-Kabeln mit ähnlichem kritischem Strom zeigen, dass die CORC®-Kabel für einen bestimmten angelegten Strom geringere Wechselstromverluste aufweisen als die RACC-Kabel. Erklären lässt sich dies dadurch, dass die Teilleiter des RACC-Kabels einem senkrechten Magnetfeld, die Teilleiter des CORC®-Kabels hingegen einem Feld mit verschiedenen Ausrichtungen ausgesetzt sind. Wenn die Verluste jedoch durch die Stromdichte des Kabels geteilt werden, weisen die RACC-Kabel geringere Wechselstromverluste auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der formgebende Kern, der in CORC®-Kabeln zum Aufwickeln der Bänder verwendet wird, die technische Stromdichte verringert. Nun kommt es darauf an, den Durchmesser des Kerns zu verringern – wenn dies gelingt, kann das CORC®-Kabel wettbewerbsfähig werden.



**Abb. 1: Schematische Darstellung der Bandstreifenbildung vor (oben) und nach (unten) dem Electroplattieren.**

## Dr.-Ing. Benedikt Peters

### Entwicklung einer auf Superpermeation basierenden wasserstoffselektiven Vakuumpumpe

Diese Arbeit ist thematisch eingebettet in die Entwicklung des Brennstoffkreislaufs für zukünftige Fusionskraftwerke, die der Institutsbereich Vakuumtechnologie und Prozessintegration seit Jahren vorantreibt. Zentraler Bestandteil eines neuen Konzepts für den Brennstoffkreislauf ist das Direct Internal Recycling (DIR). Dieses ermöglicht, das benötigte Tritiuminventar um mehr als 80 Prozent zu reduzieren. In der vorgestellten Arbeit wird diese Quantifizierung zum ersten Mal vorgenommen.

Für das DIR ist eine Prozesseinheit erforderlich, die Wasserstoff von anderen Gasen bei niedrigem Druck trennen kann. Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer solchen Einheit auf der Basis der Superpermeation. Dieser Effekt nutzt die besondere Eigenschaft von Wasserstoff, in der Gasphase als Molekül vorzuliegen, sich aber in Metallen atomar zu lösen. Dabei wird die Aufspaltung des Wasserstoffs in der Gasphase durch eine Energiequelle unterstützt. Zudem wird eine Metallfolie mit geeigneten Eigenschaften eingesetzt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein auf die Oberfläche der Folie treffendes Wasserstoffatom diese durchdringt, kann fast 100 Prozent betragen. Der Effekt funktioniert auch gegen ein Druckgefälle. Wasserstoff kann also aus einer Kammer mit niedrigem Druck in eine Kammer mit höherem Druck transportiert werden. Daher wird die Prozesseinheit als Metallfolienpumpe (MFP) bezeichnet.

Die Arbeit erläutert zunächst die grundlegenden physikalischen Prozesse und stellt Materialeigenschaften für mögliche Folien aus der Literatur zusammen. Darauf aufbauend entwickelt sie ein theoretisches Modell zur Beschreibung der Superpermeation. Das Modell zeigt, dass besonders hohe Durchtrittswahrscheinlichkeiten nur bei oberflächenlimitierter Permeation auftreten. Die Kombination des entwickelten Modells mit Materialdaten aus der Literatur zeigt, dass ein hoher Wasserstoffstrom, wie er für das DIR benötigt wird, nur durch Materialien mit ähnlichen Eigenschaften wie Niob oder Palladium zu erreichen ist. Das Modell sagt die Bildung von Wasserstoffbläschen im Metall als limitierende Randbedingung vorher. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, lässt sich diese Limitierung auch experimentell nachweisen.

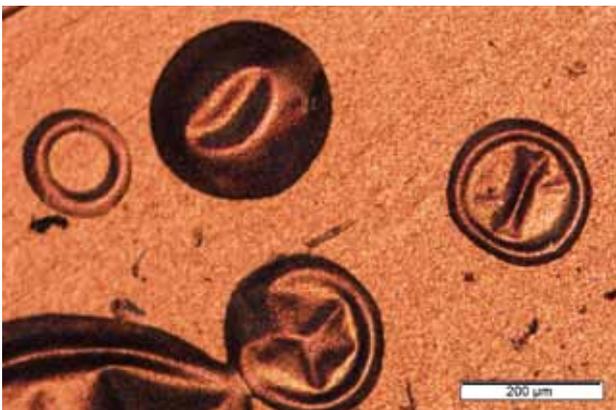


Abb. 1: Mikroskopbild von Wasserstoffbläschen auf einer kupferbeschichteten Eisenmembran.

Der experimentelle Teil der Arbeit nutzt zwei Versuchsanlagen. Die Anlage HERMES (Hydrogen Experiment for Reseach on METal foils and Superpermeation) wird für die grundsätzlichen Studien verwendet. In HERMES wird die in Abbildung 1 dargestellte Gasbläschenbildung gezeigt, aber auch eine gute Trennwirkung zwischen Wasserstoff und Helium bewiesen. Diese Trennwirkung ist, wie bereits erwähnt, die eigentliche Funktion der Metallfolienpumpe im DIR.

Während der Versuche wurden die Grenzen der Versuchsanlage HERMES deutlich. Um diese zu überwinden, wurde eine neue Anlage, konzipiert, gebaut und in Betrieb genommen. Dabei wurden viele Teile von HERMES wiederverwendet.

Der neue Aufbau HERMESplus (Hydrogen Experiment for Reseach on METal foils and Superpermeation – PLasma Utilization Setup) ermöglicht die Nutzung verschiedener Einrichtungen zur Aufspaltung der Wasserstoffmoleküle. Eine Innovation dieses Aufbaus ist die Nutzung einer besonderen Plasmaquelle. Das durch diese Quelle erzeugte Plasma ist in Abbildung 2 auf der linken Seite zu sehen. Die Plasmaquelle zeichnet sich durch die hohen Drücke aus, bei denen sie sich betreiben lässt. Dadurch gelingt es, Superpermeation bei besonders hohem Druck zu demonstrieren – ein wichtiger Meilenstein für das Konzept des DIR, da diese Drücke für den Betrieb in einem Fusionskraftwerk notwendig sein könnten.

Auf den Erkenntnissen basiert ein erstes Konzept für eine Metallfolienpumpe für die Fusion. Die Arbeit stellt die dabei noch offenen Fragen heraus und präsentiert einen weiteren Entwicklungspfad. Mit der weiteren Entwicklung befassen sich zwei nachfolgende Doktorarbeiten. Ihre Ergebnisse sind mit Spannung zu erwarten – viel Erfolg!



Abb. 2: Blick in die Vakuumkammer von HERMESplus. Auf der linken Seite ist das leuchtende Wasserstoffplasma um die Plasmaquelle zu sehen, auf der rechten Seite sind weitere Einbauten erkennbar, unter anderem die zu einem Zylinder geformte Metallfolie.

# Lehre und Bildung

## Vorlesungen, Seminare und Workshops

### Vorlesungen

#### KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

**Supraleitende Systeme der Energietechnik** (Holzapfel, Noe) WS 19/20, WS 20/21  
**Supraleitende Materialien** (Holzapfel, Hänisch) WS 19/20, WS 20/21  
**Energy Storage and Network Integration** (Noe, Grilli, De Carne) WS 19/20, WS 20/21  
**Übungen zu Energy Storage and Network Integration** (Noe, Grilli, De Carne, Kottonau, Karrari) WS 19/20, WS 20/21  
**Projekt Management für Ingenieure** (Noe, Day) SS 20  
**Grundlagen und Technologie supraleitender Magnete** (Arndt) SS 20  
**Superconductors Materials for Energy Applications** (Grilli) SS 20  
**Anleitung zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten** (Holzapfel) SS 20  
**Electrical and Electronics Engineering for Mechanical Engineers** (De Carne) WS 19/20, SS 20, WS 20/21

#### KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

**Vakuumtechnik** (Day) WS 19/20, WS 20/21  
**Übung zu Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 19/20, WS 20/21  
**Kältetechnik A** (Grohmann) WS 19/20, WS 20/21  
**Übungen zu Kältetechnik A** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 19/20, WS 20/21  
**Cryogenic Engineering** (Grohmann) WS 19/20, WS 20/21  
**Cryogenic Engineering – Exercises** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 19/20, WS 20/21  
**Physical Foundations of Cryogenics** (Grohmann) SS 20  
**Physical Foundations of Cryogenics – Exercises** (Grohmann) SS 20  
**Kältetechnik B** (Grohmann) SS 20  
**Übungen zu Kältetechnik B** (Grohmann, Mitarbeiter) SS 20

#### KIT-Fakultät Maschinenbau

**Fusionstechnologie A** (Day, Demange, Fietz, Weiss, Wolf) WS 19/20, WS 20/21  
**Fusionstechnologiekolloquium\*** (Noe) SS 20  
**Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren** (Fietz, Weiss, Wolf) SS 20  
**Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf** (Day, Frances, Gröbkle) SS 20

#### KIT-Fakultät Physik

**Hauptseminar Astroteilchenphysik: Neutrinos und dunkle Materie** (Gröbkle) WS 19/20, SS 20

#### House of Competence

**„Netzwerken – Verbindungen schaffen Freiheiten“** (Arndt) WS 20/21  
 9005222 Tagesworkshop 25.11.2020

#### Kryo-Seminare

**VDI-Wissensforum „Supraleitung: Hochfeldmagnete und andere Anwendungen“** (Kläser) 07.–09.10.2020  
**Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau**  
**Arbeitssicherheit und Umweltschutz** (Bauer) WS 19/20, SS 20  
**Thermodynamik 1 für Maschinenbauer** (Neumann) WS 19/20, SS 20  
**Thermodynamik 2 für Maschinenbauer** (Neumann) SS 20  
**Tiefemperaturtechnik** (Neumann) WS 20

#### Zhejiang-Universität (China)

**Cryogenics Online-Vorlesung;** 10 Termine à 2 Zeitstunden; 14.07.–25.08.20 (Neumann) SS 20

\* Organisation mit ITEP Beteiligung

# Lehre und Bildung

## Doktorarbeiten – Masterarbeiten – Bachelorarbeiten

### Betreute Doktorarbeiten 2020

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

#### Kai Ackermann (SUPRA)

Präparation und Charakterisierung atomar dotierter oxidischer Supraleiter

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

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

#### Matthias Corduan (SUPRA)\*\*

Auslegung von supraleitenden AC-Maschinen für hybrid-elektrische Flugzeuge

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe, Prof. Dr. Martin Doppelbauer

#### 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)\*

#### Aurélien Godfrin (SUPRA)\*\*

AC Losses in HTS Tapes and Cables for Power Applications

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

#### Lukas Grünewald (SUPRA)

Elektronenmikroskopische Untersuchung von eisen- und kupferbasierten Hochtemperatursupraleitern

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

#### Yannick Hörstensmeyer (VAKUUM)

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

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

#### Harald Itschner (SUPRA)

Entwicklung von Modellen zur speichergestützten Versorgung von Inselnetzen mit erneuerbaren Energien

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

#### Shahab Karrari (SUPRA)

Integration von Energiespeichern in Elektroenergiesysteme

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

#### Yannick Kathage (VAKUUM)

Entwicklung einer Metallfolienpumpe auf dem Prinzip der Superpermeation

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

#### Dustin Kottonau (SUPRA)

Echtzeitsimulation und Netzintegration von Mikrogasturbinen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

#### 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)\*\*

Introduction of quasi-multilayer pulsed laser deposition for enhanced superconducting properties of Ba(Fe<sub>0.92</sub>Co<sub>0.08</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> thin films

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

#### 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 (FUSION)**

Untersuchungen zum Quench-Verhalten und zur Degradation von HTS Hochstrom-Leitern für zukünftige Fusionsmagnete  
 Betreuer: Dr. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

**Benedikt Peters (VAKUUM)\*\***

Entwicklung einer auf Superpermeation basierenden, wasserstoffselektiven Vakuumpumpe  
 Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

**Quoc Hung Pham (SUPRA)**

Untersuchung von schnellen Schaltvorgängen in Hochtemperatur-Supraleitern  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

**Ruslan Popov (SUPRA)**

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

**Carsten Räch (SUPRA)**

Entwicklung von hocheffizienten modularen Hochstromsystemen auf Basis von Hochtemperatursupraleitern zur Übertragung großer Leistungen von Windparks auf Mittelspannungsniveau  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Eugen Shabagin (KRYO)**

Entwicklung einer 10 kA HTS-Stromzuführung mit kryogenem Gemischkältekreislauf  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (CIW)\*

**Fabian Schreiner (SUPRA)**

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

**Jonas Schwenzler (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)\*

**Carlos Roberto Vargas-Llanos (SUPRA)**

Numerical modeling and characterization of high-temperature superconductor coils for electrical machines  
 Betreuer: PD Dr. F. Grilli, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)\*

**Alejandro Vazquez-Cortes (VAKUUM)**

Hydrogen Interaction with Superpermeable Metal Foil Surfaces  
 Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)\*

**Christina Weber (KRYO)**

Dynamic modelling of incidents for the protection of helium cryostats against excessive pressure  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt (CIW), Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (CIW)\*

**Friedrich Wiegel (SUPRA)**

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

**Betreute Masterarbeiten in 2020**

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

**Arnaud Kraskowski \*\***

Cryo-mechanical properties of high-strength-materials for fusion magnets after thermal deformation processing  
 Betreuer: Dr. K.-P. Weiss, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)\*

**Philipp Müller**

Supraleitender Bahntransformator  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

**Marco Öhl**

Konzeptionierung einer Experimentierstation zum Thema Antriebstechniken in Automobilen  
 Betreuer: A. Rimikis, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Simone Pezzolato \*\***

Modeling and Model Validation of Supercapacitors for Real-Time Simulations  
 Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe, Prof. Dr. A. Morandi (University of Bologna)\*

**Pham Hung Quoc \*\***

Modellierung elektrischer Maschinen mit HTS Statorwicklungen  
 Betreuer: M. Corduan (Siemens), Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Betreute Bachelorarbeiten in 2020**

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

**Andreas Alexeenko**

Untersuchung von geometrischen Einflüssen auf das Magnetisierungsverhalten von supraleitenden Bandstapeln  
 Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Dominic Barthlott**

Einfluß der Nanostrukturierung von supraleitenden Schichten und Bandleitern auf deren Stromtragfähigkeiten  
 Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Nico Beisig \*\***

Growth and characterization of InAs doped iron-based Ba122 superconducting thin films  
 Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

**Leo Burger**

Optimierung der Chemischen Lösungsabscheidung von REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>-Schichten mit Hilfe des Definite Screening Designs (DSD)  
 Betreuer: W. Freitag, Dr. J. Hänisch\*

**Aslan Candas \*\***

Untersuchung von Schaltvorgängen in Hochtemperatur-Supraleitern

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe, Prof. Dr. S. Elschner\* (HS Mannheim – IES)

**Leonhard Döring \*\***

Herstellung, Charakterisierung und Simulation hochtemperatursupraleitender Permanentmagnete aus gestapelten YBCO-Bandleitern

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

**Michael Enns \*\***

Herstellung und Charakterisierung von  $BaFe_{2-x}Co_xAs_2$ -Targets

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

**Nico Henkenhaf**

Entwicklung eines didaktischen Konzeptes für die Experimentierstation „Klimaphysik“ im KIT-Schülerlabor Energie

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

**Sebastian Hepp \*\***

Entwicklung eines Konzeptes für ein Arbeitsschutzmanagementsystem nach DIN EN ISO 45001

Betreuer: K. Bauer, Prof. Dr. D. Eidam (DHBW)\*

**Hendrik Löhr \*\***

Induktiver Messstand zur Charakterisierung der kritischen Stromdichte und der kritischen Temperatur supraleitender Schichten bei tiefen Temperaturen

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

**Jonas Pfob \*\***

Entwicklung eines didaktischen Konzeptes für die Experimentierstation "Licht" im KIT-Schülerlabor Energie

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

**Simon Martz**

Untersuchung von Schaltvorgängen in Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL)

Betreuer: Q. Pham, Prof. Dr.-Ing. M. Noe

**Jonas Mensinger**

Optimierung der Prozessparameter zur Herstellung supraleitender REBCO-Dünnschichten auf IBAD-Substraten mittels statistischer Versuchsplanung

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

**Patrick Schäfer**

Fertigung und Untersuchung gestapelter Supraleiterentwicklungen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

**Philipp Rembe**

Optimierung der Prozessparameter zur Herstellung supraleitender ErBCO-Dünnschichten auf IBAD-Substraten mittels statistischer Versuchsplanung

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

**Michael Temmen**

Deposition und Charakterisierung von Strontium-Neodym-Nickelat-Schichten

Betreuer: K. Ackermann, Dr. J. Hänisch\*

**Romy Wüst \*\***

Konzeptionierung einer Marketingstrategie für kryogene Extensometer

Betreuer: Dr. K.-P. Weiss, Dipl.-Ing. D. Kohl (DHBW)\*

**Jan Zudock \*\***

Entwicklung eines didaktischen Konzeptes für die Station "Photovoltaik" im KIT-Schülerlabor Energie

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

# Lehre und Bildung

## Fach- und Gastvorträge

- |            |  |            |  |
|------------|--|------------|--|
| 30.01.2020 | Basic considerations and recent results in HTS device developments for electric aircrafts<br>Tabea Arndt<br>Safran-Group Scientific Day, Paris-Saclay, France                          | 15.06.2020 | Modellierung elektrischer Maschinen mit HTS Statorwicklungen<br>Quoc Hung Pham<br>Fachvortrag Masterarbeit, IB Supra   |
| 27.02.2020 | Herstellung, Charakterisierung und Simulation hochtemperatursupraleitender Permanentmagnete aus gestapelten YBCO-Bandleitern<br>Leonard Döring<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB SUPRA | 11.08.2020 | Induktiver Messstand zur Charakterisierung der kritischen Stromdichte und der kritischen Temperatur supraleitender Schichten bei tiefen Temperaturen<br>Hendrik Löhr<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra |
| 27.02.2020 | Herstellung und Charakterisierung von InAs-dotierten eisenbasierten Ba122-Supraleiter-Dünnschichten<br>Nico Beisig<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra                             | 17.12.2020 | Experimentelle Untersuchung des Kommutierungsvorgangs von Hochtemperatur-Supraleitern bei wechselndem Magnetfeld<br>Simon Martz<br>Fachvortrag Bachelorarbeit, IB Supra                                      |

# Zahlen und Daten

## Organigramm

Supraleiter- und Kryomaterialien (Holzapfel)	Supraleitende Energietechnische Anwendungen (Noe)	Supraleitende Magnettechnologie (Arndt)	Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs (Day)
Supraleitende Materialien	Netz- und Energiekomponenten	Spulen- und Magnettechnologie	Vakuumtechnologie und Prozessintegration
Leitertechnologien	Modellierung von Supraleitern und Komponenten	Supraleitende Komponenten für die Fusion	Strömung verdünnter Gase
Kryogene Stoffeigenschaften	Echtzeit Systemintegration	Rotierende Maschinen	Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation
Funktionsmaterialien für Kryonanwendungen			

## Personalstand (31.12.2020)

<b>Gesamt</b>	<b>139</b>	<b>zusätzlich, während 2020:</b>	
Akademiker	45	Gäste	2
Ingenieure und Techniker	42		
Sonstige	13	Praktikanten	4
Doktoranden	22	Studentische Hilfskräfte	15
Master/Diplom	5		
DH-Studenten	8	Studien-, Bachelorarbeiten	18
Auszubildende	4		
Trainees	0		

# Zahlen und Daten

## Personalveränderungen

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

Marcel Armbruster

Hans Chen

Jonas Emmerichs

Quoc Hung Pham

Harald Itschner

Pascal Kubis

Thomas Mack

Luca Tobler

Joschua Trapp

Sascha Westenfelder

Julian Würges

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

Tara Benkel

Denis Bobrov

Lennard Busch

Pablo Cayado-Llosa

Jörn Geisbüsch

Steffen Grohmann

Roland Guyráki

Rainer Heger

Sebastian Hepp

Yannick Hörstensmeyer

Sandra Kauffmann-Weiss

Lukas Kneller

Marco Langer

Klaus Metzger

Sven Meyer

Santiago Ochoa-Guaman

Ruslan Popov

Claudia Ruf

Eugen Shabagin

Christina Weber

Romy Wüst

# Zahlen und Daten

## Studentische Hilfskräfte

Abraham Sunny

Alexeenko Andreas

Barthlott Dominic

Beisig Nico

Bobien Johanna

Frank Marius

Hetzler Sebastian

Kraskowski Arnaud

Lison Patrik

Löhr Hendrik

Mai Vadim

Pham Quoc Hung

Tekelioglu Emre

Temmen Michael

Zudock Jan

# Zahlen und Daten

## Gastwissenschaftler

**Q. Meng**

05.11.19–28.07.20    Hefei Institute of Physical Science,  
Hefei, China

**M. Specchio**

28.09.20–31.12.20    Politecnico di Bari, Italien

**Damiano Paoletti**

15.1.20–16.3.20    University of Roma Tor Vergata

# Zahlen und Daten

## Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

### Tabea Arndt

- Programmausschuss-Konferenz „EUCAS 2020, Moskau 2020“
- Internationale Organisationskomitee-Konferenz „Magnet Technology 27, Fukuoka 2021“
- Mitglied DKE TC90

### Wescley Batista de Sousa

- Mitglied der „HTS Modelling Workgroup“
- Mitglieder der CIGRE Arbeitsgruppe B4/A3.86 „Fault Current Limiting Technologies for DC Grids“
- Mitherausgeber des „IEEE Transactions on Applied Superconductivity“

### 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-60SA

### Giovanni de Carne

- Helmholtz Nachwuchsgruppe Leiter – 2020
- Sekretär und Mitglieder der CIGRE Arbeitsgruppe B4.91 „Power electronics-based transformer technology, design, grid integration and services provision to the distribution grid“
- Mitglieder der CIGRE Arbeitsgruppe A3.40 „Technical requirements and field experiences with MV DC switching equipment“
- Mitglieder der IEEE Arbeitsgruppe P2004 „Hardware in the Loop“.

- Mitglieder der IEEE Arbeitsgruppe „Modelling and Simulation with High Penetration of Inverter-Based Renewables“
- Assoziierte Editor der IEEE Zeitschrift „IEEE Industrial Electronic Magazine“
- Assoziierte Editor der Springer Zeitschrift „Electrical Engineering – Archiv für Elektrotechnik“
- Mitglied beim „Institute of Electrical and Electronics Engineers“
- Mitglied beim Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

### Walter H. Fietz

- Mitglied des „International Organizing Committee of Symposium of Fusion Technology (SOFT) conference“
- Program Committee Member of HTS4Fusion Conductor Workshop
- IEEE Senior Member
- Mitglied des „IEEE Council of Superconductivity“

### Thomas Giegerich

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

### Jens Hänisch

- Superconductor Science and Technology, Mitglied im Advisory-Board
- European Magnetic Field Laboratory EMFL, Mitglied im User Proposal Selection Committee
- Applied Superconductivity Conference, Mitglied im Programmkomitee Materialien
- Mitglied im 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

- 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

**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
- 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"

**Stylianos 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/Organisator MEM20 10th Workshop in Karlsruhe
- Board Member ICMC (International Cryogenic Materials Conference) Subcommittee International Cryogenic Material Library
- Experte im EUROfusion Scientific & Technical Advisory Committee (STAC)

# Veröffentlichungen

## Fusion (\* WoS und/oder Scopus referiert)

### Vortrag

S. Varoutis, C. Tantos, GPU acceleration of DEMO particle exhaust simulations, 1st Spanish Fusion HPC Workshop Programme, virtual, Nov. 2020.

### Zeitschriftenaufsatz

\* Tantos, Christos; Varoutis, Stylianos; Day, Christian  
Effect of the internal degrees of freedom of the gas molecules on the heat and mass transfer in long circular capillaries;  
Microfluidics and nanofluidics  
doi:10.1007/s10404-020-02400-z

\* Bauer, P; Ballarino, A; Devred, A; et al.  
Development of HTS Current Leads for the ITER Project;  
doi:10.1088/1757-899X/756/1/012032

A. Santucci, M. Incelli, L. Noschese, et al.  
The issue of Tritium in DEMO coolant and mitigation strategies,  
Fusion Engineering and Design  
doi:10.1016/j.fusengdes.2020.111759

A. Frattolillo, L.R. Baylor, Chr. Day, et al.  
Injection of high-speed solid D2 pellets using a "Direct-Line-of-Sight" (DLS)  
guide tube, Fusion Engineering and Design 162 (2021) 112138.  
doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.1121138

C. Neugebauer, Y. Hörstensmeyer, Chr. Day  
Technology Development for Isotope Rebalancing and Protium Removal in the EU-DEMO Fuel Cycle,  
Fusion science and technology  
doi:10.1080/15361055.2019.1704139

P.T. Lang, F. Cismondi, Chr. Day, et al.  
Optimizing the EU-DEMO pellet fuelling scheme,  
Fusion Engineering and Design  
doi:10.1016/j.fusengdes.2020.111591

K. Sedlak, V. A. Anvar, N. Bagrets, et al.  
Advance in the conceptual design of the European DEMO magnet system  
Supercond. Sci. Technol. 33 (2020) 044013  
doi: 10.1088/1361-6668/ab75a909

\* Fischer, U.; Boccaccini, L.V.; Cismondi, F.; et al.  
Required, achievable and target TBR for the European DEMO;  
Fusion engineering and design  
doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111553

\* Hanke, Stefan; Day, Christian; Giegerich, Thomas; et al.  
Progress of the R&D programme to develop a metal foil pump for DEMO;  
Fusion engineering and design  
doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111890

\* Bidulský, Róbert; Bidulská, Jana; Gobber, Federico Simone; et al.  
Case Study of the Tensile Fracture Investigation of Additive Manufactured Austenitic Stainless Steels Treated at Cryogenic Conditions  
Materials  
doi:10.3390/ma13153328

\* Cismondi, F.; Spagnuolo, G.A.; Boccaccini, L.V.; et al.  
Progress of the conceptual design of the European DEMO breeding blanket, tritium extraction and coolant purification systems;  
Fusion engineering and design  
doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111640

\* Lewandowska, Monika; Dembkowska, Aleksandra; Heller, Reinhard; et al.  
Hydraulic characterization of conductor prototypes for fusion magnets  
Cryogenics  
doi:10.1016/j.cryogenics.2019.103013

\* Nickel, Daniel S.; Wolf, Michael J.; et al.  
Mechanical and Electro-Mechanical Investigations of Assembled HTS CroCo Triplets  
IEEE transactions on applied superconductivity  
doi:10.1109/TASC.2020.2972226

\* Tantos, Christos; Varoutis, Stylianos; Day, Christian  
Deterministic and stochastic modeling of rarefied gas flows in fusion particle exhaust systems;  
Journal of vacuum science & technology / B  
doi: 10.1116/6.0000491

\* Zappatore, A.; Heller, R.; Savoldi, L.; et al.  
A new model for the analysis of quench in HTS cable-in-conduit conductors based on the twisted-stacked-tape cable concept for fusion applications  
Superconductor science and technology  
doi: 10.1088/1361-6668/ab895b

- \* Reimerdes, H., Ambrosino, R., Innocente, P., et al.  
Assessment of alternative divertor configurations as an exhaust solution for DEMO  
Nuclear fusion  
doi: 10.1088/1741-4326/ab8a6a
- \* Ying, A., Riva, M., Ahn, M.-Y., et al.  
Recent advances in tritium modeling and its implications on tritium management for outer fuel cycle  
Fusion engineering and design  
doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111895
- \* Tantos, Christos, Varoutis, Stylianos, Day, Christian  
Effect of the internal degrees of freedom of the gas molecules on the heat and mass transfer in long circular capillaries  
Microfluidics and nanofluidics  
doi: 10.1007/s10404-020-02400-z
- \* Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., et al.  
Measurement of the top quark pair production cross section in dilepton final states containing one  $\tau$  lepton in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV  
Journal of high energy physics  
doi:10.1007/JHEP02(2020)191
- \* Romaka, V V, Prikhna, T A, Eisterer, M, et al.  
Structure and properties of MgB<sub>2</sub> bulks: Ab-initio simulations compared to experiment  
IOP conference series / Materials science and engineering  
doi: 10.1088/1757-899X/756/1/012020
- \* Giruzzi, G, Yoshida, M, Aiba, N, et al.  
Advances in the physics studies for the JT-60SA tokamak exploitation and research plan  
Plasma physics and controlled fusion  
doi: 10.1088/1361-6587/ab4771
- \* Hohe, Jörg; Neubrand, Achim; Fliegner, Sascha; et al.  
Performance of fiber reinforced materials under cryogenic conditions—A review;  
Composites / A  
doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106226
- \* Hohe, J.; Schober, M.; Weiss, Klaus-Peter; et al.  
Validation of Puck's failure criterion for CFRP composites in the cryogenic regime;  
CEAS space journal  
doi: 10.1007/s12567-020-00335-3
- \* Hörstensmeyer, Y. N.; Tosti, S.; Santucci, A.; et al.  
Permeator Simulations for the EU-DEMO Fuel Cycle;  
Fusion science and technology  
doi: 10.1080/15361055.2019.1705690
- \* Kvackaj, Tibor; Rozsypalova, Alica; Kocisko, Robert; et al.  
Influence of Processing Conditions on Properties of AISI 316LN Steel Grade;  
Journal of materials engineering and performance  
doi: 10.1007/s11665-020-04561-y
- \* Lang, Peter Thomas; Cismondi, Fabio; Day, Christian; et al.  
Optimizing the EU-DEMO pellet fuelling scheme;  
Fusion engineering and design  
doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111591
- \* Neugebauer, C.; Hörstensmeyer, Y.; Day, C.  
Technology Development for Isotope Rebalancing and Protium Removal in the EU-DEMO Fuel Cycle;  
Fusion science and technology  
doi: 10.1080/15361055.2019.1704139
- \* Obert, Susanne; Kauffmann, Alexander; Seils, Sascha; et al.  
Microstructural and Chemical Constitution of the Oxide Scale formed on a Pesting-Resistant Mo-Si-Ti Alloy; Corrosion science  
doi:10.1016/j.corsci.2020.109081

## Poster

Day, C.; Davis, S.; Hajnal, N.; et al.  
Design of the JT-60SA divertor cryopumps

Igitkhanov, Y.; Day, C.; Varoutis, S.; et al.  
Analytical prediction of particle exhaust in DEMO divertor configurations

Kathage, Yannick; Hanke, Stefan; Vazquez Cortes, et al.  
Utilization of a Cold Plasma Source for the Metal Foil Pump of a Fusion Reactor

Kathage, Y.; Vazquez Cortes, A.; Day, C.; et al.  
Cold plasma source feasibility for a metal foil pump in DEMO

Merli, S.; Kathage, Y.; Hanke, S.; et al.  
Self-consistent modelling of a linear microwave plasma source

Neugebauer, C.; Day, C.  
Material characterisation experiments for isotope rebalancing and protium removal in the EU-DEMO fuel cycle

Schwenzer, J.; Ciattaglia, S.; Day, C.; et al.  
Start-up and operational tritium inventories in the EU DEMO fuel cycle

Siviero, F.; Caruso, L.; Mura, M.; et al.  
Robustness of the performances of NEG pumping solutions for fusion applications

Teichmann, T.; Day, C.; Giegerich, T.  
Overview of the mercury diffusion pump developments for DEMO

Vazquez Cortes, A.; Kathage, Y.; Hanke, S.  
Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Interactions with Group 5 Metals to characterize superpermeation process

Itschner, Harald

Entwicklung von Modellen zur speichergestützten Versorgung mit regenerativen Energien in Inselnetzen  
doi: 10.5445/IR/1000119425

\* Santucci, A.; Incelli, M.; Noschese, L.; et al.

The issue of Tritium in DEMO coolant and mitigation strategies;

Fusion engineering and design

doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111759

\* Tirunilai, A.S.; Hanemann, T.; Weiss, K.-P.; et al.

Dislocation-based Serrated Plastic Flow of High Entropy Alloys at Cryogenic Temperatures;

Acta materialia

doi: 10.1016/j.actamat.2020.09.052

P. Bauer, A. Ballarino, A. Devred, et al.

Development of HTS Current Leads for the ITER Project IOP conference series / Materials science and engineering

doi: 10.1088/1757-899X/756/1/012032

# Veröffentlichungen

## New Power Network Technology (SCI)

(\* WoS und/oder Scopus referiert)

### Buchaufsatz

Kottonau, Dustin; Shabagin, Eugen; De Sousa, Wesley; et al.

Evaluation of the Use of Superconducting 380 kV Cable; 978-3-7315-1026-0

doi: 10.5445/KSP/1000117918

Hänisch, Jens; Iida, Kazumasa

Grain Boundaries in Fe-Based Superconductors in P. Mele et al. (eds.), Superconductivity, Springer Nature, Switzerland;

978-3-030-23302-0

doi: 10.1007/978-3-030-23303-7\_10

### Zeitschriftenaufsatz

\* Karrari, Shahab; Baghaee, Hamid Reza; De Carne, Giovanni; et al.

Adaptive inertia emulation control for high-speed flywheel energy storage systems; IET generation, transmission and distribution

doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0066

\* Benkel, Tara; Lao, Mayraluna; Liu, Yingzhen; et al.

T-A-Formulation to Model Electrical Machines With HTS Coated Conductor Coils;

IEEE transactions on applied superconductivity

doi: 10.1109/TASC.2020.2968950

\* Berrospe-Juarez, Edgar; Trillaud, Frederic; Zermeño, Víctor M R; et al.

Screening Current-Induced Field and Field Drift Study in HTS coils using T-A homogenous model;

Journal of physics / Conference series

doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012128

\* Berrospe-Juarez, Edgar; Trillaud, Frederic; Zermeño, Víctor M. R.; et al.

Screening Currents and Hysteresis Losses in the REBCO Insert of the 32 T All-Superconducting Magnet Using T-A Homogenous Model;

IEEE transactions on applied superconductivity

doi: 10.1109/TASC.2020.2969865

\* Boll, Martin; Corduan, Matthias; Biser, Stefan; et al.

A holistic system approach for short range passenger aircraft with cryogenic propulsion system;

Superconductor science and technology

doi: 10.1088/1361-6668/ab7779

\* Cheng, Y.; Qu, R.; Gao, Y.; et al.

Comparison of electromagnetic performance of 10-MW HTS double-stator flux modulation wind generators with different topologies;

Superconductor science and technology

doi: 10.1109/TASC.2020.2975153

\* Corduan, Matthias; Boll, Martin; Bause, Roman; et al. Topology Comparison of Superconducting AC Machines for Hybrid Electric Aircraft;

IEEE transactions on applied superconductivity

doi: 10.1109/TASC.2019.2963396

\* Filipenko, M.; Biser, S.; Boll, M.; Corduan, M.; Noe, M.; Rostek, P. et al.

Comparative analysis and optimization of technical and weight parameters of turbo-electric propulsion systems; 2226-4310

Aerospace

doi: 10.3390/AEROSPACE7080107

\* Grilli, Francesco; Benkel, Tara; Hänisch, Jens; et al.

Superconducting motors for aircraft propulsion: the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project;

Journal of physics / Conference series

doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051

\* Grilli, Francesco; Pardo, Enric; Morandi, Antonio; et al. Electromagnetic Modeling of Superconductors With Commercial Software: Possibilities With Two Vector Potential-Based Formulations;

IEEE transactions on applied superconductivity

doi: 10.1109/TASC.2020.3013028

\* Grilli, Francesco; Rizzo, Enrico

A numerical model to introduce students to AC loss calculation in superconductors;

European journal of physics

doi: 10.1088/1361-6404/ab90dc

\* Gyuráki, R.; Schreiner, F.; Benkel, T.; et al.

Fluorescent thermal imaging of a quench in insulated and non-insulated REBCO-wound pancake coils following a heater pulse at 77 K;

Superconductor science and technology

doi: 10.1088/1361-6668/ab6dc0

\* Kottonau, Dustin; Wolf, Michael; Fietz, Walter; et al.

Feasibility of ultra-compact HTS CrossConductor based Power Transmission Cables;

Journal of Physics: Conference Series

doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012084

- \* Otten, Simon; Kario, Anna; Demenčik, Eduard; et al. Anisotropic monoblock model for computing AC loss in partially coupled Roebel cables; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/ab9939
- \* Riva, N.; Sirois, F.; Lacroix, C.; et al. Resistivity of REBCO tapes in overcritical current regime: Impact on superconducting fault current limiter modeling; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/aba34e
- \* Ruebeling, Jascha; Grohmann, Steffen Flow-induced noise generation at the outlet of a capillary tube = Génération de bruit provoquée par l'écoulement à la sortie d'un tube capillaire; International journal of refrigeration doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.11.021
- \* Schreiner, Fabian; Liu, Yingzhen; Zhang, Yuanzhi; et al. Development of no-insulation racetrack coils wound with second generation high temperature superconductor tapes for a stator system for wind generators; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/aba34e
- \* Shabagin, E.; Raczka, K.; Grohmann, S. Investigation of cryogenic mixed-refrigerant cooled current leads in combination with peltier elements; IOP conference series / Materials science and engineering doi: 10.1088/1757-899x/755/1/012138
- \* Shen, Boyang; Grilli, Francesco; Coombs, Tim Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications; IEEE access doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
- \* Shen, Boyang; Grilli, Francesco; Coombs, Tim Review of the AC loss computation for HTS using H formulation; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/ab66e8
- \* Tamson, J.; Blanck, P.; Grohmann, S. Commissioning of the Cryogenic Phase Equilibria Test Stand CryOPHAEQTS; IOP conference series / Materials science and engineering doi: 10.1088/1757-899x/755/1/012150
- \* Thomas, Ingo; Wunderlich, Bernd; Grohmann, Steffen Pressure-driven dynamic process simulation using a new generic stream object; Chemical engineering science doi: 10.1016/j.ces.2019.115171
- \* Troshyn, Oleksiy; Hoffmann, Christian; Große, Veit; et al. Parameter boundaries for the heteroepitaxial growth of REBCO films by e-beam quantitative evaporation on inclined substrate deposited MgO buffered Hastelloy tapes; Journal of Physics: Conference Series doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012035
- \* Uglietti, Davide; Kang, Rui; Wesche, Rainer; et al. Non-twisted stacks of coated conductors for magnets: Analysis of inductance and AC losses; Cryogenics doi: 10.1016/j.cryogenics.2020.103118
- \* Vargas-Llanos, Carlos Roberto; Lengsfeld, Sebastian; Grilli, Francesco T-A Formulation for the Design and AC Loss Calculation of a Superconducting Generator for a 10 MW Wind Turbine; IEEE access doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038058
- \* Weber, C.; Henriques, A.; Schirle, S.; et al. Measurement of heat flux in multi-layer insulated helium cryostats after loss of insulating vacuum; IOP conference series / Materials science and engineering doi: 10.1088/1757-899x/755/1/012155
- \* Weiss, K.-P.; Fietz, W. H.; Heiduk, M.; et al. Development and test of a 35 kA - HTS CroCo cable demonstrator; Journal of physics / Conference series doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012082
- \* Bühler, Carl; Holzapfel, Bernhard; Sailer, Bernd; et al. Challenges and Perspectives of the Phase Formation of Internally Oxidized PIT-Type Nb<sub>3</sub>Sn Conductors; IEEE transactions on applied superconductivity doi: 10.1109/TASC.2020.2969906
- \* Cayado, Pablo; Li, Minjuan; Erbe, Manuela; et al. REBCO mixtures with large difference in rare-earth ion size: superconducting properties of chemical solution deposition-grown Yb<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> films; Royal Society Open Science doi: 10.1098/rsos.201257
- \* Cayado, Pablo; Rijckaert, Hannes; Erbe, et al. CSD-Grown Yv<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>-BaHfO<sub>3</sub> Nanocomposite Films on Ni5W and IBAD Technical Substrates; Nanomaterials doi: 10.3390/nano10010021
- \* Cayado, Pablo; Rijckaert, Hannes; Thersleff, Thomas; et al. Improved Performance of CSD-Grown Y<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>-BaHfO<sub>3</sub> Nanocomposite Films on Ni5W Substrates; IEEE transactions on applied superconductivity doi: 10.1109/TASC.2020.2966429
- \* Cayado, Pablo; Rijckaert, H.; Bruneel, E.; et al. Importance of the pyrolysis for microstructure and superconducting properties of CSD-grown GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>-HfO<sub>2</sub> nanocomposite films by the ex-situ approach; Scientific reports doi: 10.1038/s41598-020-75587-4
- \* de Sousa, W. T. B. ; Kudymow, A.; Strauss, S.; et al. Simulation of the Thermal Performance of HTS Coated Conductors for HVDC SFCL; Journal of physics / Conference series doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012097

- \* Díez-Sierra, J.; López-Domínguez, P.; Rijckaert, H.; et al. High Critical Current Density and Enhanced Pinning in Superconducting Films of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Nanocomposites with Embedded  $\text{BaZrO}_3$ ,  $\text{BaHfO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ , and  $\text{SrZrO}_3$  Nanocrystals; ACS applied nano materials doi: 10.1021/acsanm.0c00814
- \* Erbe, M.; Cayado, P.; Freitag, W.; et al. Comparative study of CSD-grown BCO films with different rare earth elements: processing windows and  $T_c$ ; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/ab9aa0
- \* Grünewald, Lukas; Langer, Marco; Meyer, Sven; et al. Structural and chemical properties of superconducting Co-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  thin films grown on  $\text{CaF}_2$  Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/abcecf
- Jens Hänisch, Yulong Huang, Dong Li, et al. Anisotropy of flux pinning properties in superconducting (Li,Fe)OHFeSe thin films, Supercond. Sci. Technol. 33 (2020) 114009 doi: 10.1088/1361-6668/abb11
- \* Hayasaka, R.; Cayado, P.; Erbe, M.; et al. Investigation of the crystallization process of CSD-ErBCO on IBAD-substrate via DSD approach; Scientific reports doi: 10.1038/s41598-020-76848-y
- \* Iida, K.; Hänisch, J.; Yamamoto, A. Grain boundary characteristics of Fe-based superconductors; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/ab73ef
- \* Kapolka, Milan; Pardo, Enric; Grilli, Francesco; et al. Cross-field demagnetization of stacks of tapes: 3D modelling and measurements; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/ab5aca
- \* Kolb-Bond, Dylan J; Berrospe-Juarez, Edgar; et al. Computing Strains Due to Screening Currents in REBCO Magnets; IEEE transactions on applied superconductivity doi: 10.1109/TASC.2020.2979396
- \* Li, Minjuan; Cayado, Pablo; Erbe, Manuela; et al. Rapid Pyrolysis of  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Films in CSD-MOD Using Extremely-Low-Fluorine Solutions; Coatings doi: 10.3390/coatings10010031
- \* Meyer, Sven; Langer, Marco; Grünewald, Lukas; et al. 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 Journal of Physics: Conference Series doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012052
- \* Pallecchi, Ilaria; Tarantini, Chiara; Hänisch, Jens; et al. Preface to the special issue 'Focus on 10 Years of Iron-Based Superconductors'; Superconductor science and technology doi: 10.1088/1361-6668/ab9ad2
- \* Popov, Ruslan; Ackermann, Kai; Rijckaert, H.; et al. Effect of oxygenation process on flux pinning in pristine and  $\text{BaHfO}_3$  nanocomposite  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  superconducting thin films; Journal of Physics: Conference Series doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012038
- \* Rijckaert, Hannes; Cayado, Pablo; Nast, Rainer; et al. Superconducting  $\text{HfO}_2$ - $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Nanocomposite Films Deposited Using Ink-Jet Printing of Colloidal Solutions; Coatings doi: 10.3390/coatings10010017
- Busch, Lennard; Lietzow, Ralph; Neumann, Holger Heat load budgeting of a superconducting induction heater's commercial cryocooler-based cryostat Deutsche Kälte- und Klimatagung
- \* Arzamasov, Vadim; Schwerdt, Rebecca; Karrari, Shahab; et al. Privacy Measures and Storage Technologies for Battery-Based Load Hiding - an Overview and Experimental Study; e-Energy '20: Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems, Melbourne, Australia, 22 - 26 June 2020 978-1-4503-8009-6 doi: 10.1145/3396851.3398320
- \* Longo, L.; Bruno, S.; Carne, Giovanni De; et al. Modelling and performance evaluation of smart transformer in distribution grids; 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2-6 August 2020, online 978-1-72815-508-1 doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281646
- \* Afshari, A.; Karrari, M.; Baghaee, H. R.; et al. Cooperative Fault-Tolerant Control of Microgrids under Switching Communication Topology; IEEE transactions on smart grid doi: 10.1109/TSG.2019.2944768
- \* Bruno, Sergio; De Carne, Giovanni; La Scala, Massimo Distributed FACTS for Power System Transient Stability Control; Energies doi: 10.3390/en13112901
- \* Langwasser, Marius; De Carne, Giovanni; Liserre, Marco; et al. Primary Frequency Regulation using HVDC terminals controlling Voltage Dependent Loads; IEEE transactions on power delivery doi: 10.1109/TPWRD.2020.2990565

\* Andresen, M.; De Carne, G.; Liserre, M.  
Load-Dependent Active Thermal Control of Grid-Forming Converters;  
IEEE transactions on industry applications  
doi: 10.1109/TIA.2020.2966573

\* Barthlott, D; Huang, K Y; Durrell, J H; et al.  
Numerical optimisation of mechanical ring reinforcement for bulk high-temperature superconductors;  
Journal of Physics: Conference Series  
doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012031

Giacomuzzi, Stefano; Langwasser, Marius; De Carne, Giovanni; et al.  
Smart transformer-based medium voltage grid support by means of active power control; 2096-3564  
CES Transactions on Electrical Machines and Systems  
doi: 10.30941/CESTEMS.2020.00035

\* Hänisch, Jens; Huang, Y.; Li, D.; et al.  
Anisotropy of flux pinning properties in superconducting (Li,Fe)OHFeSe thin films;  
Superconductor science and technology  
doi: 10.1088/1361-6668/abb118

\* Tirunilai, A.S.; Hanemann, T.; Reinhart, C.; et al.  
Comparison of cryogenic deformation of the concentrated solid solutions CoCrFeMnNi, CoCrNi and CoNi;  
Materials science and engineering / A  
doi: 10.1016/j.msea.2020.139290

## Proceedingsbeitrag

\* Biser, Stefan; Atanasov, Georgi; Hepperle, Martin; et al.  
Design Space Exploration Study and Optimization of a Distributed Turbo-Electric Propulsion System for a Regional Passenger Aircraft;  
2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, EATS 2020, New Orleans, United States, 26 - 28 August 2020  
978-162410605-7  
AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, 9–11 August 2021, Sheraton Denver Downtown, Denver, CO  
978-1-62410-602-6  
doi: 10.2514/6.2020-3592

\* Wolf, M. J.; Fietz, W. H.; Heiduk, M.; et al.  
HTS CroCo – A Strand for High Direct Current Applications;  
32nd International Symposium on Superconductivity, ISS 2019; Kyoto International Exhibition Hall Kyoto; Japan; 3 December 2019 through 5 December 2019  
doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012020

\* Ainslie, Mark; Grilli, Francesco; Quéval, Loïc; et al.  
A new benchmark problem for electromagnetic modeling of superconductors: the high- $T_c$  superconducting dynamo;  
Superconductor science and technology  
doi: 10.1088/1361-6668/abae04  
37.06.02 (POF III, LK 01)

\* Ackermann, Kai, Mai, Vadim, Hänisch, Jens, et al.  
Effects of Zn doping on the pinning potential and the glass-liquid transition temperature of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$  films  
Journal of Physics: Conference Series  
doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012044

Karrari, Shahab; Vollmer, Michael; De Carne, Giovanni; et al.  
A Data-driven Approach for Estimating Relative Voltage Sensitivity;  
IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM 2020)  
doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281859

## Poster

Wolf, Michael J.; Fietz, Walter, H.; Heiduk, Mathias; et al.  
Current redistribution in a superconducting multi-strand 35kA DC cable demonstrator  
Applied Superconductivity Conference (ASC 2020), Tampa, FL, USA, 28.06.2020–03.07.2020

# Veröffentlichungen

## Eingeladene Vorträge

### Christian Day

- Chr. Day et al., The challenges of fuelling and pumping of fusion reactor plasmas, European Fusion Programme Workshop, virtual, Dec. 2020.

### Mathias Noe

- M. Noe, „High-Temperature Superconducting Power Applications to meet major Challenges in Energy Systems“, 10th Asian Cryogenics and Applied Superconductivity Conference (ACASC), 2nd International Cryogenic Materials Conference in Asia (Asian-ICM, 6–9. Januar 2020, Okinawa , Japan
- M. Noe, „Technische und wirtschaftliche Bewertung supraleitender 380 kV Kabel für die Teilerdverkabelung von Teilstrecken im Netzentwicklungsplan“, Tagung Zukünftige Stromnetze, 29.–30.01.2020, Berlin
- M. Noe, „Wirtschaftlichkeit von HTSL Kabeln am Beispiel einer 380 kV Teilerdverkabelung“, Zukunft und Innovation der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern, 5.–6.03.2020, Berlin

# Veröffentlichungen

## Schutzrechtsbestände

(\* Neue Schutzrechtsanmeldungen in 2020)

\*\* Schutzrechtserteilungen mit Wirkung für Deutschland in 2020

### **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

US 8255023

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

Schneider, Theo

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 10194360  
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

DE 2983218  
US 10153071

### **Schienengebundene Magnetschwebbahn**

Holzappel, 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 3341945  
FR 3341945  
GB 3341945  
US 15/754,298

**Supraleitfähiger Leiter und Verwendung des supraleitfähigen Leiters**

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

CN 10814458  
DE 102015010636.8  
EP 16757151.2  
US 10825585

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

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

CN 10814961  
DE 102015010634.1  
EP 16756585.2  
US 10218090

**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

DE 3352303  
FR 3352303  
GB 3352303

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

Gomse, David; Grohmann, Steffen

DE 3385656  
FR 3385656  
GB 3385656  
US 16/500,819

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

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

DE 3441129  
DE 102017213886.6  
GB 3441129

**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

**Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung kryogener Temperaturen und ihre Verwendung**

Gomse, David; Grohmann, Steffen; Shabagin, Eugen

DE 102020205183.6  
WO

**Stromzuführung und Verfahren zur ihrer Herstellung**

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

DE 102020205184.4  
WO

**Bitterprinzipbasierte Magnetvorrichtung und Verwendung einer bitterprinzipbasierten Magnetvorrichtung**

Arndt, Tabea

DE 102020124852.0

**Bandleitervorrichtung und Kabel, das die Bandleitervorrichtung aufweist**

Arndt, Tabea

DE 102020128417.9

# 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 März 2021

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