

# ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung  
Jahresbericht 2023



## IMPRESSUM

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

Telefon +49 721/608-23501

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

### TEXTE:

Tabea Arndt, Giovanni De Carne,  
Christian Day, Stefan Fink, Thomas Giegerich,  
Francesco Grilli, Jens Hänisch, Bernhard  
Holzapfel, Frank Hornung, Andrej Kudymow,  
Ralph Lietzow, Mathias Noe, Quoc Pham,  
Stylios Varoutis, Klaus Weiss, Michael Wolf

### REDAKTION:

Ingeborg Meyer

### FOTOS UND GRAFIKEN:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### TITELBILD:

Vorbereitung einer HTS Bandleiter-  
beschichtung auf hochtexturierten IBAD  
Metallbandsubstraten im Rahmen der  
KIT-CERN Kollaboration KC<sup>4</sup>

### GESTALTUNG:

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

### DRUCK:

Stober Medien GmbH, 76344 Eggenstein

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

Mai 2024



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001



# Inhalt



**4–5** VORWORT

**6–31** ERGEBNISSE AUS DEN FORSCHUNGSFELDERN

**6** Supraleiter- und Kryomaterialien

**12** Energietechnische Anwendungen der Supraleitung

**18** Supraleitende Magnettechnologie

**26** Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

**32** PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

**33** ABGESCHLOSSENE DOKTORARBEITEN



**34–36** LEHRE UND BILDUNG

**37–40** ZAHLEN, FAKTEN, DATEN

**41–60** VERÖFFENTLICHUNGEN

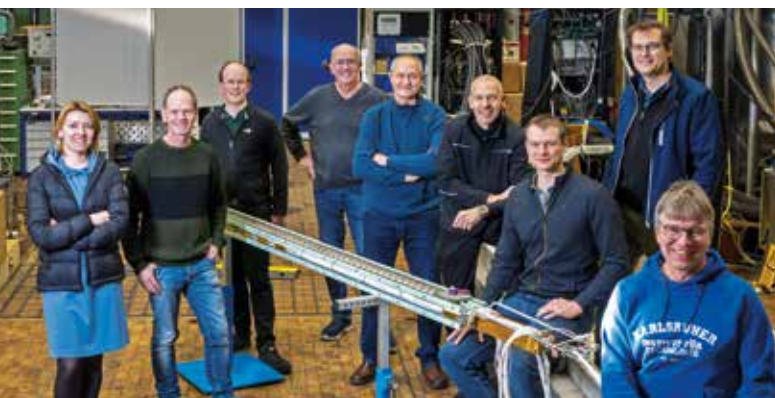
**41** Fusion

**44** Materials and Technologies  
for the Energy Transition (MTET)

**47** Programm Energiesystemdesign (ESD)

**48** Eingeladene Vorträge

**49** Schutzrechtsbestände



**51** KONTAKT



# 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 sowie
- Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes

Die Arbeiten des ITEP sind langfristig in den Programmen „Fusion“, „Materialien und Technologien für die Energiewende“, „Energiesystemdesign“ und „Materie und Universum“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren verankert.

Zur Bearbeitung der komplexen und zumeist multidisziplinären Aufgaben stehen sehr große und einzigartige Versuchseinrichtungen, Labore und die entsprechende technische Infrastruktur zur Verfügung, die beständig an die veränderten Anforderungen und Fragestellungen angepasst wird.

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 und

- Kryogene Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei sehr tiefen Temperaturen.

2023 erfolgte ein Ruf an W1-TT Prof. Dr. Giovanni de Carne auf eine W3-Professur für Echtzeitsysteme in der Energietechnik am KIT. Dadurch wird die langfristige Einbindung unserer Arbeiten auf diesem Gebiet sichergestellt und die wissenschaftliche Qualität von Prof. Dr. Giovanni de Carne ausgezeichnet. Wir gratulieren ihm für diesen Ruf und freuen uns auf die weitere kollegiale Zusammenarbeit.

Weiterhin ergaben sich 2023 für unser Institut sehr schöne wissenschaftliche Ergebnisse, eine Vielzahl erfolgreicher Entwicklungsprojekte und einige besondere Herausforderungen und Ereignisse, auf die wir im Folgenden kurz eingehen.

Im Forschungsfeld **Supraleiter- und Kryomaterialien** ist die Untersuchung neuer Supraleiter ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. 2023 wurde eine umfangreiche Studie zur chemischen Komposition von  $\text{BaHfO}_3$ -Nanopartikeln in verschiedenen gemischten  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Phasen abgeschlossen. Hier konnte gezeigt werden, dass das Mischen der Seltenen Erden (*RE*) für eine zusätzliche Pinning-Krafterhöhung sowie eine Verbesserung der Bestrahlungsbeständigkeit sorgt. Im Rahmen einer langjährigen Kooperation mit CERN konnte die Pilotproduktion von Hochtemperatur-Supraleitern der Firma Bruker am KIT aufgebaut und 2023 erfolgreich in Betrieb genommen werden. Das weitere Ziel besteht in der Verbesserung der Materialparameter und der Herstellung spezieller Bandleiterarchitekturen.

Das Verbundprojekt AdHyBau (Additive Hybride Bauweisen) wurde 2023 erfolgreich abgeschlossen. Am ITEP wurden im Wesentlichen Materialkennwerte von 4 bis 400 K bestimmt und in Kombination mit Mikrostrukturuntersuchungen die Herstellungsparameter verstanden (Korngröße, Defekte, Porosität). Die Daten stehen in einer Datenbank zur Verfügung, die direkt in eine Auslegungssoftware eingelesen werden können.

Im Forschungsfeld **Energietechnische Anwendungen** wurde erstmals eine Brückenschaltung mithilfe des dynamischen Widerstandes von Supraleitern realisiert. Das weitere Ziel ist, die Spannung der Schaltung weiter zu erhöhen und perspektivisch supraleitende Umrichter für Hochstromanwendungen zu entwickeln. Die Arbeiten am ITEP von zwei Verbundprojekten zur Entwicklung einer supraleitenden Industrie-Stromschiene mit einer Stromstärke von 200.000 A und eines supraleitenden Magnetheizers konnten 2023 erfolgreich weitergeführt werden, damit die finale Inbetriebnahme durch die Industriepartner durchgeführt werden kann. Bei der Simulation von Hochtemperatur-Supraleitern konnte bei der oft verwendeten helikalen Anordnung der Strompfad besser verstanden werden. Dies dient dazu, die Wechselstromverluste genauer zu berechnen. Im Forschungsthema „Echtzeitsystemintegration“ wurde ein Horizon-Europe-Projekt „Research Facility 2.0“ im Wert von 5 Millionen Euro erfolgreich beantragt, das 2024 anlaufen wird. In Zusammenarbeit mit fünf der größten Beschleuniger in Europa (ALBA, CERN, DESY, HZB, MAX IV) werden Themen der Energieeffizienz von der Komponentenebene bis zur Systemebene sowohl für die Physik

als auch für die Energietechnik untersucht und konkrete Lösungen vorgeschlagen, die in Demonstrationsanlagen an den Beschleunigeranlagen experimentell validiert werden.

Eine wichtige Aufgabe im **Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie** ist die Entwicklung hochtemperatursupraleitender Magnete. Am Institut existiert eine Apparatur zum robotischen Wickeln von nicht planaren hochtemperatursupraleitenden Magneten. Für diese Apparatur wurde im Jahr 2023 eine neue und verbesserte Wickelhand realisiert, mit der im kommenden Jahr weitere Wicklungen hergestellt werden. Für eine hybride Energiepipeline für Strom und Flüssigwasserstoff wurde ein erstes konzeptionelles Design erstellt, auf dessen Basis die weitere technische und wirtschaftliche Bewertung erfolgt. Für die am KIT patentierte Anordnung des „Disk-up-down-assembly“ (DUDA) von Hochtemperatur-Supraleitern wurde eine rotierende Maschine ausgelegt und weitere verbesserte Bandstapel hergestellt. Weiterhin wurde aufgezeigt, wie sich die Wechselstromverluste in dieser Anordnung deutlich reduzieren lassen.

Prof. Dr. Tabea Arndt wurde der IEEE-Preis für kontinuierliche und bedeutende Beiträge in der angewandten Supraleitung verliehen.



Damit werden ihre langjährigen, herausragenden technischen und wissenschaftlichen Leistungen sehr herausgehoben gewürdigt.

Im Forschungsfeld **Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufes** entwickeln wir grundlegend neue Vakuumtechnologien und Verfahren zur Tritiumextraktion und Rückgewinnung. Mit dem am ITEP entwickelten Simulator für den Brennstoffkreislauf eines Fusionskraftwerkes wurden beispielhaft Anfahrampen des Plasmas simuliert und unter anderem gezeigt, dass Heliumspitzen am Eingang zu Tritiumspitzen am Auslass führen. Im Oktober konnten die am ITEP entwickelten und von einem Industriepartner hergestellten Kryopumpen für das japanische Fusionsexperiment JT60-SA geliefert werden. Für den Divertor-Test-Tokamak in Italien wurden die Vakuumsysteme modelliert und aufgrund der Ergebnisse einige Designänderungen durchgeführt. Weiterhin konnte für die Metallfolienpumpen für DEMO die beste Konfiguration gefunden werden. Die am Institut entwickelte Methode des „Direct Internal Recycling“ für den Brennstoffkreislauf von DEMO wird nun auch im großen Maßstab aufgebaut. Dazu wurden die Planungen zum „Direct Internal Recycling Development Platform Karlsruhe“ (DIPAK) überarbeitet und erste Bauplanungen konkret begonnen. Diese Anlage baut zwei der drei Kreisläufe des Brennstoffkreislaufs nach und enthält alle neuen Technologien wie die Pelletinjektion, die Metallfolienpumpen, die Quecksilberpumpen und die Temperaturwechselabsorption zur Isotopentrennung.

2023 wurden in der **Ausbildung** 30 Doktorarbeiten, 18 Masterarbeiten und zehn Bachelorarbeiten vom ITEP betreut.

Die genannten und in dem Bericht zusammengefassten Ergebnisse wären ohne den Einsatz und das Engagement unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und ohne die vielfältige und fruchtbare Zusammenarbeit mit unseren Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie nicht möglich gewesen. Dafür unser ganz besonderer Dank. Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit 2024 und wünschen Ihnen alles Gute.

Herzlich

Ihre Institutsleitung

Mathias Noe

Bernhard Holzapfel

Tabea Arndt



# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Das ITEP-KC<sup>4</sup>-Team im neu in Betrieb  
genommenen Laborbereich zur Synthese von  
HTS-Bandleiterstrukturen mittlerer Länge.

# Supraleiter- und Kryomaterialien

Koordination: Prof. Dr. Bernhard Holzapfel

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

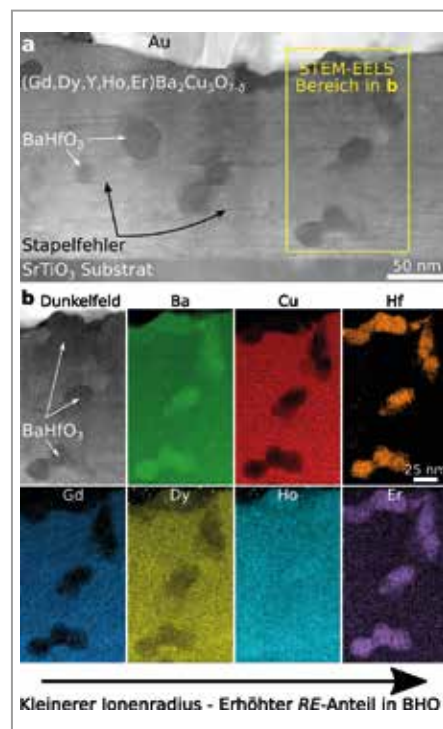
- Supraleitende Materialien
- Leiter- und Kabeltechnologien
- Struktur- und Funktionsmaterialien für Kryonanwendungen

## SUPRALEITENDE MATERIALIEN HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITER

Auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleiter haben wir unsere Untersuchungen zur exakten Sauerstoffbestimmung in dünnen Schichten mittels Röntgenbeugung (XRD) und TOF-SIMS fortgesetzt, die Studien zur Mischung der Seltenen Erde *RE* in  $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ - $BaHfO_3$ -Nanokompositen veröffentlicht und Schichten auf verschiedene Bandproben mittels gepulster Laserdeposition und chemischer Lösungsabscheidung abgeschieden sowie deren Sauerstoffbelastung optimiert.

Die Kombination mehrerer Seltenerd-elemente (*REs*) auf dem *RE*-Gitterplatz in *REBCO*-Schichten kann sich positiv auf die supraleitenden Eigenschaften auswirken. Die Hauptschwierigkeit bei der Herstellung solcher Schichten besteht in der Optimierung der Herstellungsparameter, da sich diese für jedes Seltenerd-element unterscheiden. Zudem werden zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit oft Nanopartikel als Pinning-Zentren, zum Beispiel  $BaHfO_3$  (BHO), eingebaut. Diese sollen idealerweise nicht chemisch mit der umgebenden *REBCO*-Schicht reagieren. In der Realität finden allerdings Diffusionsprozesse zwischen BHO und *REBCO* statt, was in einer diesjährigen Publikation erstmals im Detail untersucht wurde [1]. Am ITEP wurden dafür *REBCO*-Schichten mit unterschiedlichen *REs* mittels chemischer Lösungsabscheidung hergestellt und anschließend am Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) untersucht.

Abbildung 1a zeigt eine rastertransmissionselektronenmikroskopische (STEM) Querschnittsaufnahme einer (Gd,Dy,Y,Ho,Er) *BCO*-Schicht mit eingebetteten BHO-Nanopartikeln. Die Partikel erscheinen mit geringerer Bildintensität und runder Form. Dunkle horizontale Linien sind Stapelfehler, die hauptsächlich von den BHO-Partikeln erzeugt werden und ebenfalls als Pinning-Zentren wirken können. Die verschiedenfarbigen Elementverteilungskarten (Abbildung 1b), die durch Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS) erstellt wurden, zeigen, dass die Seltenerd-elemente (untere Reihe) in



**Abb. 1:** (a) STEM-Dunkelfeldabbildung einer Querschnittsprobe einer *REBCO*-Schicht mit gemischten *REs*. Die BHO-Partikel und Stapelfehler sind mit geringerer Bildintensität erkennbar. (b) Die STEM-EELS-Elementverteilungskarten zeigen den Einbau von *REs* in die BHO-Partikel in Abhängigkeit der *RE*-Ionenradien.

unterschiedlicher Konzentration in die BHO-Partikel (vgl. Hf-Karte) eingebaut sind. Dieser Effekt kann dazu führen, dass die *REs* bei der Bildung der *REBCO*-Kristallstruktur fehlen oder sich die Gitterkonstante und damit das effektive Volumen der BHO-Partikel verändern. Ein Trend in Signalintensität mit abnehmendem Ionenradius von Gd bis Er in BHO zeigt, dass *REs* mit kleinerem Ionenradius stärker in die BHO-Partikel eingebaut werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur Verbesserung der Herstellung von *REBCO*-BHO-Nanokompositenschichten genutzt, um leistungsfähigere supraleitende Schichten zu erzeugen.

Wie kürzlich für durch gepulste Laserdeposition (PLD) abgeschiedene  $GdBa_2Cu_3O_7$  (*GdBCO*)-Schichten auf  $MgO$ -Einkristallen gezeigt wurde, kann durch eine Ex-situ-Sauerstoffbelastung die kritische Stromdichte  $J_c$  bei tiefen Temperaturen und hohen Feldern erhöht und sogar maßgeschneidert werden [2]. Um die Eigenschaften von *REBCO*-Bandleitern weiter zu verbessern, wurde daher die Sauerstoffbelastung auch von *GdBCO*-Dünnschichten untersucht, die durch PLD auf metallischen Bändern abgeschieden wurden. Ähnlich wie auf Einkristallen wurden die optimalen Wachstumsbedingungen als  $T_{sub} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $f = 10 \text{ Hz}$  und  $p_{O_2} = 0,4 \text{ mbar}$  ermittelt. Anschließend wurden drei Sauerstoff-Glühverfahren untersucht: (1) In situ: Abkühlung in  $0,4 \text{ mbar O}_2$  auf  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , 30 min in  $0,4 \text{ bar O}_2$ , (2) Ex situ lang: Abkühlung in  $0,4 \text{ mbar O}_2$  auf Raumtemperatur, Transfer in einen Rohrofen, Erwärmen in 1 bar Ar auf  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , dann Abkühlung auf  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , Glühung bei 1 bar und 2000 ml/min Sauerstoff, (3) Ex situ kurz: wie ex situ lang, ohne Aufheizen auf  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Unterschiede

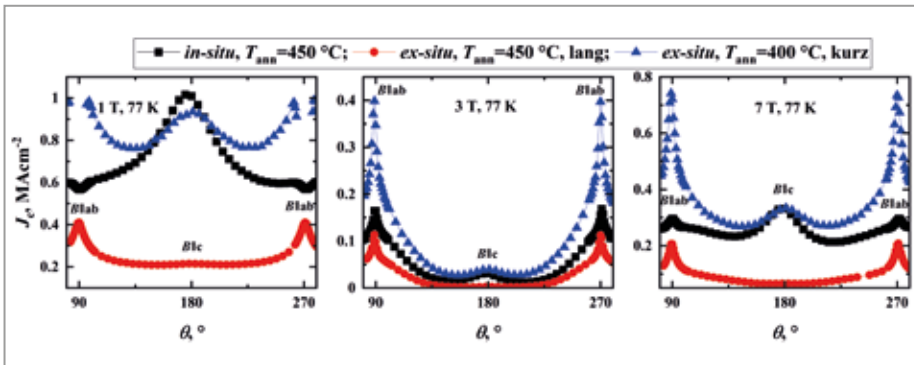


Abb. 2: Anisotropie der kritischen Stromdichte für GdBCO-Schichten auf metallischen Bändern in Abhängigkeit von der Sauerstoffbeladungsroute.

in den Transporteigenschaften der so verschieden getemperten Schichten sind in [Abbildung 2](#) für  $T = 77 \text{ K}$  illustriert, in der die Anisotropien der kritischen Stromdichte bezüglich der Magnetfeldrichtung (Winkel  $\theta$  zur  $c$ -Achse) gezeigt werden. Während die lang ex-situ-sauerstoffbeladene Probe generell kleinere  $J_c$ -Werte zeigt, ist bei der kurz ex-situ-beladenen Probe insbesondere eine Verbesserung für  $B_{||ab}$ , also Magnetfelder in der Bandedebene, zu erkennen. Dies lässt sich durch das Ausheilen von Defekten bei erhöhten Temperaturen und/oder längeren Zeiten beziehungsweise durch das Entstehen von  $ab$ -Stapelfehlern bei niedrigen Temperaturen erklären. Genauere mikroskopische Untersuchungen stehen jedoch noch aus.

Da sich  $\text{LaMnO}_3$  anstatt  $\text{CeO}_2$  als letzte Pufferschicht bei der Bandleiterherstellung als Standard durchzusetzen scheint, wurden im Rahmen einer Masterarbeit durch chemische Lösungsabscheidung ErBCO- und YBCO-Schichten auf  $\text{LaMnO}_3$ -gepufferten Bändern mithilfe von Definite Screening Design (DSD) hinsichtlich kritischer Temperatur und Stromdichte erfolgreich optimiert.

Weiterhin, ebenfalls in einer Masterarbeit, wurde Data Diver, ein Programm zur Zusammenführung und Analyse von großen Messdatensätzen, entwickelt. Mit Data

Diver können nun zuvor schwer zugängliche Zusammenhänge untersucht werden. Durch automatisierte Identifikation, Zuordnung und Analyse der Messdaten sowie die Einbindung meteorologischer und materialwissenschaftlicher Datenbanken konnten bereits neue Einsichten in unsere langjährig gesammelten Messdatensätze gewonnen werden. So scheint die mittlere kritische Stromdichte von CSD-gewachsenen Schichten periodisch von der Jahreszeit abzuhängen ([Abbildung 3](#)), was durch Variationen der Luftfeuchte erklärbar sein könnte.

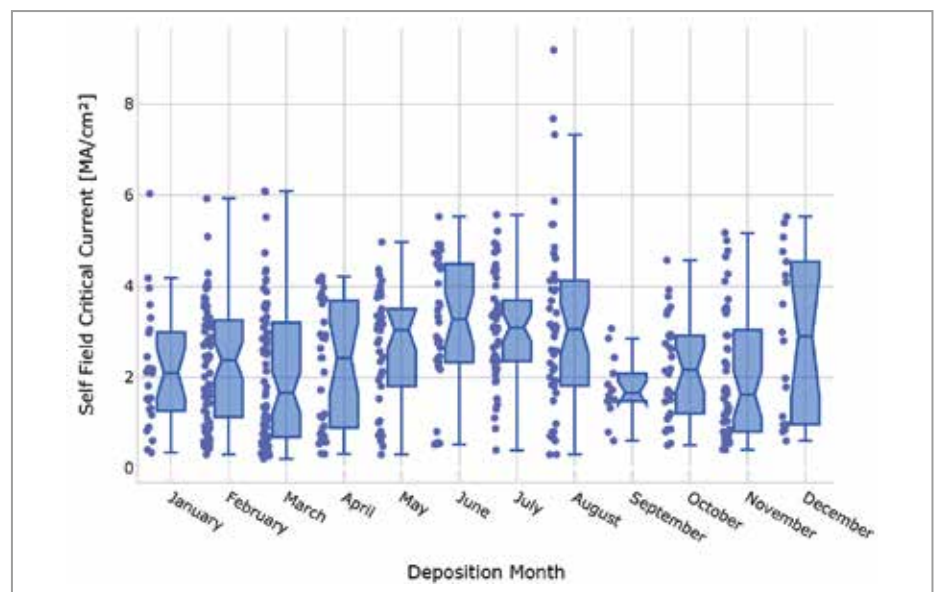


Abb. 3: Variation der mittleren kritischen Stromdichte von REBCO-Schichten mit dem Monat der Probenherstellung in der CSD.

## FE-BASIERTE SUPRALEITER

Auf dem Gebiet der Fe-basierten Supraleiter haben wir uns im Rahmen eines DFG-Projekts weiterhin mit der Herstellung von  $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ -Dünnschichten mittels gepulster Laserdeposition beschäftigt, wobei insbesondere apparative Verbesserungen für eine genauere und reproduzierbarere Substrattemperaturmessung im Vordergrund standen. Die Kollaborationen mit dem Institute of Physics, Chinese Academy of Science, und der Nihon University, Japan, wurden durch Transportmessungen an Einkristall- und Dünnschichtproben der Partner fortgesetzt.

Für eine Zusammenarbeit mit der Universität Rom III wurden im Rahmen einer Masterarbeit Co-dotierte  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ -Schichten auf verschiedenen Einkristall- und Bandsubstraten abgeschieden und die Depositionsparameter optimiert mit dem langfristigen Ziel, kostengünstige Fe-basierte Bandsupraleiter zu ermöglichen.

Der derzeitige Stand der Wissenschaft zur Deposition Fe-basierter Supraleiterdünnschichten konnte in einem Review-Artikel dargestellt und veröffentlicht werden [3].



## BANDSTAPELMAGNETE

In einem AiF-/ZIM-geförderten Projekt „Neuartige supraleitende Magnetlager mit YBCO-Bandstapeln“ mit der evico GmbH, Dresden, haben wir neuartige, verbesserte Supraleiterdauer magnete auf der Basis von Bandleiterstapeln entwickelt. Besonders bei hohen Temperaturen um 77 K konnten die Haftkräfte verdoppelt werden. In diesem Projekt, das im Sommer 2023 erfolgreich abgeschlossen wurde, waren neben einer umfangreichen Literatur- und Patentrecherche insbesondere die Validierung und Evaluierung von experimentellen Kraftmessergebnissen durch Finite-Elemente-Simulationen sowie das Abdünnen der kommerziellen Bandleiter die Aufgaben des ITEP. Zum Abdünnen der Bänder wurde ein Elektrolyt aus Phosphor-, Schwefel- und Zitronensäure im Mischungsverhältnis 5,5:3,5:1 verwendet. Die Abtragung wurde bei Raumtemperatur mit einer Arbeitsstromdichte von 50 A/dm<sup>2</sup> durchgeführt. Damit ergab sich eine Abtragrates von 2 µm/min. Die Bandoberseite wurde mit einer selbstklebenden Kaptonfolie geschützt, sodass hier kein Abtrag erfolgte. Zur Messung der Levitationskraft der Bandstapel beim Projektpartner evico wurden 240 Bandstücke mit 24 mm Länge und 40 Bandstücke mit 70 mm Länge um 10 µm abgedünnt (Abbildung 4).

[1] L. Grünewald et al. (2023) Analytical electron microscopy study of the composition of BaHfO<sub>3</sub> nanoparticles in REBCO films: the influence of rare-earth ionic radii and REBCO composition, Mater. Adv., <https://doi.org/10.1039/D3MA00447C>.

[2] R. Popov et al., Oxygen Annealing of GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> Superconducting Thin Films: Influence of Annealing Time, IEEE-TAS (2024), accepted.

[3] K. Iida et al., Recent progress on epitaxial growth of Fe-based superconducting thin films, Supercond. Sci. Technol. 36, 063001 (2023) <https://doi.org/10.1088/1361-6668/accb2>

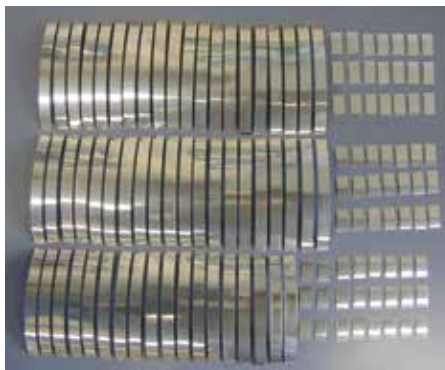


Abb. 4: Elektropolierte THEVA-Bänder.

Kontakt: jens.haenisch@kit.edu

## STRUKTUR- UND FUNKTIONSMATERIALIEN FÜR KRYOANWENDUNGEN

### PROJEKT „HIGH STRENGTH MATERIALS“

Zur Realisierung von kompakten supraleitenden Hochfeldmagneten für die Fusion ist es notwendig, hochfeste und gleichzeitig kostengünstige Strukturmaterialien zu

finden und für den kryogenen Einsatz zu qualifizieren. Der austenitische nicht rostende Stahl Nitronic 50 (XM-19) in geschmiedetem Zustand wurde als potenzieller Werkstoff für ein erforderliches Bauteil in einem Projekt mit Beteiligung des Edelstahlwerks KIND (Deutschland) und der Fusions-Organisation CFS (USA) ausgewählt. Die Eigenschaften wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei kryogenen Temperaturen untersucht. Zur Bewertung der mechanischen und mikrostrukturellen Parameter wurden Proben aus verschiedenen Teilen eines geschmiedeten Blocks ausgewählt, wobei das in Abbildung 5 geforderte Kriterium der optimalen Kombination von Streckgrenze und Bruchzähigkeit (>1230 MPa beziehungsweise >160 MPa√m) berücksichtigt wurde. Die Ergebnisse der Proben ergaben eine signifikante Streuung der Werte. Zur Klärung wurde in einem ersten Schritt eine mikrostrukturelle Untersuchung in drei Richtungen durchgeführt. Alle Proben weisen stäbchenförmige Nb-Cr-reiche Phasen auf, die jedoch unterschiedlich verteilt waren.

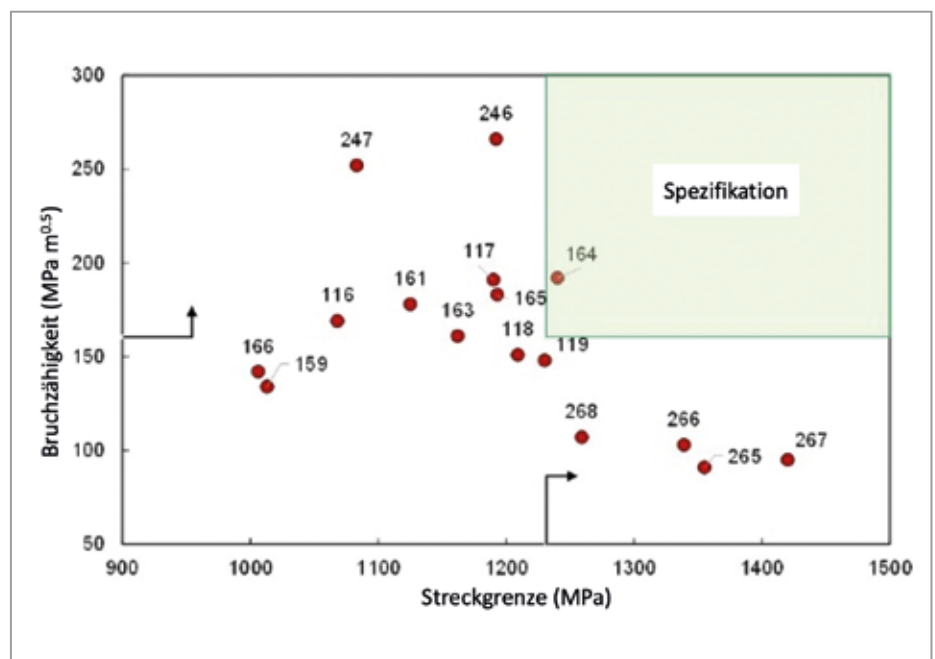
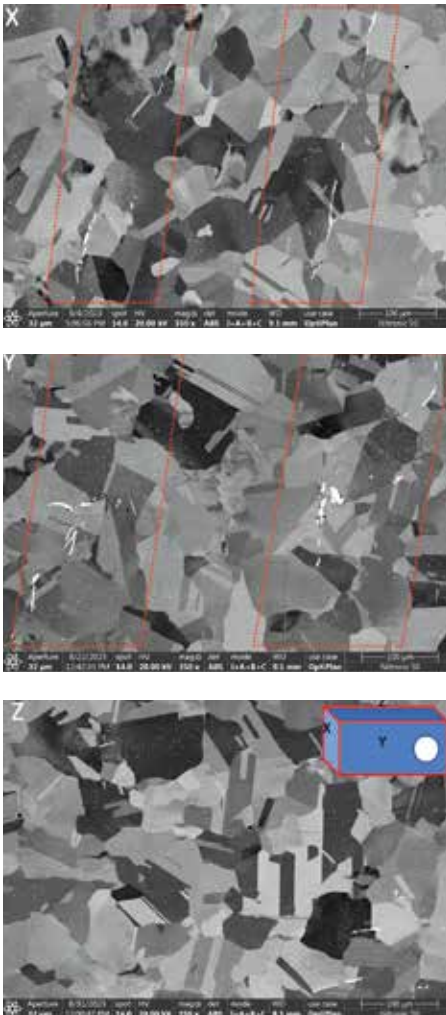


Abb. 5: Bruchzähigkeit und Zugfestigkeit verschiedener Probenpositionen (Nummern). Der grüne Bereich entspricht der geforderten Spezifikation (>1230 MPa bzw. >160 MPa√m).



**Abb. 6: Mikrostruktur der Nitronic50-Probe innerhalb der mechanischen Spezifikation in verschiedenen Richtungen x, y, und z (siehe Blickrichtung der Flächen im Schemazeichnung). Der Messbalken entspricht 100  $\mu\text{m}$ .**

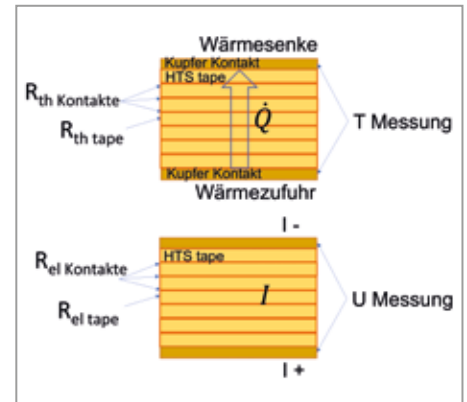
Bei den Proben innerhalb der mechanischen Spezifikation ist die Ausrichtung dieser Zweitphase in den definierten X- und Y-Richtungen auffällig, zusätzlich zu einer signifikanten Ausbildung von Zwillingen in allen Richtungen. Diese Ausrichtung führt zu spezifischen phasenfreien Abschnitten in allen Richtungen (Abbildung 6). Die stäbchenförmigen Phasen im Gefüge sind als weiße Flecken zu sehen. Proben außerhalb der Spezifikation zeigen diese Eigenheiten kaum bis gar nicht.

Inwieweit diese Phasen zu der Beeinflussung und Streuung der mechanischen Eigenschaften führen, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

### PROJEKT HTS-CHARAKTERISIERUNG

Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) werden in verschiedenen Hochstromleitern verwendet, zum Beispiel für große Hochfeldmagnete oder sogenannte cable-in-conduit-conductors (CICCs). CICCs sind oft aus mehreren HTS-Litzen aufgebaut, die ihrerseits aus einzelnen HTS-Bändern bestehen, die unter mechanischem Druck durch die Verdichtung des Kabels zusammengepresst werden. Auch in kleinen HTS-Spulen sind HTS-Drähte oft übereinander gewickelt und bilden so eine Stapelstruktur in Richtung senkrecht zur HTS-Bandenebene.

Für die Simulation zum Beispiel eines Quenches in einem solchen Kabel sind der thermische und elektrische Widerstand von Bandstapeln in beiden Richtungen – radial und axial – erforderlich (Abbildung 7). Solche Messungen in radialer Richtung sind mit der neu entwickelten Erweiterung der sogenannten Standard-Thermal-Transport-Option innerhalb des Physical-Property-Measurement-Systems (Quantum Design) möglich. Die Vorrichtung (Abbildung 8) ermöglicht die Messung der thermischen und elektrischen Widerstände über den Stapel von HTS-Bändern in einem breiten

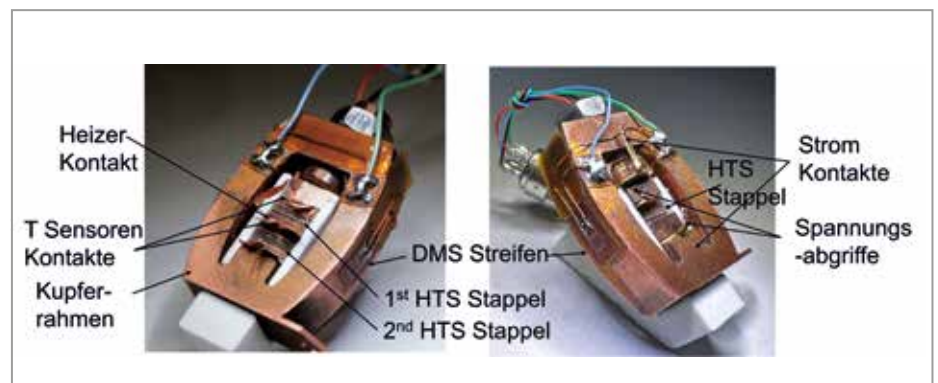


**Abb. 7: Messkonfiguration senkrecht zur HTS-Bandenebene zur elektrischen und thermischen Charakterisierung.**

Temperaturbereich von 4 bis 300 K, die unter kontrolliertem Druck zusammengepresst werden.

Die Ergebnisse bei verschiedenen Kontaktdruckwerten können für die Simulation der Quench-Ausbreitung in CICC- oder HTS-Spulen verwendet werden.

Kontakt: klaus.weiss@kit.edu



**Abb. 8: Realisation der thermischen und elektrischen Messung mit einer Konfiguration, passend für die PPMS-Plattform von Quantum Design.**

# Highlight

## Erfolgreiche Inbetriebnahme der Pilotproduktion von HTS-Bandleitern

Im Rahmen des Kollaborationsprojektes KC<sup>4</sup> (KIT-CERN Collaboration on Coated Conductor) konnte 2023 am ITEP erfolgreich eine HTS-Pilotproduktion in Betrieb genommen und entsprechende Forschungsarbeiten gestartet werden.

Im Rahmen des Projektes KC<sup>4</sup> sind HTS-Bandleiterbeschichtungsanlagen, die bei einem industriellen Supraleiterhersteller in den vergangenen Jahren mit großem Erfolg entwickelt wurden, an das KIT transferiert worden. Damit wird es zukünftig möglich, am ITEP komplette HTS-Bandleiterarchitekturen für spezielle Anwendungsszenarien zu entwickeln und in einer Bandlänge von bis zu mehreren Hundert Metern zu produzieren, sodass zum Beispiel neue Spulenkonzeppte getestet werden können. Mit dieser Erweiterung wird es ab 2024 in Europa erstmals an einem Forschungsinstitut möglich sein, aktuelle Kurzprobenmaterialentwicklungen mit den HTS-Bandlängenanforderungen von Anwendungsdemonstratoren direkt zu verbinden. Im Rahmen von KC<sup>4</sup> werden in den kommenden Jahren spezielle HTS-Bandleiterarchitekturen, die industriell nicht verfügbar sind, für die Entwicklung von HTS-basierten Beschleunigermagneten und deren spezielles Anforderungsprofil entwickelt werden. Ebenso werden in KC<sup>4</sup> breite HTS-Bandleiter hergestellt werden, die aktuell industriell nicht produziert werden und für die

Entwicklung neuartiger Spulentopologien genutzt werden können. Dabei stützt sich KC<sup>4</sup> bei der HTS-Bandleitersynthese auf die etablierte Kombination von ionenstrahltexturierten Metallsubstraten und deren Beschichtung mittels gepulster Laserdeposition (PLD) und Aufdampfverfahren. KC<sup>4</sup> ist ein industrieunabhängiges Projekt, sodass es mittelfristig auch möglich wird, interessierten Forschungseinrichtungen und Firmen eine offene zugängliche Entwicklungsplattform für spezielle HTS-Bandleiterentwicklungen zur Verfügung zu stellen.

Der HTS-Beschichtungsprozess eines Coated Conductors besteht aus mehreren Einzelschritten, in denen neben der eigentlichen HTS-Schicht auch weitere Puffer- und metallische Deckschichten auf ein stark texturiertes Metallbandssubstrat geringer Dicke (<80 µm) aufgebracht werden (Abbildung 9). Alle relevanten Beschichtungsschritte für Bandlängen bis zu 30 m konnten im vergangenen Jahr erfolgreich in Betrieb genommen und qualifiziert werden. Eine Besonderheit des in KC<sup>4</sup> verwendeten

Beschichtungsprozesses ist, dass die zu beschichtende Bandlänge auf einen Zylinder aufgewickelt und rotierend in einer nahezu immer geschlossenen Ofenkammer mittels PLD beschichtet wird.

In 1 µm dicken HTS-Beschichtungen konnten 2023 mit kritischen Stromdichten von >300 A/cm bei 77 K und Eigenfeld die erforderlichen Projektmeilensteine erreicht werden.

Abbildung 10 zeigt als Beispiel für kritische Stromtragfähigkeiten der KC<sup>4</sup>-Leiter Messungen, die im Rahmen einer Prozessparameteroptimierung gewonnen wurden.

Seit März 2023 werden im Rahmen der KC<sup>4</sup>-Arbeiten nun routinemäßig HTS-Bandleiter für weitergehende Forschungsarbeiten synthetisiert und charakterisiert. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt aktuell darin, die elektromechanischen Eigenschaften der Bandleiter und ihre Beziehung mit den zugrunde liegenden Beschichtungsprozessen zu verstehen.

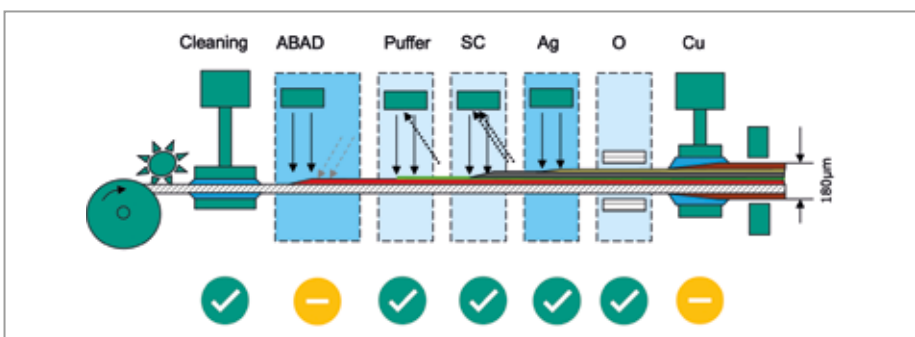


Abb. 9: Die für eine HTS-Bandleitersynthese notwendigen Prozessschritte und deren Umsetzungsstatus innerhalb des KC<sup>4</sup>-Projektes. Nach einem Reinigungsschritt erfolgt die Abscheidung einer texturierten Pufferschicht (ABAD), bevor Diffusionsbarrierschichten (Puffer), die eigentliche Supraleiterschicht (SC) und abschließend Ag- und Cu-Schichten abgeschieden werden. Innerhalb von KC<sup>4</sup> werden aktuell kommerziell erhältliche texturierte Bandsubstrate als Beschichtungsgrundlage verwendet.

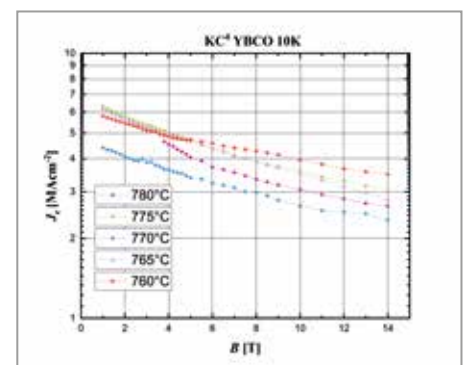


Abb. 10: Beispielhafte  $J_c$ -Messungen bei 10 K und Magnetfeldern bis zu 14 T, die im Zuge der Syntheseoptimierung (hier Variation der Beschichtungstemperatur) gewonnen wurden.



# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Organisationsteam des 8. IEEE Workshops  
zu elektronischen Netzen (eGrid 2023)  
16.–18.10.2023 am KIT

# Supraleitende Energietechnische Anwendungen

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

Die Schwerpunkte des Themas „Energietechnische Anwendungen der Supraleitung“ liegen auf der Entwicklung neuartiger Betriebsmittel für Elektroenergiesysteme sowie auf der Systemintegration dieser Betriebsmittel. 2023 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

## SUPRALEITENDE NETZ- UND ENERGIEKOMPONENTEN

### RESISTIVE STROMBEGRENZER

Hochtemperatursupraleitende Strombegrenzer (HTS SSB) wurden in Deutschland schon erfolgreich im Mittelspannungsnetz eingesetzt. In Zusammenarbeit mit der TH Köln wurde das ITEP von TenneT beauftragt, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit eines resistiven HTSL SSB für 380 kV, 5 kA zu untersuchen.

Die Machbarkeitsstudie wurde 2023 fertiggestellt und ist unter dem Link <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.5445/KSP/1000161057/>

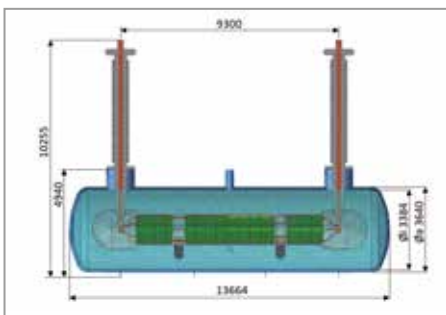


Abb. 1: Hauptabmessungen und Skizze einer Phase eines supraleitenden 380-kV-Strombegrenzers.

abrufbar. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein 380 kV-, 5 kA-resistiver supraleitender Strombegrenzer (siehe Abbildung 1) technisch machbar ist und zunächst ein spezielles Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die weitere Entwicklung der kritischen Schlüsselkomponenten empfohlen wird. Insgesamt erscheint es möglich, einen solchen Begrenzer innerhalb der nächsten fünf Jahre zu entwickeln.

Kontakt: mathias.noe@kit.edu

### HTS-SCHALTEN

Eine vielversprechende Anwendung für REBCO-Bandleiter ist das supraleitende Schalten. Dabei wird der dynamische Widerstand des Supraleiters genutzt, der auftritt, wenn sich der Supraleiter in einem magnetischen Wechselfeld befindet. Im Rahmen einer Doktorarbeit konnte nun erstmals eine supraleitende Brückenschaltung demonstriert werden. Durch das

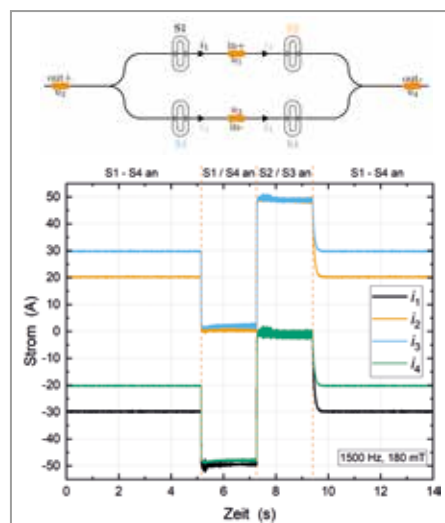


Abb. 2: Oben: Grundlegender Aufbau der Brückenschaltung mit zwei parallelen supraleitenden Pfaden. Unten: Stromverlauf in den einzelnen Stromzweigen der Brückenschaltung.

gezielte Ansteuern der Schalter S1–S4 (Abbildung 2) kann somit analog zu Halbleitern ein Umrichter aufgebaut werden. Das wesentliche Ziel der weiteren Arbeiten besteht in einer Erhöhung der Spannungen und damit einhergehend in einer Verringerung der Zeit für die Stromkommutierung.

Kontakt: quoc.pham@kit.edu

### KRYOGENE HOCHSPANNUNG

Der Teststand Combutt (Cryogenic One Meter Build-Up for Tube Testing) ermöglicht die Hochspannungsprüfung dreiphasiger Kurzproben von Isolieranordnungen für den Mittelspannungsbereich, die mit Flüssigstickstoff gekühlt werden. Die Konzeption erfolgte zunächst im Hinblick auf Stehspannungsprüfungen mit Einphasenwechselspannung, Drehstrom (Abbildung 3) und Standardblitzstoßspannung mit der höchsten Spannung von Betriebsmitteln (Um) mit 12 kV.



Abb. 3: Drehstromtest mit der Anlage Combutt mit einer Spannung von 86,6 kV (effektiv, Phase gegen Phase).

Nach erfolgreichen Tests mit PE-Scheiben wurde die Anlage so verbessert, dass auch mit Prüfspannungen für Betriebsmittel mit  $U_m = 24$  kV getestet werden kann. Als geerdeter Außenleiter wurde zunächst ein starres Rohr verwendet, was dem Aufbau einer flüssigkeitsisolierten Leitung entspricht. Bei diesem Aufbau wurden entwe-





**Abb. 4:** PE-Scheibenisolator (links) und gedruckter PLA-Stützisolator (rechts).

Im Rahmen des Projektes HighAmp wurde ein geerdeter Außenleiter auf Wellrohrbasis eingesetzt und bisher zwei unterschiedliche kontinuierliche Isolierstrukturen geprüft.



**Abb. 5:** Einzelsegmente gedruckter kontinuierlicher Kabelisolatoren aus PLA (links) und PA (rechts).

der vier PE-Scheibenisolatoren oder vier diskrete gedruckte PLA-Stützisolatoren getestet (Abbildung 4 + 5).

Kontakt: stefan.fink2@kit.edu

### BMWK-PROJEKT DEMO200

Im Verbundprojekt DEMO200 wird ein supraleitendes Hochstromsystem für einen Gleichstrom von 200 kA entwickelt. 2023 wurde mit den Projektpartnern Vision Electric Superconductors und Messer eine druckdichte Durchführung und zwei 20 kA-Stromzuführungen zur Trennung der Leiterstrecke von den Endverschlüssen fertiggestellt und ausgiebig getestet (Abbildung 6). Dieser am ITEP durchgeführte Kombitest diente zur Überprüfung der Funktionalität der einzelnen Komponenten und zum Nachweis der Temperaturschichtbildung im unterkühlten Stickstoff. Damit sind die Arbeiten am ITEP zu diesem Projekt abgeschlossen, und der Technologiedemonstrator wird aktuell in einem Aluminiumwerk für einen abschließenden Test aufgebaut.

Kontakt: andrej.kudymow@kit.edu



**Abb. 6:** Aufbau der druckdichten Durchführung inklusive zweier 20-kA-Stromzuführungen.

### BMWK-PROJEKT ROWAMAG

Supraleitende Magnetheizer ermöglichen bei der Erwärmung von Metallen für die Industrie eine Energieeinsparung gegenüber bisherigen Methoden um mehr als 30 Prozentpunkte und wurden bereits in Einzelstücken gebaut und betrieben. Bisher sind jedoch noch nicht alle betrieblichen Anforderungen erfüllt. Das wesentliche Ziel des ITEP im BMWK-Verbundprojekt ROWAMAG (robuster und wartungsarmer Magnetheizer mit HTS-Spulen für Warmumformprozesse) zum Aufbau und Test eines robusten und wartungsarmen Magnetheizers mit Supraleitern ist deshalb, ein langlebiges Kryosystem inklusive des Kryostaten und der Kälteanlagen zu entwickeln.

Gemeinsam mit den Partnern THEVA, Bültmann und Beck Maschinenfabrik gelang es 2023, den supraleitenden Magnet vollständig aufzubauen und teilweise in Betrieb zu nehmen. Im Weiteren wird der Magnetheizer in einem Probetrieb bei Bültmann ausführlich getestet.

Kontakt: ralph.lietzow@kit.edu

### MODELLIERUNG VON SUPRALEITERN UND KOMPONENTEN

Es wurde eine integrale Methode entwickelt und verwendet, um AC-Verluste in supraleitenden Bändern in einer luftgefüllten elektrischen Maschine in einem zweistufigen Prozess zu berechnen: Das Magnetfeld wird in einem Finite-Elemente-Methoden-



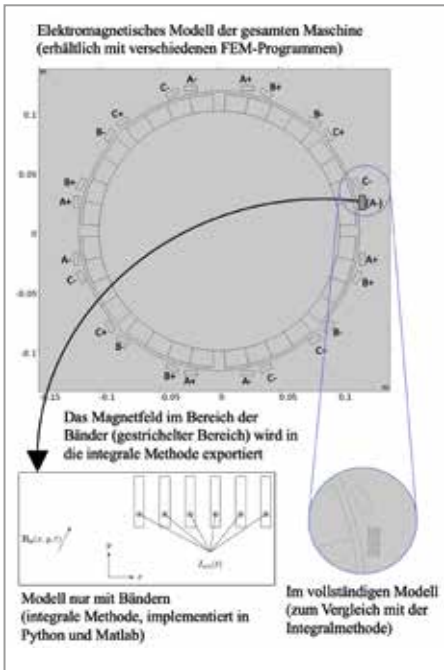
**Abb. 7:** Supraleitender Magnet des Magnetheizers im Stromtest am KIT mit Eisenjoch.

modell ohne supraleitende Bänder berechnet und in das integrale Methodenmodell exportiert, das nur aus den Bändern besteht. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Magnetfeldkarten mit verschiedenen Finite-Elemente-Methoden (FEM) berechnet werden können. Die Berechnung des Wechselstromverlusts wird mit Programmen durchgeführt, die in weitverbreiteten Sprachen wie Matlab- und Python-Codes geschrieben sind (Abbildung 8). Der Code lieferte die gleichen Ergebnisse, die mit einem vollständigen Maschinenmodell in Comsol Multiphysics (basierend auf der T-A-Formulierung) erzielt wurden, jedoch in einem Bruchteil der Zeit. Darüber hinaus sind die Matlab-/Python-Codes jetzt auf der hts.modelling.com-Website öffentlich verfügbar.

Ein numerisches Modell, das ein FEM-Modell mit H-Formulierung mit einem elektrischen Schaltkreis kombiniert, wurde entwickelt, um die Gesamtleistung von selbstregulierenden HTS-Flusspumpen zu untersuchen, die eine Gleichstromspeisung in eine supraleitende Spule mit geschlossenem Regelkreis ohne elektrischen Kontakt ermöglichen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das vorgeschlagene Modell alle kritischen Eigenschaften einer selbstregulierenden HTS-Flussmittelpumpe erfassen kann, einschließlich supraleitender Eigenschaften und des Einflusses des Sekundärwiderstands.

Dreidimensionale numerische Simulationen, die auf der MEMEP-Methode (Minimum Electro-Magnetic Entropy Production) basieren, wurden verwendet, um die Levitationskraft zwischen einem Permanentmagneten und einem Doppelstapel von HTS-Bändern vorherzusagen. Die Kraft



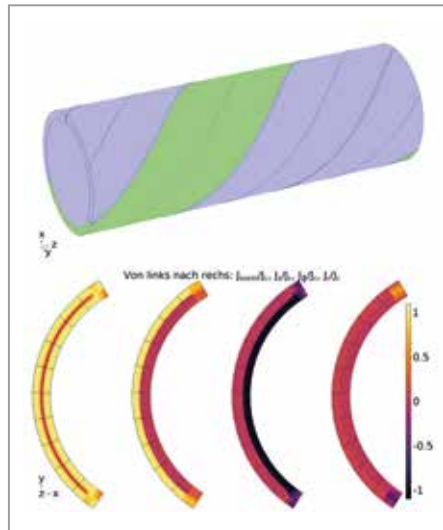


**Abb. 8: Prinzip der Anwendung der Integralmethode zur Berechnung der Wechselstromverluste von supraleitenden Bändern in einer Maschine.**

wurde bei verschiedenen Temperaturen von 57 bis 77 K berechnet, und zwar sowohl bei Nullfeldkühlung als auch bei Feldkühlung. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse in guter Übereinstimmung (maximaler Fehler 9 %) mit den experimentellen Werten übereinstimmten. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, die in der Literatur vorgestellt werden, verwendet das Modell die anisotrope Feldabhängigkeit von HTS-Bändern vom Magnetfeld als Eingabe und nicht als „back-fitting“-Parameter, um die experimentellen Daten der Levitationskraft abzugleichen.

Dreidimensionale Simulationen, die auf der H-Formulierung basieren, wurden verwendet, um die Stromverteilung in einem CORT-Kabel (Conductor-on-Round-Tube) zu untersuchen, das Wechselstrom führt. Es zeigte sich, dass selbst in dem einfachen Szenario eines Kabels, das nur aus einer Schicht von drei HTS-Bändern besteht, der Strom einem nicht trivialen Weg folgt, der als Spirale in einer Spirale beschrieben werden kann und durch die Simulationen visuell aufgedeckt wurde (Abbildung 9).

Dies hat prinzipiell wichtige Auswirkungen auf die Gesamtstrombelastbarkeit und die AC-Verluste der Leitungen. Dies bedeutet auch, dass herkömmliche vereinfachende



**Abb. 9: Oben: 3D-Modell eines CORT-Kabels (eine Schicht, drei Bänder, ein Band grün hervorgehoben). Unten: Stromdichtekomponenten am Höhepunkt des Transportstroms.**

Annahmen, die in Simulationen verwendet werden, zum Beispiel die Vernachlässigung oder künstliche Erweiterung der HTS-Dicke, wahrscheinlich zu einer falschen Schätzung der AC-Verluste führen können.

Kontakt: francesco.grilli@kit.edu

## ECHTZEIT SYSTEMINTEGRATION

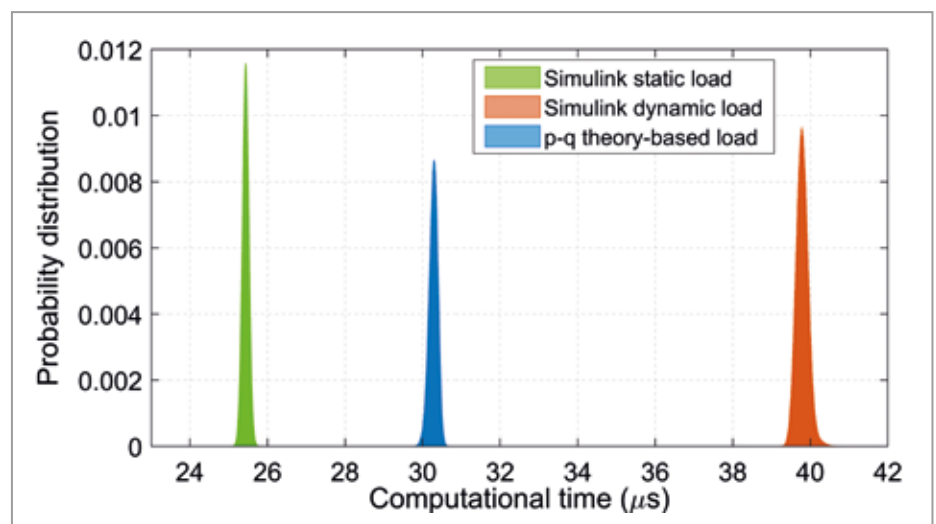
### SCHNELLE ECHTZEITMODELLE FÜR ENERGIESYSTEME

Die Gruppe Real Time Systems for Energy Integration (RTSET) arbeitet intensiv an Ansätzen zur Modellierung von Geräten für digitale Echtzeitsimulatoren, wobei der Schwerpunkt darauf liegt, diese Modelle im Hinblick auf die erforderliche Rechen-

leistung leichter zu machen. Im Rahmen der Helmholtz-Nachwuchsgruppe „Hybride Netze“ haben wir ein neuartiges dreiphasiges dynamisches Lastmodell für Echtzeitsimulatoren vorgeschlagen, das die gleiche Genauigkeitsleistung wie die bekannten und länger validierten Simulink-Modelle erreicht, aber 30 % weniger Rechenzeit für die Berechnung benötigt (Abbildung 10). Dieses Modell basiert auf der Theorie der Momentanleistung und stützt sich nicht auf den rotierenden Synchronrahmen, um die Wirk- und Blindleistungseinspeisung zu steuern, wodurch trigonometrische Berechnungen und die Verwendung großer Speicherfelder vermieden werden. Das in einer kürzlich erschienenen Fachzeitschrift vorgestellte Modell wurde in zwei großen Verteilernetzen (SimBench-Netz und IEEE-118-Bus-Verteilernetz) validiert und zeigte eine verbesserte Rechenleistung.

### IDENTIFIZIERUNG DER LASTEMPFINDLICHKEIT IN ECHTZEIT

Die Demand Response spielt eine wichtige Rolle bei der Erreichung einer flexiblen Leistungssteuerung in Energienetzen. In der RTSET-Gruppe konzentrieren wir uns auf die spannungs- und frequenzgesteuerte Laststeuerung, die die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit der Wirk- und Blind-



**Abb. 10: Rechenzeit für den IEEE-118-bus-test-feeder-Netz.**

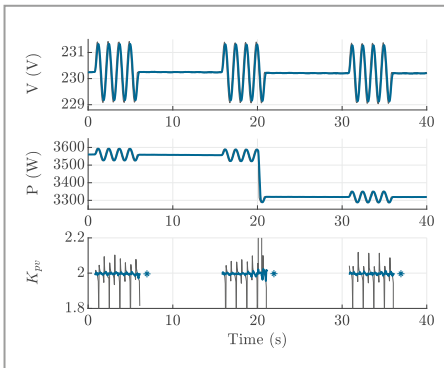


Abb. 11: Beispiel der Lastempfindlichkeit-Bewertung mit dem entwickelten Verfahren.

leistungsaufnahme von Lasten und Erzeugern ausnutzt. Unsere Aktivitäten enthalten als ersten Schritt die Identifizierung dieser Empfindlichkeiten. Wir haben ein neuartiges Lastsensitivitätsverfahren entwickelt und zum Patent angemeldet, das völlig unabhängig von den Netzbedingungen in der Lage ist, die Lastsensitivität während einer Störung mit geringem bis gar keinem Fehler abzuschätzen. Dieser Ansatz wurde in der KIT-Versuchsanlage „Energy Smart Home Lab“ mit handelsüblichen Lasten und unter realistischen Haushaltsbedingungen validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsaufnahme der Last immer noch stark von der Spannung abhängt, während sie unabhängig vom Frequenzwert ist (Abbildung 11). Auf der Seite der dezentralen Stromerzeuger haben wir

nachgewiesen, dass kommerzielle Geräte in der Regel langsamer sind als in den Normen vorgeschrieben, was die Dynamik der Leistungserbringung verlangsamt. Aktuelle Studien konzentrieren sich auf die Abhängigkeit der Last von großen Frequenzschwankungen (zum Beispiel im Bereich 44 bis 56 Hz).

### POWER-HARDWARE-IN-THE-LOOP-STABILITÄT UND -GENAUIGKEIT

Die experimentelle Erprobung neuer Energietechnologien ist ein wichtiger Schritt vor ihrer Markteinführung. Feldversuche erfordern jedoch Zeit, Arbeitskraft und Geld, um eine umfassende Validierung der Technologieleistung zu ermöglichen. Power-Hardware in the-Loop (PHIL) ermöglicht Labortests unter realistischen Netzbedingungen, wobei ein digitales, in Echtzeit simuliertes Netz über Leistungsverstärker mit der realen Technologiehardware verbunden wird. In Bezug auf die Stabilität und die Prüfgenauigkeit von PHIL-Tests sind noch viele offene Fragen zu klären. In der RTSET-Gruppe arbeiten wir an fortgeschrittenen mathematischen Ansätzen, die auf der bekannten „impedanzbasierten Stabilitätstheorie“ beruhen, um eine genauere Abschätzung der Stabilität und Genauigkeit von PHIL zu ermöglichen. Jüngste experimentelle Tests und Veröffentlichungen haben gezeigt, dass unser Ansatz die Sta-

bilität von PHIL mit einer geringen Fehler-spanne genau vorhersagt (Abbildung 12).

### HYBRIDE ENERGIESPEICHERSYSTEME

Energiespeichersysteme spielen eine wichtige Rolle bei der Unterstützung der Netzstabilität und der Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Es ist jedoch nicht realistisch, sich sowohl für die Unterstützung der Massenstromversorgung als auch für schnelle dynamische Dienste auf Batterien zu verlassen. Verschiedene Energiespeichertechnologien müssen in das Energienetz integriert werden und zusammenarbeiten. In diesem Zusammenhang konzentriert sich die RTSET-Gruppe auf hybride Energiespeichersysteme (HESS), bei denen eine energieintensive Speichertechnologie (zum Beispiel Batterie oder Wasserstoff) mit einer leistungsintensiven gekoppelt wird (zum Beispiel Schwungrad oder Supercap). Dies ermöglicht es, große, aber langsame Energiemengen mit der energieintensiven Ressource abzugeben und die schnellen Leistungsschwankungen der leistungsintensiven Ressource zu überlassen. In der RTSET-Gruppe haben wir die Leistung eines Batterie-Schwungrad-basierten HESS validiert und gezeigt, wie die Leistungstransienten der Batterie minimiert werden können, wodurch sich die Lebensdauer der Batterie erhöht (Abbildung 13). Dies verbessert die wirtschaftlichen Aus-

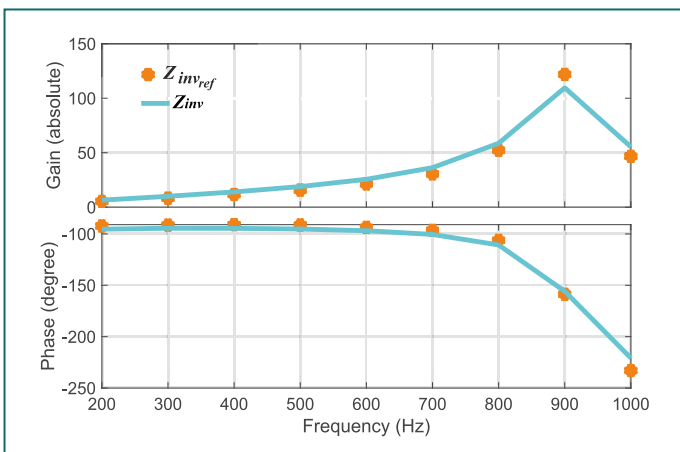


Abb. 12: Impedanz-Profil des Umrichters, der am PHIL verbunden ist.

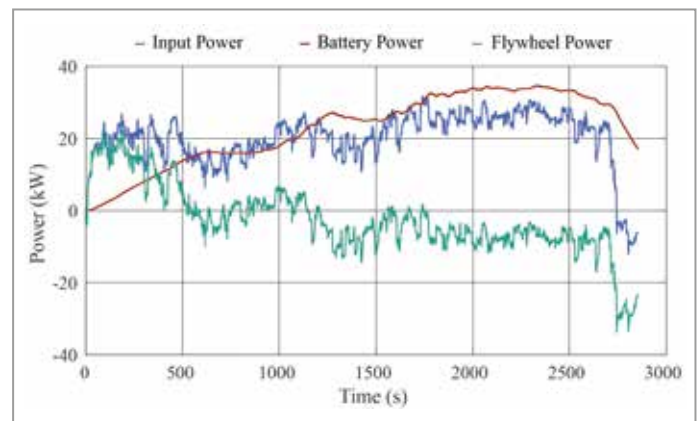


Abb. 13: Leistungsprofile von hybridem Schwungrad/Batterie-HESS während der Lieferung von Netzdienstleistungen.



Abb. 14: H<sub>2</sub>-in-the-Loop-Anlage für Wasserstofftechnologie-Experimentelle Prüfung.

sichten des gesamten HESS. Derzeit konzentrieren wir uns auf die Entwicklung neuartiger Steuerungsstrategien für HESS, bei denen auch der Ladezustand optimal gesteuert wird, um eine schnelle Entladung der stromintensiven Energiespeichertechnologie zu vermeiden.

#### HYDROGEN TECHNOLOGY PLATFORM

Einer der Hauptschwerpunkte in Deutschland und insbesondere am KIT ist die Produktion, der Transport und die Nutzung von Wasserstoff für Energieprozesse. In diesem Zusammenhang hat RTSET zusammen mit mehreren anderen Gruppen am KIT die Hydrogen Integration Platform entwickelt, in der wasserstoffbezogene Energietechnologien im Energy Lab 2.0 installiert und mit der PHIL-Laboranlage verbunden werden. Diese Technologien, darunter Elektrolyseure, Kompressoren, Verflüssiger und Brennstoffzellen, werden mithilfe der PHIL-Technik unter realistischen Netzbedingungen auf ihre Leistungsfähigkeit geprüft. Das H<sub>2</sub>-in-the-Loop-Labor ist der erste Versuch in dieser Richtung (Abbildung 14). Ein 50-kW-Elektrolyseur und ein 10-kW-Brennstoffzellensystem werden im nächsten Jahr erste Ergebnisse darüber liefern, welche Leistungen Wasserstofftechnolo-

gien für das Stromnetz erbringen können (zum Beispiel Frequenzregelung).

#### KIT TESTFELD FÜR ENERGIEEFFIZIENZ UND NETZSTABILITÄT IN GROSSEN FORSCHUNGSINFRASTRUKTUREN – KITTEN

Teilchenbeschleuniger sind energieintensive Anlagen, die wenig Flexibilität bei der Nachfrage bieten und hohe Anforderungen an die Stromqualität stellen. Andererseits streben sie aufgrund der hohen Ener-

giekosten eine bessere Energieeffizienz an. Die RTSET-Gruppe hat zusammen mit dem Teilchenbeschleuniger KARA am KIT die Forschungsinfrastruktur KITTEN entwickelt, um diese Herausforderungen in Bezug auf Energieeffizienz und Stabilität in Beschleunigern anzugehen. Infolgedessen wurde ein Horizon-Europe-Projekt „Research Facility 2.0“ im Wert von 5 Millionen Euro erfolgreich beantragt, das im Jahr 2024 anlaufen wird. In Zusammenarbeit mit fünf der größten Beschleuniger in Europa (ALBA, CERN, DESY, HZB, MAX IV) werden Themen der Energieeffizienz von der Komponenten- bis zur Systemebene sowohl für die Physik als auch für die Energietechnik untersucht und konkrete Lösungen vorgeschlagen, die in Demonstrationsanlagen an den Beschleunigeranlagen experimentell validiert werden. Die RTSET-Gruppe wird sich auf das digitale Twinning von Beschleunigern konzentrieren, insbesondere für digitale Echtzeitanwendungen, sowie auf die optimale Platzierung, Auslegung und Steuerung von Technologien auf der Grundlage von Leistungselektronik und Energiespeicherung (Abbildung 15).

Kontakt: giovanni.carne@kit.edu

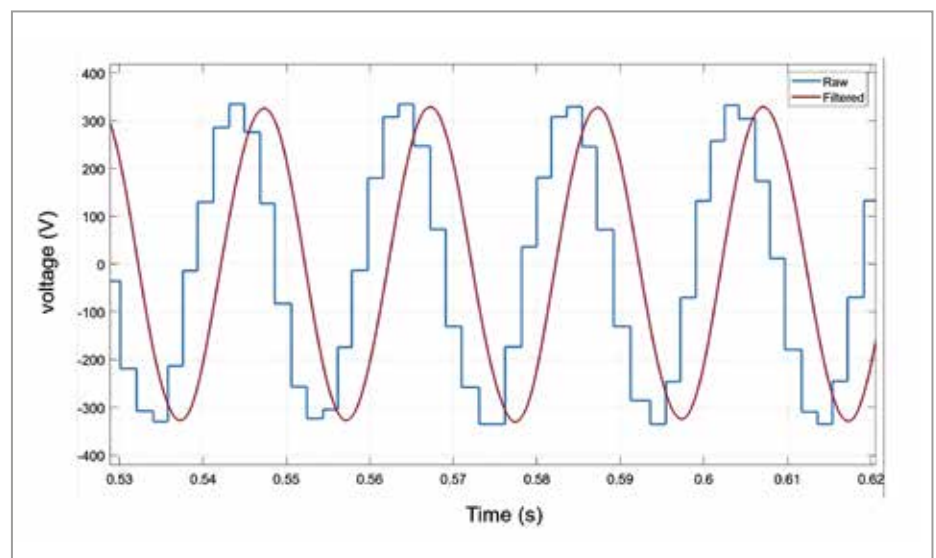
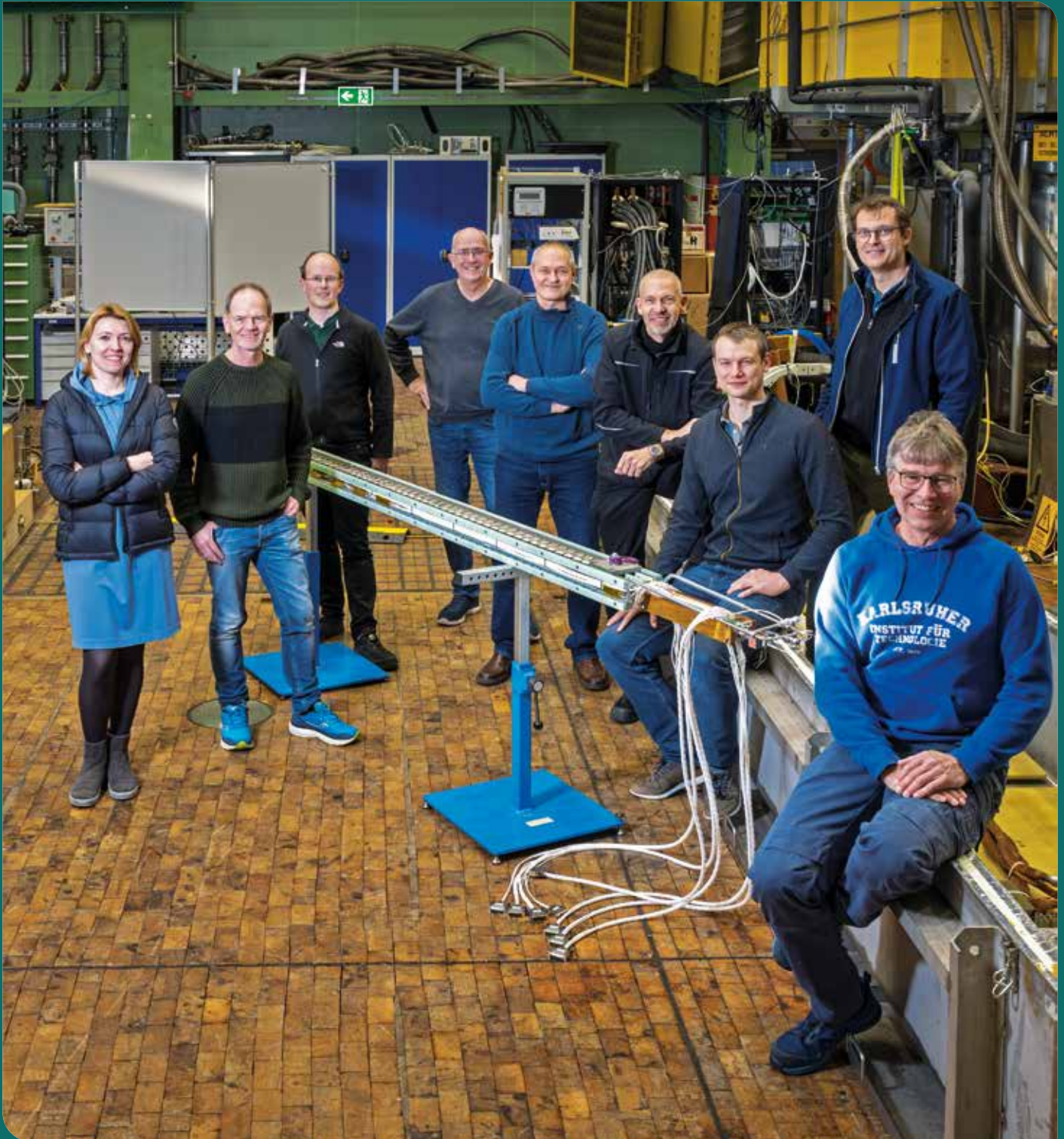


Abb. 15: KITTEN-erste Spannungswellenform Übertragung von KARA nach Energy Lab 2.0.



# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Das Team und das Ergebnis: fertiggestellte 2G-HTS Triplet-Kabelprobe zur Charakterisierung in der SULTAN-Anlage beim EPFL in 2024.

# Supraleitende Magnettechnologie

Koordination: Prof. Dr. Tabea Arndt

In diesem Forschungsfeld wurde im Jahr 2023 der Reifegrad der verschiedenen Technologien in den Forschungsthemen weiter gesteigert. Besonders deutlich wurden auch die gute Verzahnung und Zusammenarbeit über die verschiedenen Forschungsthemen des ITEP.

In den drei Forschungsthemen „Spulen- und Magnettechnologie“, „Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion“ und „Rotierende Maschinen“ wurden im Berichtsjahr die grundlegenden Ergebnisse der Vorjahre weiter ausgebaut.

So wurde zum Beispiel die robotische Wickeltechnik von HTS weiterentwickelt, die Supraleitung im Verbund mit der Wasserstofftechnologie weiter detailliert und der HTS-DUDA-Ansatz in Richtung Anwendungen weiterentwickelt. Weiterhin wurden einige Projekte mit supraleitenden Motoren im Bereich der Antriebstechnik erfolgreich abgeschlossen und neue Projekte im Bereich der elektrischen Energieerzeugung durch Wind akquiriert.

Auch im Sonderforschungsbereich SFB 1527 „Hyperion“ (Arbeitspaket „Kompakte HTS-Magnete für das NMR-Hintergrundfeld“) konnten erste Magnetauslegungen durchgeführt und Beschaffungen getätigt werden.

Die Fusionsaktivitäten mündeten in der Fertigstellung einer Probe eines HTS-Kabels für Quench-Untersuchungen.

## SPULEN- UND MAGNETTECHNOLOGIE

### ROBOTISCHE WICKELTECHNIK

Nach wie vor sind Spulen und Magnete mit Abstand das Hauptanwendungsgebiet technischer Supraleiter. Zunehmend werden komplexe, echt dreidimensionale Wickelgeometrien benötigt. Diese können nicht mehr ohne Weiteres per Hand und mit den üblichen Drehmaschinen gefertigt werden. Zur Bereitstellung solcher Wick-

lungen wurde daher seit 2020 eine robotische Wickelanlage konzipiert, aufgebaut und erste Spulen damit gefertigt. Die ersten im Jahr 2023 publizierten Ergebnisse führten zu einer Vielzahl von Anfragen aus Industrie und Wissenschaft – auch mit Blick auf einen möglichen Know-how-Transfer.

Die weltweit einzigartige robotische Wickelanlage, bei der ein Werkstückpositionierer den Spulenkörper aufnimmt und zwei nicht kollaborative (also nicht mit Menschen interagierende) Roboter die sogenannte Wickelhand führen, ist kein fertiges Werkzeug, sondern selbst einer fortwährenden Weiterentwicklung unterworfen. Aktuell wurde die Wickelhand überarbeitet. Diese nimmt die Vorratsspule mit dem Supraleiterdraht auf, wickelt diesen auf einen Spulenkörper und hält über einen Servomotor und Zugkraftsensor die Drahtspannung auf dem Sollwert. Es zeigte sich, dass die ursprüngliche Wickelzugregelung über eine Siemens-S7-Steuerung in Verbindung mit dem verwendeten Bussystem die



**Abb. 1: Elektronikseite der Wickelhand.**  
Links unten: PID-Zugkraftregler. Weiter im Uhrzeigersinn: Andockflansch für Roboter, Drehgeber zur Längenmessung, Elektronik zur S7-Anbindung, Zugkraftsensor, Motorsteuerung. In der Mitte: Servomotor.

Anforderungen hinsichtlich Reaktivität und Dynamik nur unzureichend erfüllt. Daher wurde dieses Verfahren durch eine On-board-Lösung in Form eines dedizierten PID-Regelbausteins mit einer Reaktionszeit von 1 ms ersetzt. Die Wickelzugkraft wird damit auf der Wickelhand selbst geregelt; lediglich die Sollwertvorgabe erfolgt noch über die S7. Die Dynamik der Wickelzugregelung konnte so um über eine Größenordnung verbessert werden. [Abbildung 1](#) zeigt die Elektronikseite der überarbeiteten Wickelhand.

### KÜHLKONZEPT: THERMOSIPHON MIT KRYOKÜHLER

Viele technische Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) sind in einem Temperaturbereich um 30 K vorgesehen. Der zukünftig wichtige Energieträger Wasserstoff siedet bei 21 K. Um diesen Temperaturbereich für Experimente und Untersuchungen möglichst einfach zu erschließen, bietet sich die trockene Kühlung mit Kryokühlern an. Im Gegensatz zur üblichen Anbindung an den Kaltkopf über massives Kupfer, also die Wärmeleitung, soll bei dieser Anlage die Ankopplung des zu kühlenden Objekts über einen Thermosiphon untersucht werden. Ein Thermosiphon (englisch Heatpipe) besteht prinzipiell aus einem Verdampfer (am zu kühlenden Objekt), einem Kondensator (am Kaltkopf) und einem Verbindungsrohr. Dieses geschlossene System enthält eine geringe Menge eines Kryogens (hier Neon). Durch den Stoffstrom und die Phasenübergänge des Neons am kalten und warmen Ende erfolgt eine äußerst effektive Wärmeabfuhr.

2023 wurde der Aufbau des Versuchstandes fertiggestellt. Im Einzelnen wurde die Verrohrung komplettiert, der Kryostatein-



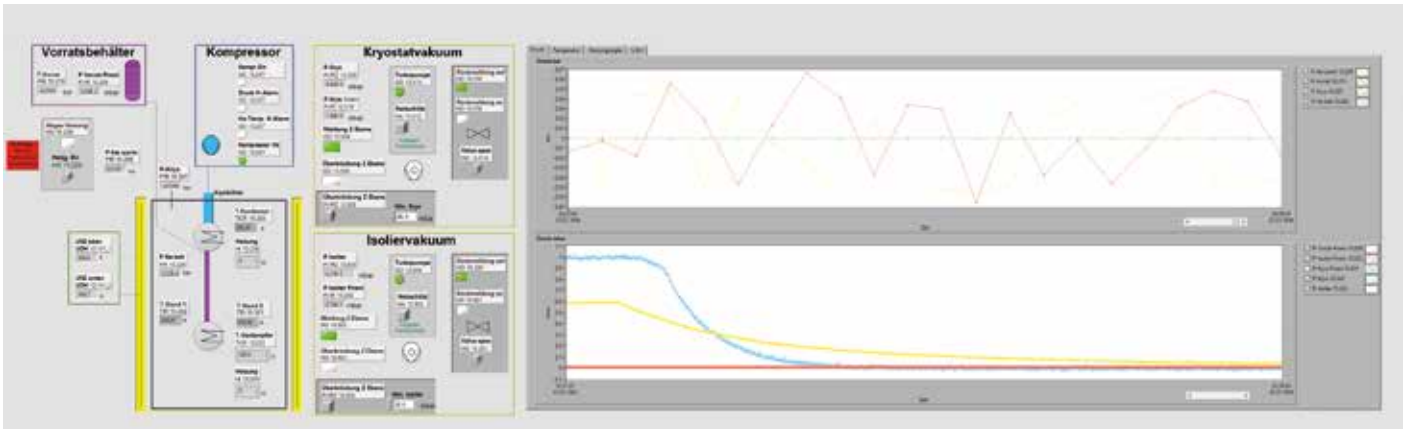


Abb. 2: LabView-Oberfläche zur Steuerung des Heatpipe-Teststandes.

satz finalisiert und sämtliche Pumpen angeschlossen. Dies gilt ebenso für den eigens konzipierten Schaltschrank mit Komponenten zur Steuerung der Pumpen, Heizungen und so weiter und zur Erfassung von Messgrößen, zum Beispiel Temperaturen und Drücke. Die Anlage ist damit bereit zur TÜV-Abnahme. Zur Anlagensteuerung und Prozessdatenaufnahme wurde parallel dazu eine grafische Oberfläche in LabVIEW programmiert (Abbildung 2).

Die Inbetriebnahme der Anlage und erste Versuche sind ab 2024 geplant.

### ARBEITEN ZUM DUDA-SPULENKONZEPT

Als „DUDA“, also ein „disk-up-down-assembly“, wird ein Stapel alternierend geschichteter Supraleiter-Tapes bezeichnet mit einer freien Bohrung in der Mitte. Alternierend bedeutet, die Bänder werden abwechselnd mit der Substrat- und der supraleitenden Schicht nach oben angeordnet, sodass Verbindungen immer zwischen den supraleitenden Seiten der Bänder hergestellt werden können. Dabei kann eine DUDA-Anordnung kreisförmig sein oder, wie in Abbildung 3 dargestellt, in einer rechteckigen Form. Diese Form wird als rDUDA bezeichnet. Diese Art der Anordnung ermöglicht

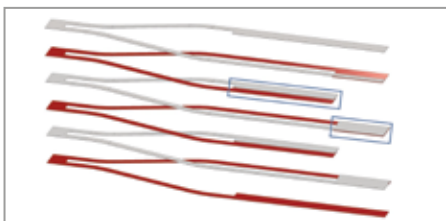


Abb. 3: Aufbau eines rechteckigen DUDA-Stapels; rot: Supraleiter, grau: Substrat, blau umrandet sind die Kontaktstellen.

es, kompakte hohe Magnetfelder in der freien Bohrung des Stapels zu erzeugen und so neue Ansätze zum Beispiel in der Motorentwicklung zu untersuchen.

2023 wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit Techniken zur Bildung niederohmiger Kontaktstellen zwischen REBCO-Tapes systematisch analysiert. Für die Experimente wurden 12 mm breite Tapes der Firma SuperPower verwendet. In einem ersten Schritt wurden Versuchsreihen zu Einzelkontakten durchgeführt. Das bestmögliche Verfahren ergab einen Einzel-Kontaktwiderstand von circa 12 nΩ beziehungsweise einen Flächenwiderstand von circa 33 nΩcm<sup>2</sup>. Unter Verwendung dieses Verfahrens wurden zwei DUDA-Stapel aus vier und sechs Tapes hergestellt.

Abbildung 4 zeigt den DUDA-Stapel, der aus vier Einzeltapes besteht, eingespannt in die Messapparatur. Der Gesamtwiderstand für diesen Stapel mit vier Tapes, das heißt drei Kontaktstellen, betrug 68 nΩ. Für den Stapel mit sechs Bändern beziehungsweise fünf Kontaktstellen ergab sich ein Gesamtwiderstand von 136 nΩ.

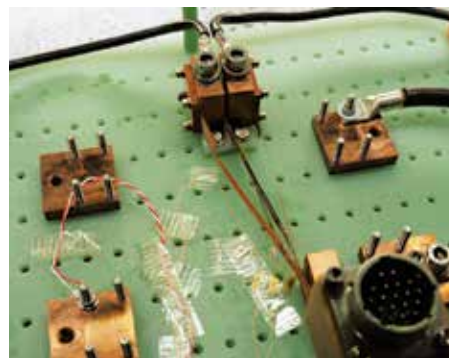


Abb. 4: Messung des rDUDA-Stapels bestehend aus vier Einzeltapes.

### MEESST-PROJEKT

Hoher Wärmefluss und Funkausfall sind bekannte Herausforderungen, denen sich Raumfahrzeuge seit den Anfängen der Raumfahrt beim Wiedereintritt in die Atmosphäre eines Planeten stellen müssen. Zum Schutz von Raumfahrzeugen und Astronauten wurden Wärmeschutzsysteme entwickelt, die jedoch oft schwer sind und teilweise nach jeder Mission ausgetauscht werden müssen. Neben einer möglichen Beschädigung des Raumfahrzeugs führen die hohen Temperaturen des komprimierten Gases zu einer teilweisen Ionisierung in der Stoßwelle. Das dichte Plasma kann einen Radio-Blackout verursachen, das heißt eine Abschwächung oder Reflexion von Funkwellen, wodurch die Datentelemetrie und die Kommunikation mit Bodenstationen oder Satelliten behindert werden können.

Ein Ansatz zur Lösung beider Probleme ist die Beeinflussung des Plasmas durch magnetohydrodynamische Effekte mithilfe eines starken Magneten.

Im Rahmen des europäischen Projekts MEESST (Magneto-Hydrodynamic Entry

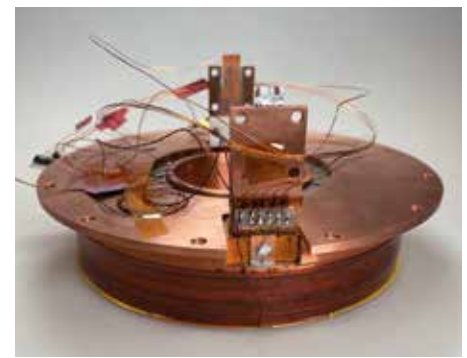


Abb. 5: MEESST Magnet nach der Bestückung mit Sensoren und Spannungsabgriffen.



Systems for Space Transportation) wurde 2022 ein Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) Magnet gefertigt. 2023 wurde der Magnet zunächst mit Sensoren ausgestattet (Abbildung 5) und in der VATESTA-Anlage getestet.

Der Magnet bei einer Temperatur von 30 K konnte mit einem Strom von 50 A betrieben werden. Bei den geplanten Experimenten zur Abschwächung des Wärmeflusses und des Radio-Blackouts entspricht dies einem maximalen Feld von circa 0,7 T im Plasma außerhalb der wassergekühlten Hülle der Sonde. Nach den Tests am KIT wurde der MEESST-Magnet an Absolute Systems (Frankreich) geliefert, wo er in den Kryostaten eingebaut wurde. Im Oktober/November wurden der Magnet und sein Kühlsystem im Plasmakanal des Von-Karman-Instituts für Fluidodynamik (VKI) in Belgien installiert und getestet (Abbildung 6). Erste Experimente zur Abschwächung des Radio-Blackouts sind bis Ende 2023 geplant. Experimente zur Abschwächung des Wärmeflusses sollen im ersten Quartal 2024 am Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) in Stuttgart durchgeführt werden.

Kontakt: frank.hornung@kit.edu

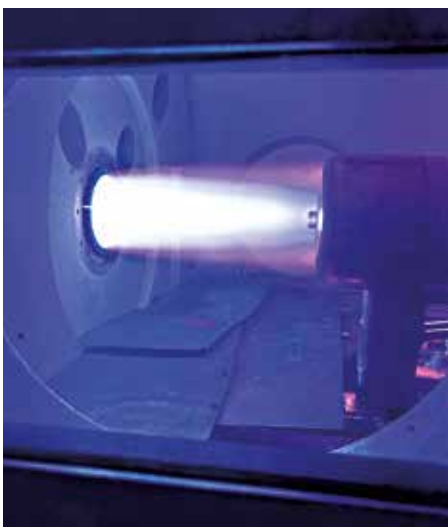


Abb. 6: Erster Plasma-Test mit der installierten MEESST Sonde am VKI.

## HOCHSTROMKOMPONENTEN FÜR WASSERSTOFF UND FUSION

Im Forschungsthema Hochstromkomponenten für Wasserstoff und Fusion wird innerhalb von EUROfusion an HTS-Hochstromleitern für zukünftige Fusionsmagnete sowie im Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE an verschiedenen Themen zu Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff geforscht.

### LNG2HYDROGEN

Das Ziel des 2023 gestarteten TransHyDE-Projekts LNG2Hydrogen besteht in der Erarbeitung einer wissenschaftlich fundierten, nachhaltigen Datenbasis und Empfehlung als Entscheidungsgrundlage für die zukunfts-fähige und langfristige Nutzung von LNG-Terminal-Standorten als logistische Knotenpunkte für Wasserstoff und dessen Derivate. Dabei betrachtet das KIT-ITEP den Transportvektor Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) und trägt zur Entwicklung eines Konzeptes eines Importterminals für LH<sub>2</sub>, zur Bauteilbewertung, zum innerdeutschen LH<sub>2</sub>-Weitertransport und zu Weiternutzungsszenarien bei.

### APPLHY! – TRANSPORT UND ANWENDUNG VON FLÜSSIGEM WASSERSTOFF

Die Arbeiten zu flüssigem Wasserstoff sind im Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE des BMBF angesiedelt. Hier koordiniert das ITEP die Arbeiten des Verbundes ApplHy! zu Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff und ist selbst an allen Arbeitspaketen des Verbundvorhabens beteiligt. Weitere Ergebnisse zu Forschungsarbeiten aus dem Projekt ApplHy! finden Sie auch in den Forschungsthemen STRUKTUR- UND FUNKTIONSMATERIALIEN FÜR KRYOANWENDUNGEN sowie ROTIERENDE MASCHINEN. Um die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, Transportoptionen und Synergien aus dem Flüssigwasserstofftransport zu veranschaulichen, wurde für den Tag der offenen Tür des KIT im Juni 2023 ein interakti-

ves Modell zur Frage „Wie kommt der Flüssigwasserstoff in den Tank?“ erstellt und die Frage mit der interessierten Öffentlichkeit diskutiert (Abbildung 7).



Abbildung 7: Modell zum Flüssig-Wasserstoff-Transport

### HYBRIDE PIPELINE

Die Vorteile von supraleitenden Kabeln gegenüber konventionellen Lösungen sind unter anderem der geringere Raumbedarf für die Trassenführung, geringere elektrische Verluste, höhere Leistungsdichten und die Möglichkeit, durch höhere Ströme eine vorgegebene Leistung auf einem geringeren Spannungsniveau zu übertragen. Um den supraleitenden Zustand aufrechtzuerhalten, muss das Kabel jedoch unter die Sprungtemperatur des Supraleiters abgekühlt und bei dieser Temperatur gehalten werden. Beim Einsatz von flüssigem Wasserstoff mit Temperaturen von circa 20–25 K wird dieses Temperaturniveau quasi ohne Mehraufwand mitgeliefert, sodass in einer hybriden Pipeline chemische Energie (LH<sub>2</sub>) und elektrische Energie (supraleitendes Kabel) besonders effizient übertragen werden können.

### AUSLEGUNG BEIM ÜBERSTROMVERHALTEN

Das Design einer hybriden Pipeline muss einen sicheren Betrieb gewährleisten. Dies

beinhaltet auch die Betrachtung eines Kurzschlusses im elektrischen Netz.

Das Kabelmodell simuliert das Verhalten der einzelnen Bestandteile im Fall eines Kurzschlusses. Das Ziel der adiabatischen OD Simulation ist, die Auswirkungen des angenommenen Überstromverlaufs auf die Temperatur, den Widerstand, die Spannung und die Aufteilung des Stromes in den Materialien des Kabels zu berechnen. Anhand dieser Größen kann bewertet werden, ob der angenommene Querschnitt des Kupferstabilisators geeignet ist, den angenommenen Kurzschlussfall sicher zu beherrschen.

Als Rahmenbedingungen wurden Wasserstoffbedarfe in der Region Brunsbüttel/Hamburg zugrunde gelegt: Länge circa 75 km, installierte elektrische Leistung 4 GW ( $\pm 100$  kV, 20 kA) und eine installierte LH<sub>2</sub>-Leistung von 617–869 MW. Als Eingangstemperatur des LH<sub>2</sub> wurden 20,4 K angenommen.

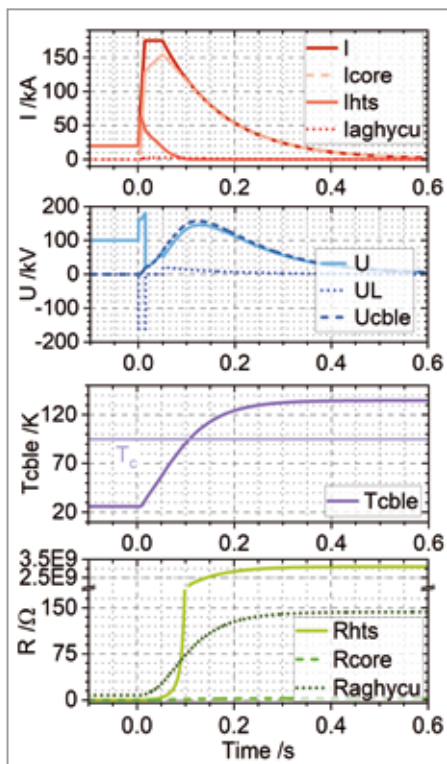


Abb. 8: Kabelverhalten im Überstromfall.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass ein Kabel mit einem Kupferstabilisator-Querschnitt von 190 mm<sup>2</sup> in der Lage ist, die Spannungs- und Temperaturanforderungen bei einem maximalen Strom von 175 kA zu erfüllen.

Abbildung 8 stellt den Strom-, Spannungs-, Temperatur- und Widerstandsverlauf der einzelnen Komponenten bei der oben genannten Konfiguration dar. „Core“ steht für den Kupferstabilisator, „AgHyCu“ für alle Materialien außer dem HTS im Tape, „L“ für die Kabelinduktivität und „Cble“ für das gesamte Kabel. Ein schematischer Überblick über die Kabelgeometrie ist in Abbildung 9 dargestellt.

#### DESIGN EINER 10 kA-PROTOTYP-PIPELINE

Aus den Ergebnissen der Überstromberechnung und basierend auf den Arbeiten des vergangenen Jahres, wurde eine detaillierte Kabelauslegung abgeleitet. Das Modell kann flexibel an verschiedene Anforderungen angepasst werden und als Grundlage für den geplanten Pipeline-Demonstrator am ITEP dienen. Der Prototyp ist als DC-Kabel mit Hochtemperatur-Supraleitern vorgesehen (REBCO-Bandleiter) und soll 200 MW elektrische Leistung übertragen ( $U_{op} = \pm 10$  kV,  $I_{op} = 10$  kA). Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau mit konzentrischen Phasen zur Minimierung des elektromagnetischen Streufeldes.

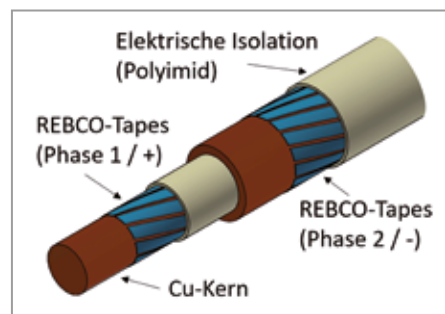


Abbildung 9: Schematischer Aufbau mit zentralen Elementen des 2-phasigen HTS-DC-Kabels.

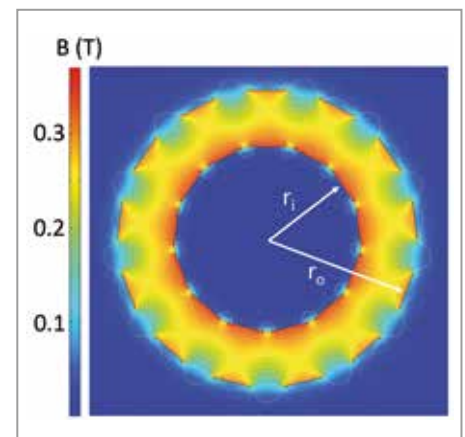


Abbildung 10: Darstellung der magnetischen Flussdichte  $B$ .  $r_i = 7,4$  mm,  $r_o = 12$  mm,  $I_c > 12$  kA, 13 Tapes pro Phase (Breite 3 mm).

Aufgrund der hohen Durchschlagsfestigkeit und Verträglichkeit sowohl mit Wasserstoff als auch mit kryogenen Temperaturen besteht die elektrische Isolation aus kreuzweise gewickelter Polyimidfolie. Den Kabelkern zur thermoelektrischen und mechanischen Stabilisierung bilden Kupferlitzenbündel. Für die Auslegung des Supraleiterbedarfs – das heißt Breite und Anzahl der benötigten REBCO-Tapes – wurde ein FE-Modell mit COMSOL erstellt. Das Modell berechnet selbstkonsistent das elektromagnetische Feld in Abhängigkeit der Stromdichte (A-Formulierung). Die in Abbildung 10 dargestellten Ergebnisse liefern den Radius des inneren Kupferstabilisators im Konsens zur Überstromberechnung sowie den Abstand zur äußeren Phase und legen damit die geometrischen Abmessungen des Kabels fest.

Um geeignete Bandleiter für die Herstellung des Kabelprototypen zu identifizieren, wurden des Weiteren umfangreiche Auslagerungstests zur Materialverträglichkeit in gasigem Wasserstoff bei Raumtemperatur durchgeführt. Abbildung 11 zeigt, dass die Tapes von Hersteller B nach längerer H<sub>2</sub>-Exposition degradieren, während bei Hersteller A keine Auswirkung auf die kritische Stromdichte festgestellt werden konnte.

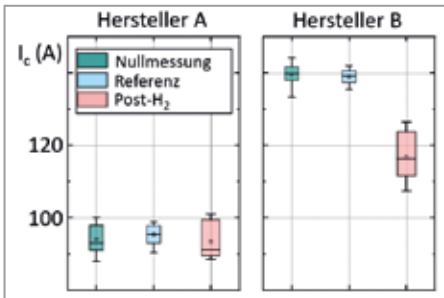


Abbildung 11:  $I_c$ -Messungen vor (Nullmessung) und nach (Post-H<sub>2</sub>) einer längeren H<sub>2</sub>-Exposition von REBCO-Tapes verschiedener Hersteller.

Der beobachtete Effekt wird in weiterführenden Experimenten näher untersucht.

Kontakt: michael.wolf@kit.edu

## ROTIERENDE MASCHINEN

### DUDA (DISK UP-DOWN ASSEMBLY)-SPULEN: EINE TOPOLOGIE AUF DEM VORMARSCH

Systeme, die kompakte Magnete mit hoher magnetischer Flussdichte, geringen Abmessungen, effizienterem Wärmeaustausch und Homogenität des Materials in radialer Richtung erfordern, profitieren stark von dieser Topologie.

2023 wurden die elektromagnetischen Eigenschaften von DUDA-Spulen und ihre Wechselstromverluste in Drehstrommotoren diskutiert. Durch den Einsatz vereinfachter Techniken wie paralleler Verzweigungen und größerer zentraler Öffnungen entstanden kompakte supraleitende Wicklungen, die eine Reduzierung der Wechselstromverluste um bis zu 80 % aufwiesen.

Abbildung 12 zeigt die magnetische Flussdichte in einem Stapel mit einer aus 50 Bändern bestehenden DUDA-Spule. Die zentrale Öffnung betrug 2 mm bei der Topologie mit einem Zweig (linke Abbildung) und 10 mm bei drei Zweigen (rechte Abbildung).

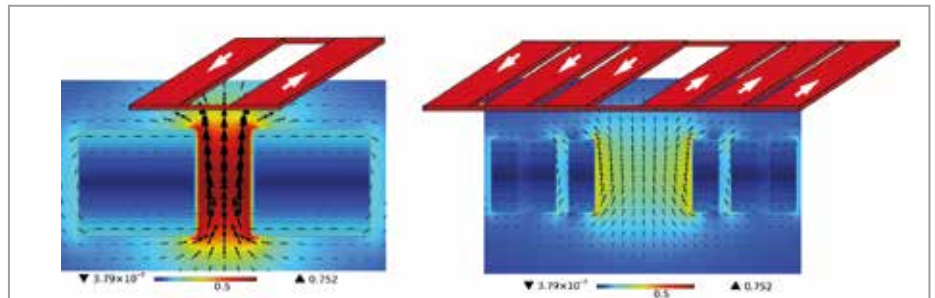


Abb. 12: Magnetische Flussdichte [T] auf einer DUDA-Spule mit 50 Bändern und einem Strom von 90 A bei 400 Hz. Die linke Abbildung zeigt eine Breitenöffnung von 2 mm, während die rechte Abbildung eine Breitenöffnung von 10 mm zeigt. Der Abstand zwischen den Abzweigen bei der Topologie mit drei Abzweigen beträgt 0,75 mm.

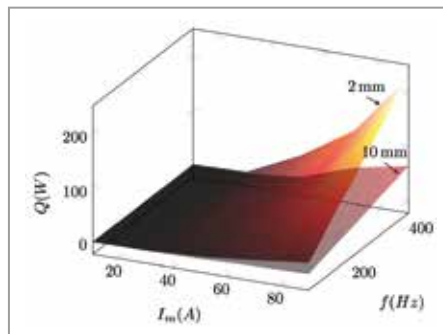


Abb. 13: AC-Verluste [W] in DUDA-Spulen mit 50 Bändern und einem Strom von 90 A bei 400 Hz, mit einem Zweig und Öffnungen von 2 und 10 mm.

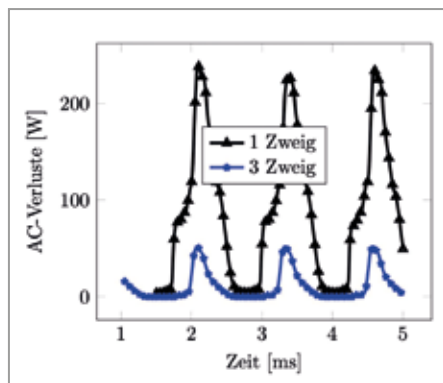


Abb. 14: AC-Verluste [W] in DUDA-Spulen mit 50 Bändern und einem angelegten Strom von 90 A bei 400 Hz für die 1-Zweig- und die 3-Zweig-Topologie.

Die Spulen sind als dünne Linie dargestellt, die Pfeile repräsentieren den elektrischen Stromfluss. Die Ergebnisse der Wechsel-

stromverluste, die durch numerische Simulation mit einem Strom von 90 A bei 400 Hz und verschiedenen Öffnungsweiten und Anzahlen paralleler Abzweigungen ermittelt wurden, sind in den Abbildungen 13 + 14 dargestellt. Eine wichtige Schlussfolgerung aus den Ergebnissen lautet, dass die Öffnung in Abhängigkeit von der Frequenz des angelegten Stroms vergrößert werden muss. Außerdem sollten bei Systemen mit hohem Strombedarf parallele Abzweigungen verwendet werden, um die Verluste auf einem akzeptablen Niveau zu halten.

Die Erwartungen an diese neue HTS-Spulentopologie und ihren Einsatz in Elektromotoren sind hoch. Mit niedrigem Übergangswiderstand, rechteckigen oder scheibenförmigen Formen und der Möglichkeit völlig neuer Wicklungstopologien verspricht diese Technologie eine noch deutlichere Steigerung der Motoreffizienz durch geringere Verluste und eine höhere magnetische Flussdichte. Halbach-geformte Spulen eignen sich besonders für teilsupraleitende Motoren und ermöglichen eine höhere Leistungsdichte in diesen immer beliebter werdenden elektrischen Maschinen.

Bei der Herstellung von Spulen mit einer hohen Anzahl von Windungen sowie bei der Herstellung der supraleitenden Stapel-



ebenen sind einige zukünftige Herausforderungen zu bewältigen. HTS-Stapel können für den Bau von Motoren mit Käfigläufern, Wicklungen mit einer hohen Anzahl von parallelen Zweigen und geringeren Verlusten verwendet werden.

**SUPRALEITENDE MOTOREN:  
HOHE LEISTUNGSDICHTE.**

Supraleitende Motoren sind für mobile Anwendungen, zum Beispiel Schwebekähnen, Flugzeuge und Schwerlastfahrzeuge, attraktiv. Die führenden Unternehmen in diesen Sektoren investieren in die Forschung und Entwicklung dieser elektrischen Maschinen. In der Stromerzeugung werden HTS-Maschinen bereits in Windturbinen eingesetzt, und die Fortschritte bei der Herstellung von 2G-HTS-Bändern unterstützen diese Entwicklung. Auch die zunehmende Bedeutung von Wasserstoff im Energiesystem trägt zu diesem Trend bei. Hilfsgeräte, Komponenten der Leistungselektronik und Messsensoren, die Kontrollsysteme in kryogenen Umgebungen ergänzen, entwickeln sich schnell.

Es wurden vollsupraleitende Motoren entworfen und simuliert, die eine hervorragende Leistung für Anwendungen in Kraft-

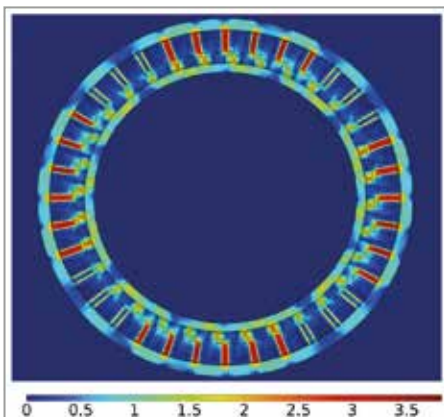


Abb. 15: Vollsupraleitender HTS-Motor mit DUDA-Spulen in Rotor und Stator.

fahrzeugen aufweisen. Diese Motoren erzeugen ein Drehmoment von 5 kNm und eine Ausgangsleistung von 260 kW (eine Beispieltopologie ist in Abbildung 15 zu sehen). In einem kürzlichen Auftragsprojekt wurden die DUDA-Spulen in der Feld- und in der Ankerwicklung eingesetzt, was zu einem Wirkungsgrad von etwa 96 % führte. Die durchschnittlichen AC-Verluste pro Phase wurden mit 3,6 kW veranschlagt.

Normalerweise benötigen supraleitende Motoren keine ferromagnetischen Zähne, da ihr Einsatz in HTS-Maschinen wegen der Sättigung bei Magnetflüssen von mehr als 2T keine Vorteile bietet. Studien, die am ITEP durchgeführt wurden, legen jedoch nahe, dass ferromagnetische Zähne die Wechselstromverluste in der Ankerwicklung einiger Maschinentypen verringern können. Dieser Ansatz beruht auf DUDA-Spulen in einer halbkreisförmigen Topologie, deren konkaves oder konvexes Spulendesign (Abbildung 16) bessere Ergebnisse liefert als herkömmliche flache Spulen. Die Verlustreduzierung kann bis zu 46 % betragen.

In diesem Jahr wurden teilweise supraleitende Maschinen untersucht, angelehnt an den von der Siemens AG erbauten 4-MW-Generator aus dem Jahr 2012. Numerische Simulationswerkzeuge ermöglichen eine detaillierte multiphysikalische Analyse der

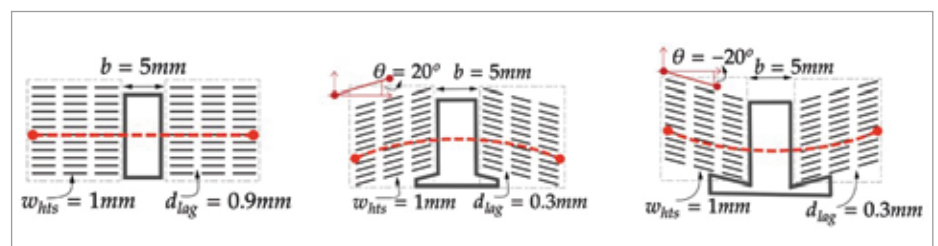


Abb. 16: DUDA-Rechteckspulen mit ebener, konkaver und konvexer Form. Die verschiedenen Zahnformen sind abgebildet.

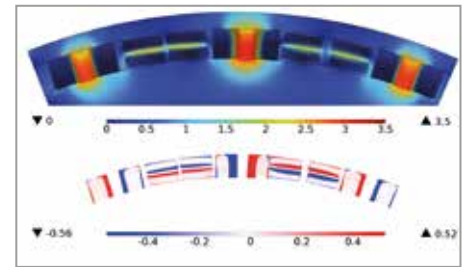


Abb. 17: Magnetische Flussdichte [T] (oben) und  $J_z/J_c$  (B) (unten) von DUDA-Rechteckspulen in einer Halbach-Formation.

Maschinen einschließlich ihres elektromagnetischen, thermischen und mechanischen Verhaltens. So können auch die Geometrie, der Materialeinsatz und die Topologie optimiert werden.

In Studien wurden auch die Topologien von teilsupraleitenden Motoren mit Feldwicklung in Halbach-Formation mit DUDA-2G-HTS-Spulen analysiert (Abbildung 17). Es wurde festgestellt, dass Motoren mit relativ niedriger linearer Stromdichte, aber mit hoher magnetischer Feldstärke ein Drehmoment von 6 kNm erzeugen können. Diese Ergebnisse wurden bei einer erheblichen Verringerung des Rotorvolumens erreicht. Die Vielseitigkeit der DUDA-Spulen ermöglicht es den Konstrukteuren, Maschinenwicklungen mit einer großen Bandbreite an magnetischen Feldstärken in kleinen Volumina zu realisieren.

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

# Highlight

## Präparation einer HTS-Fusionskabelsektion für Quench-Untersuchungen

Im Rahmen des EU-CN-Kollaborationsvertrags im Bereich FUSION nimmt das ITEP an einer Messkampagne zur Untersuchung des Quench-Verhaltens von HTS-Fusionsleitern teil. Innerhalb dieses Programms sollen von mehreren Forschungszentren Proben mit kritischen Strömen von  $\leq 15$  kA bei 4 K und 11 T in der SULTAN-Anlage des Paul Scherrer Instituts in Villingen in der Schweiz getestet werden. Ziel der Testreihe ist das tiefere Verständnis der Quench-Ausbreitung in HTS-Leitern für Fusionsanwendungen. Die Geometrie der Proben ist anlagenseitig vorgegeben: Sie besteht aus zwei geraden, circa 3,6 m langen Probenbeinen, die über einen Klemmkontakt in Reihe verschaltet sind. Der Strompfad beschreibt die Form eines „U“, wodurch sich beide Kontakte der Probe zur Anlage am selben Ende der Probe befinden. Jedes der beiden Beine wird durch einen separaten Helium-Kühlkreislauf gekühlt. Durch diesen Aufbau ist es möglich, für jedes Probenbein individuelle Prüftemperaturen einzustellen und gezielt einen Quench herbeizuführen. Dieser kann wahlweise durch einen Heizer oder eine Variation der Heliumtemperatur ausgelöst werden.

2023 wurden die letzten Schritte der Probenfertigung durchlaufen. Sie enthielten

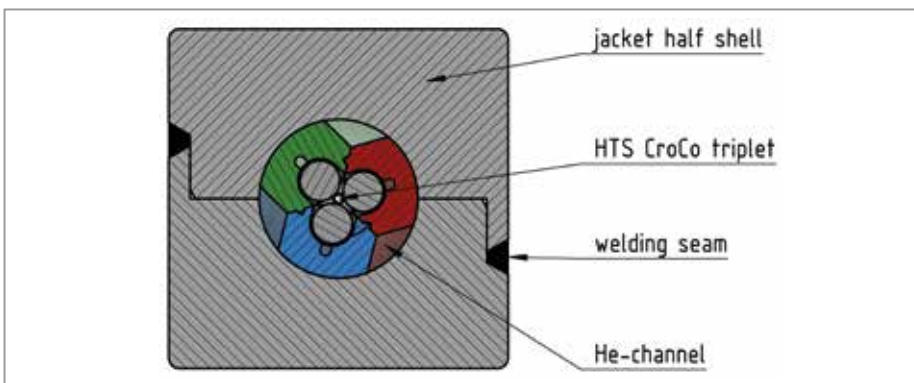


Abb. 18: Querschnitt des SULTAN-Leiters. Der Kern besteht aus einem CroCo-Triplett, wobei an jeden CroCo jeweils ein Kupferprofil zur Stabilisierung angelötet ist. Das Jacket besteht aus zwei Edelstahlhalbschalen.

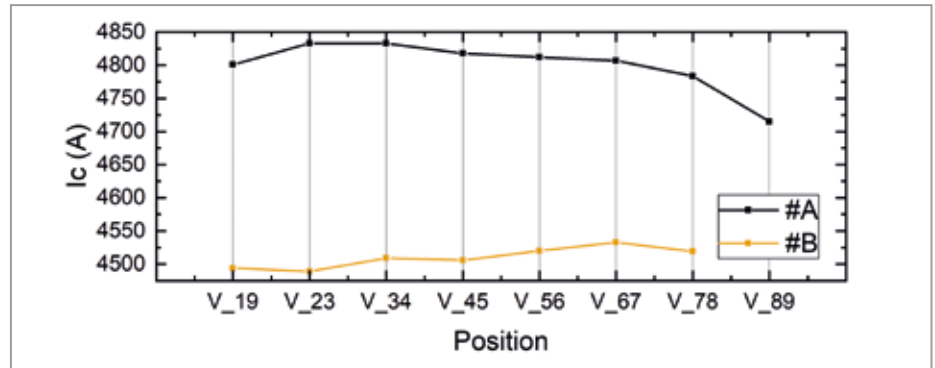


Abb. 19: Ergebnisse der  $I_c$ -Messungen entlang der Probe. Der Unterschied zwischen den Probenbeinen #A und #B rührt von Unterschieden im Layout der Teileiter. Im Gegensatz zu Bein #A ist der kreuzförmige Stack des CroCo-Leiters im Bein #B zusätzlich vertwistet.

die Längsschweißung zum Schließen der beiden Edelstahlhalbschalen des Jackets, die Lötungen der Anschlusskontakte sowie die finale Montage der Probenbeine und des mechanischen Supports zum Abfangen der Lorentzkräfte von bis zu 165 kN/m während des Experiments. Die beiden Sub-Size-Fusionsleiter bestehen aus verseilten HTS-CroCo-Triplets. Ein Querschnitt des Leiters ist in [Abbildung 18](#) zu sehen. Parallel zur Probenfertigung wurde ein Temperaturmesssystem auf Basis von Fiber-Bragg-Gratings aufgebaut und von 3,8 bis 400 K erprobt. Dieses Verfahren ermöglicht eine hohe Sensordichte bei wenig Platzbedarf,

wodurch eine Temperaturmessung direkt am Supraleiter im Inneren der Probe ermöglicht wird. Eine Kaskade an Spannungsabgriffen und Temperatursensoren, sowohl im Inneren als auch auf dem Jacket, soll eine möglichst genaue Beobachtung der Quench-Ausbreitung ermöglichen.

Am Ende des Jahres wurde nach Fertigstellung der Probe ein Funktionstest bei 77 K erfolgreich durchgeführt. Der kritische Strom sowie alle elektrischen Kontakte entsprechen den Erwartungen beziehungsweise lagen innerhalb der Vorgaben für eine erfolgreiche Testkampagne in SULTAN. Der kritische Strom der beiden Beine lag bei circa 4800 A und 4500 A. Der Erwartungswert lag bei 4800 A ohne Berücksichtigung der Magnetfelder benachbarter CroCos. Der Verlauf des kritischen Stroms entlang der Probe ist in [Abbildung 19](#) dargestellt.

Im Frühjahr 2024 stehen nun noch zwei Abkühlzyklen bis 4,2 K zum Kalibrieren der Glasfaserthermometer sowie die finale Dichtheitsprüfung vor dem Versand in die Schweiz an.

# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Gerd Fürniß, Martin Jäger und Jürgen Jung bereiten JASON vor, das Vorprojekt zu DIPAK. JASON ist benannt nach dem griechischen Helden, der mit Triton kämpfen musste – so wie wir.



# Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

Koordination: Dr.-Ing. 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: Materiejektion, Vakuumtechnik und Tritiumtechnologie.

Vor diesem Hintergrund haben sich im Forschungsfeld drei Forschungsthemen herausgebildet:

- Vakuumtechnologie und Prozessintegration,
- Strömung verdünnter Gase sowie
- Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation.

Der Großteil der Arbeiten ist im Europäischen Fusionsprogramm EUROfusion verankert, das bis 2027 ein Konzeptdesign des Demonstrationsfusionskraftwerks DEMO erarbeiten wird.

## VAKUUMTECHNOLOGIE UND PROZESSINTEGRATION

Das Forschungsthema „Vakuumtechnologie und Prozessintegration“ adressiert alle vakuumtechnischen Fragen rund um eine Fusionsanlage und entwickelt einen integrativen Ansatz für ihre Beschreibung. Die Arbeiten decken auch Vakuumtechnologien für andere Großanlagen in der Fusion ab wie für die europäische Neutronenquelle IFMIF-DONES in Spanien oder die Fusionsexperimente JT-60SA in Japan und DTT in Italien.

2023 konnte die langjährige Entwicklung des Brennstoffkreislaufsimulators erfolgreich abgeschlossen werden. Es handelt sich um ein auf der Prozesssimulationssoftware ASPEN aufgesetztes Werkzeug, das alle Systemblöcke des Brennstoffkreislaufs und die darin enthaltenen Prozesse selbstkonsistent und zeitabhängig beschreibt. Damit können nicht nur Dimensionierungen von Subsystemen vorgenommen oder Optimierungspotenziale erkannt und ausgeschöpft werden, sondern auch Langfrist-

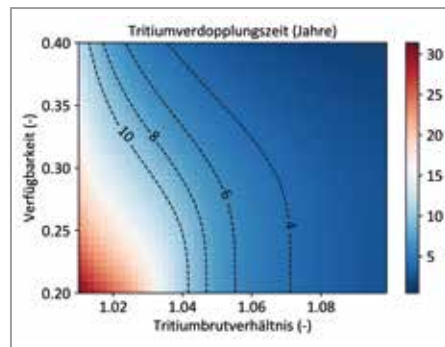


Abb. 1: Dargestellt ist die Abhängigkeit der Zeitdauer bis zur Verdopplung des Tritiuminventars von der Verfügbarkeit und dem Tritiumbrutverhältnis, bei konstant angenommenem Inventar von 2 kg für den Betrieb des Brennstoffkreislaufs.

verläufe im Reaktorbetrieb abgebildet werden. **Abbildung 1** zeigt dazu beispielhaft einen typischen Ergebnisplot zum Lebenszyklus eines Fusionskraftwerks. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für das Ausrollen einer fusionskraftwerksbasierten Energieerzeugungsstrategie ist es, das Tritiuminventar zum Anfahren zur Verfügung zu haben, bevor die In-situ-Erzeugung in den Brutblankets die Tritiumerzeugung übernimmt. **Abbildung 1** verdeutlicht, wie die Gesamtanlagenverfügbarkeit und das Tritiumbrutverhältnis (das Verhältnis von erzeugtem Tritium zum in der Fusionsreaktion verbrauchten Tritium) dazu beitragen, die Zeitdauer zur Verdopplung zu verringern.

Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeiten 2023 war die Weiterentwicklung der Kryopump-Vakuumsysteme am Divertor-Test-Tokamak (DTT), einer neuen Fusionsanlage, die sich derzeit bei Rom in Italien im Aufbau befindet (**Abbildung 2 oben**).

DTT soll die Divertorlösung von DEMO entwickeln und demonstrieren. Der Betrieb er-

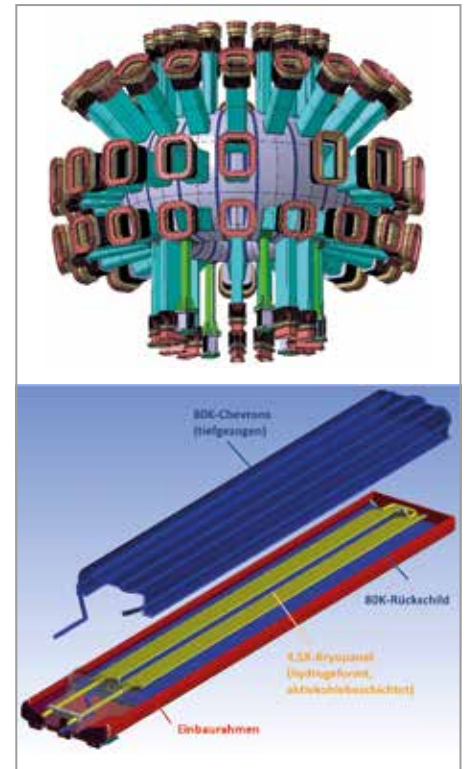


Abb. 2: Das DTT-Vakuumgefäß (für etwa 35 m<sup>3</sup> Plasmavolumen) mit den unteren vertikalen Stützen (oben). Aufbau der vorgeschlagenen Kryopumpen (unten).

folgt ohne Tritium. Zur Simulation eines brennenden Plasmas sollen die Divertorpumpensysteme jedoch auch ein Saugvermögen für Helium aufweisen. Dies wird mit der Kryopumpentechnologie erreicht, die am Institutsbereich Vakuumtechnik über viele Jahre für ITER entwickelt wurde. Im Berichtsjahr wurde zunächst ein Konzeptdesign des DTT-Kryopumpensystems entwickelt (**Abbildung 2 unten**). Es umfasst zehn baugleiche Einheiten, die in den unteren vertikalen Stützen der Maschine eingebaut werden. Jede Pumpeinheit hat zwei etwa 2 m lange Kryopanelle, die gegeneinander

angewinkelt angeordnet sind, und mit 4,5 K superkritischem Helium versorgt werden. In Richtung Stutzenwand ist ein thermisches Schild angebracht, und auf der anderen der Gaslast zugewandten Seite befindet sich ein Chevron-Schild. Die Schilde werden bei 80 K betrieben. Die gesamte Einheit ist auf einem Einbaurahmen angeordnet, was einen einfachen Ein- und Ausbau sicherstellt.

Der Institutsbereich Vakuumtechnik ist mit seiner Kryovakuum-Expertise auch am Einstein-Teleskop (ET) beteiligt. Das Einstein-Teleskop ist ein europäischer Gravitationswellen-Detektor der dritten Generation, der rund 10-mal empfindlicher als die heutigen Instrumente (LIGO, Virgo) sein wird. Das Einstein-Teleskop wird eines der größten Ultrahochvakuumssysteme der Welt sein.

Die sich für ET erhoffte Verbesserung in der Sensitivität gegenüber Gravitationswellen ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der Druck in den Strahlrohren deutlich kleiner sein soll als in bisherigen Anlagen ( $10^{-10}$  mbar Totaldruck mit Partialdrücken für schwere Komponenten unterhalb

$10^{-14}$  mbar). Eine weitere Verbesserung im Niederfrequenzbereich ist wesentlich auf einen kryogen gekühlten Detektorspiegel zurückzuführen.

Die am kryogenen Spiegel auftreffenden Gasteilchen müssen weitestgehend eliminiert werden, da sie den Hintergrund erhöhen. Auch kondensierbare Spezies wie Wasser müssen effektiv abgepumpt werden, um die optischen Eigenschaften des Spiegels nicht negativ zu beeinflussen und die Absorption der Laserenergie akzeptabel kleinzuhalten.

In **Abbildung 3** sind verschiedene Simulationen zusammengestellt, in denen die Kryopumplängen auf beiden Seiten des kryogenen Spiegels variiert wurden. Dargestellt sind die resultierenden Wasserpartialdrücke und die daraus folgenden Betriebszeiten des Spiegels bis zum Aufbau einer Monolage. Es zeigt sich, dass beträchtliche Kryopumplängen von einigen 10 m nötig sind, um das Ziel von einem Jahr unterbrechungsfreien Betrieb sicherzustellen.

Kontakt: christian.day@kit.edu

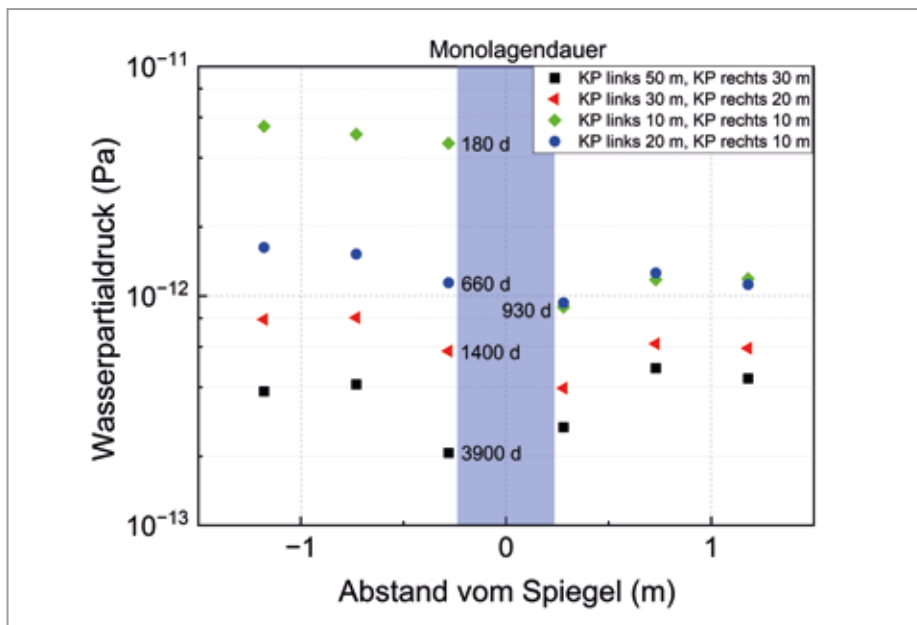


Abb. 3: Berechnete Druckprofile von Wasser in der Umgebung des kryogenen Spiegels.

## STRÖMUNG VERDÜNNTER GASE

Zur korrekten Auslegung von komplexen Vakuumsystemen wie im Fusionsbrennstoffkreislauf ist es unerlässlich, verdünnte Gasströmungen über alle Strömungszustände hinweg quantitativ zu berechnen. Dies geschieht exakt durch Lösen der Boltzmann-Gleichung, welche die Strömung im gesamten Bereich der Verdünnung beschreibt. Für die Lösung dieser Gleichung für realistische Anwendungen (komplexe Geometrien, 3D, Gasmischungen) wurden am Institutsbereich Vakuumtechnik verschiedenste Rechenwerkzeuge entwickelt. In der Regel sind die Rechnungen so aufwendig, dass hochparallele Supercomputer verwendet werden müssen, um in einer akzeptablen Zeit (Größenordnung von Wochen) zu konvergierten Lösungen zu kommen. Für Berechnungen im Divertorbereich haben wir dazu den Code DIVGAS etabliert.

2023 wurden mit DIVGAS abschließende Berechnungen für den DTT-Divertor durchgeführt.

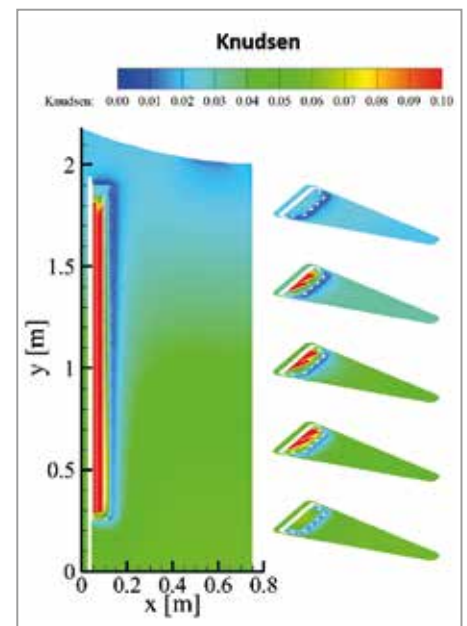
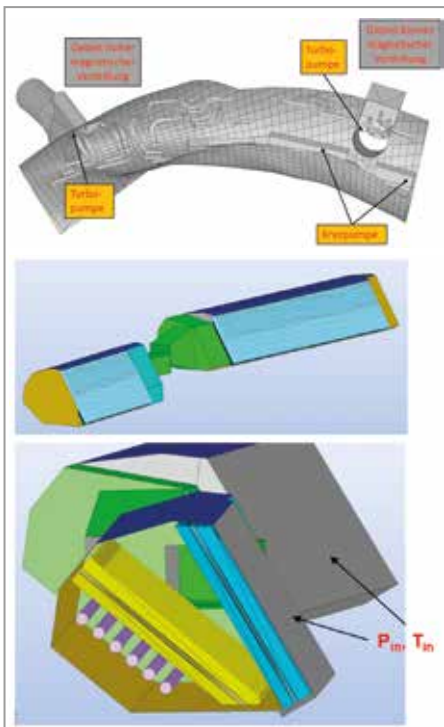


Abb. 4: Verlauf der Knudsen-Zahl in dem mit einer Kryopumpe ausgerüsteten Pumpstutzen von DTT.

Während man in der Konzeptentwicklungsphase der DTT-Vakuumsysteme in den Jahren 2021 und 2022 das erreichte Saugvermögen der DTT-Kryopumpen nur abschätzen konnte, wurde 2023 schließlich das aktuelle Design der Pumpen mit dem vorhandenen 3D-Modell des Divertors verbunden. Als Ergebnis haben wir gezeigt, dass die Kollisionsalität der Strömung (Knudsen-Zahlen kleiner als 1 (Abbildung 4) ausreicht, um ein signifikant höheres Saugvermögen zu erzielen. Damit können leitwertbedingte Verluste in den Divertorspalten fast vollständig kompensiert werden. Dies ist ein sehr wichtiges Ergebnis, da dies den experimentellen Arbeitsbereich der Maschine weiter verbreitert.

Auch das Divertorpumpensystem des Stellarators W7-X wurde 2023 weiter mit DIVGAS analysiert. Hier versuchen wir zusammen



**Abb. 5: Modelle der Divertorsektion von W7-X (oben) und der Kryopumpe (Mitte). Im Schnitt der Kryopumpe zu sehen (unten) sind Pumpelemente bei 4 K (rosa) und Schilde bei 80 K (gelb) und 300 K (hellblau).**

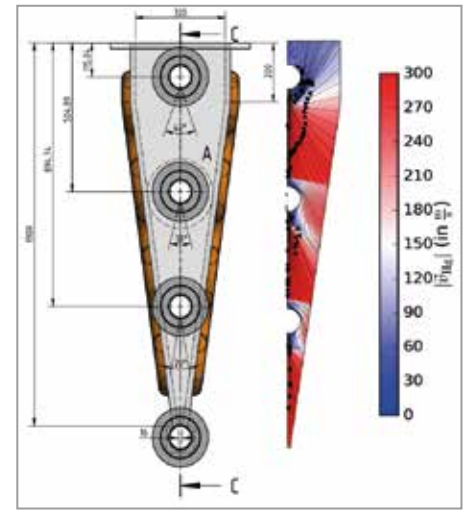
mit den Plasmaphysikern in Greifswald, die Funktionsweise des bei W7-X eingesetzten Inseledivertors besser zu verstehen, nachdem in den letzten Versuchskampagnen herausgefunden wurde, dass die Teilchenabfuhr nicht so gut funktioniert wie erwartet. **Abbildung 5** zeigt die modellierte Sektion des Stellarators, die mit Kryopumpen und Turbopumpen ausgestattet ist. Die graue Fläche im Schnittbild im unteren Teil der Abbildung ist die Grenzfläche zum Divertor, in dem die Anfangsbedingungen Druck und Temperatur von Plasmasimulationen übernommen werden.

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

## VAKUUMHYDRAULIK UND WASSERSTOFFSEPARATION

Das Forschungsthema „Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation“ umfasst die Arbeiten zur Wasserstoffisotopenseparation durch Wasserstoff-Metall-Wechselwirkungen sowie sämtliche Arbeiten, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, vor allem Flüssigmetallen, in Maschinen und Prozessen unter Vakuum beschäftigen. Das Referenzkonzept für das Torusvakuumsystem des europäischen Demonstrationsfusionskraftwerks DEMO sieht drei verschiedene Pumpentypen vor, die allein an diesem Institut entwickelt werden.

Für die Metallfolienpumpe, die das Gas nicht nur komprimiert, sondern auch den Großteil des unverbrannten Brennstoffs im Abgas separiert, wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt, um skalierbare Aussagen zu Separationsfaktor und Saugvermögen abzuleiten. Dazu wurde ein Testpartikel-Monte-Carlo-Modell mit wenigen spezifischen Parametern aufgesetzt, deren Werte aus experimentellen Daten der HERMES-Anlage sowie eigenen parametrischen Simulationen des Plasmas zur Erzeugung der suprathemalen Teilchen abgelei-



**Abb. 6: Design der Quecksilberdiffusionspumpe für DEMO, zusammen mit den Stromlinien des Quecksilberdampfes.**

tet wurden. Damit konnten schließlich verschiedene Anordnungen von Plasmaquellen und Metallfolienoberflächen gerechnet werden, um die optimale Konfiguration zu finden. Diese wird jetzt im nächsten Schritt die Basis für das Design einer Testpumpe in der weiter unten beschriebenen Testanlage DIPAK bilden.

Nach der Metallfolienpumpe schließt sich stromabwärts eine Kombination aus quecksilberbasierten Diffusionspumpen und zugehörigen Grobvakuumumpen (Ejektorpumpen, Ringpumpen) an. Alle Pumpentypen sind Neuentwicklungen und haben inzwischen einen fortgeschrittenen Designstatus erreicht. Das derzeitige Design einer dreistufigen linearen Diffusionspumpe ist in **Abbildung 6** dargestellt.

Für die weitere Kompression des Gases werden Ejektorpumpen eingesetzt, die direkt an die Diffusionspumpen angekoppelt sind, siehe **Abbildung 7**. Hierzu wurde ein Testdesign entwickelt, das im HgLab Karlsruhe geprüft werden soll.

Im Bereich Wasserstoffisotopenseparation mit dem Temperaturwechselverfahren



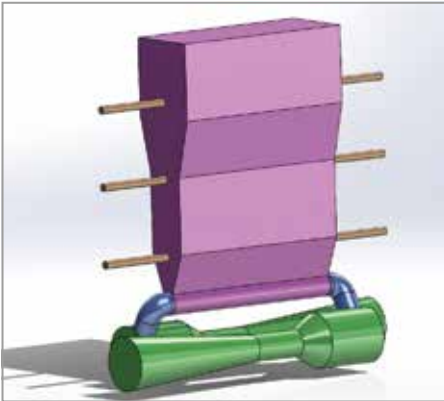


Abb. 7: Konzept für die Integration einer Diffusionspumpe (rosa) mit einer Ejektorpumpe (grün).

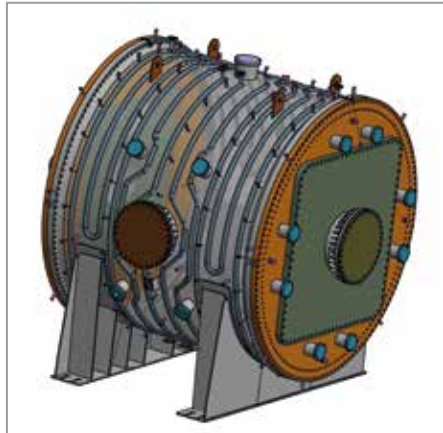


Abb. 8: Der zentrale Testbehälter von DIPAK.



Abb. 9: Die Testanlage JASON, das Vorexperiment zu DIPAK.

konnte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut eine vielversprechende Titan-Mangan-basierte Legierung gefunden werden, deren Betriebsfenster gut mit dem geplanten Prozess in DEMO zusammenpasst.

In den nächsten Jahren werden die oben beschriebenen Neuentwicklungen zur Prototypenreife führen. Der nächste logische Schritt ist dann der Bau und der Test der einzelnen Prototypen in ihrem Zusammenspiel im Brennstoffkreislauf. Um die Dynamik des Gesamtprozesses korrekt abzubilden, ist es dazu nötig, die beiden inneren der drei Kreisläufe komplett zu realisieren, also inklusive der Materiezufuhr über Pelletinjektion. Dies erfordert eine eigene Testumgebung. Diese wird im Großprojekt DIPAK (Direct Internal Recycling Integrated Development Platform Karlsruhe) zur Ver-

fügung gestellt, das jetzt Fahrt aufgenommen hat. Im Berichtszeitraum wurde das Bauprojekt zur Bereitstellung der Versuchshalle ebenso auf den Weg gebracht wie die Beschaffung des zentralen Testbehälters, der den Torus eines zukünftigen Fusionskraftwerks simulieren wird (Abbildung 8). Hier handelt es sich um einen elektropolierten und ganzmetallgedichteten Hochvakuumbehälter aus Edelstahl mit einem Volumen von etwa 20 m<sup>3</sup> (LxD = 3,5 m x 3,5 m) und einem Gesamtgewicht von etwa 20 t. Die Rechteckflansche an beiden Seiten des Behälters haben eine Größe von 2 x 2 m und erlauben daher das Testen von ‚Pump casks‘ für ITER oder DEMO im Maßstabsverhältnis 1:1.

Die Fertigstellung von DIPAK wird erst für 2027 erwartet. Um die Zeit bis dahin zu

nutzen, werden wir im Vorprojekt JASON ein neuartiges, rein europäisches Design eines tritiumkompatiblen reaktorrelevanten Pelletinjektionssystems charakterisieren. Zur Beschleunigung der Pellets muss dazu eine geeignete Zentrifuge entwickelt werden. Der Test dieser Technologie wird daher in einem Bunker erfolgen, der ursprünglich für das Projekt HTS-GENO am Institut gebaut wurde. Abbildung 9 zeigt den JASON-Aufbau mit dem Behälter im Vordergrund und dem Bunker im Hintergrund. Der Bau des Pelletinjektors und der Aufbau der nötigen Versuchsinfrastruktur sollen bis 2025 abgeschlossen sein.

Kontakt: [thomas.giegerich@kit.edu](mailto:thomas.giegerich@kit.edu)

# Highlight

## Divertorkryopumpen für JT-60SA abgeliefert

In einem mehrjährigen Projekt wurde am Institutsbereich Vakuumtechnik das Divertorpumpensystem für die Fusionsmaschine JT-60SA in Japan konzipiert, konstruiert und schließlich zusammen mit Fusion for Energy und Industriepartnern gebaut und erfolgreich abgenommen.



Abb. 10: Der Tokamak JT-60SA.

JT-60SA (Abbildung 10) ist mit einem Plasmapvolumen von etwa 130 m<sup>3</sup> der größte supraleitende Tokamak nach ITER und verfolgt das ultimative Ziel, die offenen Fragen zum Langpulsbetrieb eines Tokamaks endgültig zu klären.

Die Großanlage steht in Naka, Japan am Standort der früheren Versuchsanlage JT-60U. Sie läuft derzeit in der ersten Betriebsphase. 2024 wird die Maschine mit weiteren technischen Systemen nachgerüstet werden. Dazu gehört auch ein leistungsfähiges Divertorpumpensystem, für dessen Bereitstellung sich der Vakuumbereich zusammen mit der Fusionsagentur ‚Fusion for Energy‘ verantwortlich zeichnet. Das Pumpenprojekt lässt sich in drei verschiedene Phasen einteilen.

Konzeptfindungsphase (2012–2017). Das Projekt JT-60SA wurde 2007 im Rahmen des „Broader Approach“-Abkommens zwischen der EU und Japan initiiert. Bereits seit 2012 ist der Vakuumbereich in die Entwicklung des wissenschaftlichen Programms und in die Festlegung der dafür benötigten Technologien eingebunden. Im Zuge dieser Arbeiten wurden die Anforderungen an das Divertorpumpensystem festge-

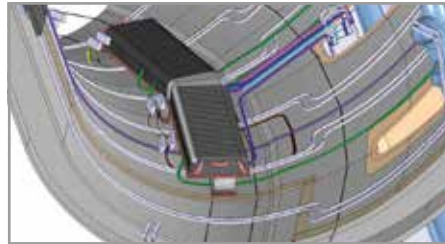


Abb. 11: Die Kryopumpe im JT-60SA Vakuumgefäß.

legt. Abweichend von dem ursprünglichen Plan, Kryokondensationspumpen zu verwenden, wurde 2017 die Entscheidung zugunsten eines Kryosorptionssystems mit aktivkohlebeschichteten 4-K-Pumpflächen getroffen. Dazu waren umfangreiche Rechnungen nötig, um das Betriebsfenster der Pumpen vorherzusagen sowie eine erste Kostenschätzung zur Plausibilisierung des zum Bau nötigen Aufwands abzuleiten.

Designphase (2017–2020). In mehreren Entwicklungsstufen mit entsprechenden Designreviews wurden schließlich ein 3D-CAD-file mit allen Einzelteilen (Abbildung 11) sowie ein Satz von 2D-Herstellungszeichnungen entwickelt. Auf der Basis dieses Designs führte ‚Fusion for Energy‘ eine Ausschreibung durch und beauftragte schließlich den deutschen Hersteller Research Instruments.

Herstellungsphase (2021–2023). Insgesamt wurden zehn baugleiche Kryopumpen hergestellt, zusammen mit einer ‚Übungs‘-Kryopumpe zur Validierung der Herstellungsschritte und ihrer Prüfverfahren. Abbildung 12 zeigt die zentralen Elemente der Kryopumpe. Dies sind als Herzstück die Kryopanel, von denen in jedem ‚Pumpflügel‘ zwei eingebaut sind. Sie sind mit Aktivkohle beschichtet, sodass bei der vorgese-

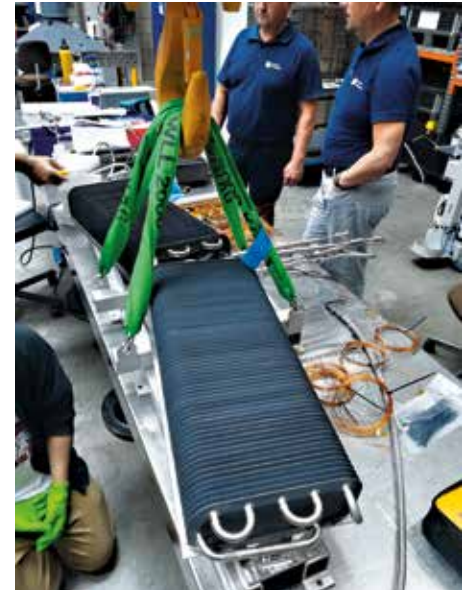


Abb. 12: Die zentralen Bauelemente der Kryopumpe.

henen Betriebstemperatur von 3,8 K gut Helium gepumpt werden kann. Auf der Rückseite der Panel befindet sich ein geschlossenes thermisches Schild bei 80 K

Im Verlauf der Herstellung musste eine Reihe von einzelnen Fertigungsschritten neu entwickelt werden. Dennoch war es am 3. Oktober 2023 so weit: Alle Kryopumpen waren nach Japan geliefert und hatten die Eingangsspektion erfolgreich überstanden.

Die Inbetriebnahme von JT-60SA ist aktuell im Gang, und am 23. Oktober 2023 wurde ein erstes Plasma erzeugt. Der JT-60SA-Forschungsplan deckt die Lebensdauer der Anlage von ungefähr 20 Jahren ab. Dabei wird die Verwendung der Divertorvakuum-systeme zur Kontrolle des Plasmas eine zentrale Rolle spielen.

# Preise und Auszeichnungen

2023 wurden für Arbeiten und die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP die folgenden Auszeichnungen, Würdigungen und Preise verliehen.

Im September 2023 wurde unser Doktorand **Quoc Hung Pham** auf der europäischen Konferenz der angewandten Supraleitung EUCAS 2023 in Bologna mit dem „ESAS Young Researcher Award“ ausgezeichnet. Damit wird sein Konferenzbeitrag mit dem Titel „Schaltgerät mit magnetisch getriggerten Hochtemperatur-Supraleitern“ als bester Beitrag eines Nachwuchswissenschaftlers in Bereich der Hochstromanwendungen hervorgehoben. In dieser Arbeit stellt Quoc Hung Pham weltweit erstmals eine Brückenschaltung vor, die auf der Basis des dynamischen Widerstandes von Hochtemperatur-Supraleitern funktioniert.



Abb. 1: Quoc Hung Pham (Mitte) bei der Preisverleihung.

**Prof. Dr. Tabea Arndt** wurde auf der Magnetetechnologiekonferenz im September 2023 in Aix-en-Provence der IEEE-Preis für kontinuierliche und bedeutende Beiträge in der angewandten Supraleitung verliehen.

Dieser Preis würdigt die langjährigen herausragenden technischen und wissenschaftlichen Beiträge und Entwicklungen von Einzelpersonen im Bereich der angewandten Supraleitung. Dazu gehören unter anderem die Entwicklung der ersten Generation supraleitender Hochtemperaturbänder mit sehr großen Längen und nach

höchsten Industriestandards, die Lieferung von Hochtemperatur-Supraleitern der ersten Generation für die Stromzuführungen des LHC am CERN und die Demonstration supraleitender Roebel-Kabel in großtechnischen Energieanwendungen und ihre Beiträge zu zahlreichen hochtemperatursupraleitenden Erstanwendungen wie MRT-Magnetdemonstratoren, voll integrierten Fehlerstrombegrenzern, rotierenden elektrischen Maschinen für Schiffe, Flugzeuge und Turbogeneratoren, Transformatoren für die Eisenbahn und Spulen für industrielle Anwendungen.



Abb. 2: Prof. Dr. Tabea Arndt (Mitte) bei der Preisverleihung.

## W1-TT Prof. Dr. Giovanni de Carne

wurde bei uns am Institut auf eine W3-Professur „Echtzeitfähige Energiesysteme“ berufen. Dazu haben wesentlich seine Erfolge als W1-Professor und bei der Helmholtz-Nachwuchsgruppe zum Thema „Hybrid Networks: a multi-modal design for the future energy system“ beigetragen. Dadurch wird die langfristige Einbindung seiner Arbeiten auf diesem Gebiet sichergestellt und die wissenschaftliche Qualität von Prof. Dr. Giovanni de Carne erneut ausgezeichnet.



Abb. 3: Prof. Dr. Giovanni de Carne.

Wir freuen uns sehr über diese Anerkennung der außergewöhnlich guten Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und danken ihnen sehr für Ihre exzellenten Leistungen.



## Dr. Carsten Räch

Untersuchung von Wechselstromverlusten verschiedener hochtemperatursupraleitender Mehrleiterkonzepte für dreiphasige Hochstromanwendungen

Angesichts der Energiewende in Deutschland sowie eines generellen Anstiegs elektrischer Lasten im deutschen Netz stehen Netzbetreiber vor der großen Herausforderung, eine zuverlässige Energieübertragung bereitzustellen. Konventionelle Übertragungstechnologien mit VPE-isolierten Kabeln oder Freileitungen sind allerdings oftmals durch ihre Übertragungskapazitäten limitiert und benötigen einen hohen Platzbedarf.

Der Einsatz supraleitender Kabel stellt eine Alternative dar, die in Projekten weltweit bereits erfolgreich umgesetzt wurde. Hochtemperatur-Supraleiter ermöglichen eine hohe Übertragungsleistung bei deutlich reduziertem Platzbedarf sowie verringerten Kosten für die Kühlung. Somit können Leistungen, die vormals der Hoch- und Höchstspannungsebene vorbehalten waren, auch auf der Mittelspannungsebene übertragen werden.

Für ein dreiphasiges supraleitendes Mittelspannungskabel mit einer Übertragungsleistung von 173 MVA werden in dieser Arbeit unterschiedliche HTS-Mehrleiterkonzepte und ihre AC-Verluste untersucht. Dabei wird auf ein kompaktes und verlustreduziertes Design geachtet. Um kapazitive Asymmetrien zu vermeiden, wird außerdem eine symmetrische Verlegung der Phasen in einer Dreileiteranordnung anstelle der typischen koaxialen Bauweise angenommen. Die einzelnen Phasen sind für einen Nennstrom  $I_{rms} = 5$  kA bei einer

Nennspannung von  $U_n = 20$  kV ausgelegt. Die Kühlung des Kabels erfolgt mit flüssigem Stickstoff ( $LN_2$ ), der ebenfalls als flüssiges Dielektrikum zwischen den Phasen eingesetzt wird. Durch den Verzicht auf sonstige Isolationsstoffe entsteht ein platzsparendes Kabeldesign. Als Phasenleiter wird eine Mehrleiteranordnung, bestehend aus Cross-Conductor-Anordnungen (CroCo), Stack-Anordnungen oder Conductor-on-round-Core-Anordnungen (CorC), eingesetzt. In allen drei Anordnungsvarianten kommen REBCO-Bandleiter, also Hochtemperatur-Supraleiter (HTS), zum Einsatz. Ziel ist ein verlustoptimiertes und kompaktes Drehstromkabel.

Für die Berechnung der AC-Verluste wird eine angepasste numerische Berechnungsmethode auf Basis der von Brandt vorgestellten Methode zum Einsatz kommen. Dabei werden Berechnungsmodelle der Supraleitung in Kombination mit den Maxwell-Gleichungen in integraler Form als ein System aus gewöhnlichen Differentialgleichungen aufgestellt. Sie werden nur für den supraleitenden Bereich gelöst, womit die Anzahl an Berechnungsknoten gegenüber einer Finite-Elemente-Methode (FEM) drastisch reduziert wird. Das Verfahren kann sowohl für zweidimensionale Modelle eingesetzt werden, etwa für eine Stack- oder CroCo-Anordnung, als auch für das dreidimensionale Modell einer CorC-Anordnung. Die Ergebnisse der Berechnungsmodelle werden mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. In einem ab-

schließenden Vergleich der drei Mehrleiterkonzepte zeigt sich: Der Einsatz von CorC-Anordnungen reduziert die notwendige Anzahl an Bandleitern gegenüber den Stack- oder CroCo-Anordnungen drastisch. Somit minimiert sich letztlich auch der Querschnitt des dreiphasigen Kabels.

Im letzten Abschnitt werden durch einen praktischen Versuchsaufbau der kritische Strom sowie die elektrischen Verluste einer CroCo- und einer CorC-Anordnung ermittelt. Die so gemessenen Werte lassen sich mit den zuvor vorgestellten mathematischen Methoden gut abbilden. Zudem zeigt die CroCo-Anordnung bereits Verluste größer 1 W/m, sobald der effektive Strom 20 % des kritischen Stroms erreicht, während ähnliche Verluste bei einer CorC-Anordnung erst ab 55 % des kritischen Stroms auftreten.

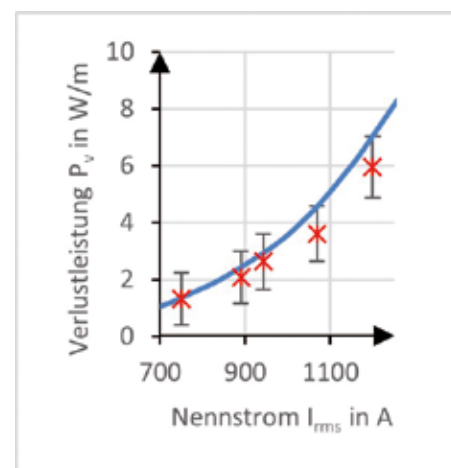


Abb. 1: Gemessene und berechnete Verlustleistung des CroCo-Prüfleiters.

## Vorlesungen, Seminare und Workshops

### KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

- **Projektmanagement für Ingenieure** (Noe, Day) SS 23
- **Praktikum Supraleitende Materialien** (Holzapfel, Hänisch) WS 22/23, SS 23, WS 23/24
- **Energy Storage and Network Integration** (Grilli, De Carne) WS 22/23, WS 23/24
- **Tutorial for Energy Storage and Network Integration** (Grilli, De Carne) WS 22/23, SS 23
- **Superconductivity for Engineers** (Holzapfel, Kempf) WS 22/23, SS23, WS 23/24
- **Exercise for superconductivity for Engineers** (Hänisch) WS 22/23, WS 23/24
- **Seminar on Applied Superconductivity** (Arndt, Holzapfel, Kempf) WS 22/23, SS 23, WS 23/24
- **Superconducting Materials Part I** (Holzapfel) WS 22/23, SS 23, WS 23/24
- **Superconducting Materials Part II** (Holzapfel) SS 23
- **Superconducting Magnet Technology** (Arndt) SS23
- **Seminar Strategieableitung für Ingenieure** (Arndt) WS 22/23, WS 23/24
- **Superconducting Power Systems** (Arndt, Pham, Müller, Grilli, Schreiner, De Sousa) WS 22/23
- **Praktikum Robotische Wickeltechnik für Supraleiterdrähte** (Arndt) WS 22/23, WS 23/24

- **Superconductors for Energy Applications** (Grilli) WS 22/23, WS 23/24
- **Übungen zu Superconductors for Energy Applications** (Grilli) WS 22/23
- **Electrical and Electronic Engineering for Mechanical Engineers** (De Carne) WS 22/23, WS 23/24
- **Tutorial Electrical Engineering and Electronics for Mechanical Engineers** (Grilli) WS 23/24
- **Accelerators and Detectors – Future Technologies for Research and Medicine** (Holzapfel) SS 23

### KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

- **Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 22/23, WS 23/24
- **Übung zu Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 22/23

### KIT-Fakultät Maschinenbau

- **Fusionstechnologie A** (Day, Gröbke, Fietz, Weiss, Wolf) WS 22/23
- **Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren** (Weiss, Wolf) SS 23
- **Angewandte Kryo-Technologie** (Neumann, Weiss) SS 23

### House of Competence

- **„Netzwerken – Verbindungen schaffen Freiheiten“** (Arndt), Tagesworkshop; WS 22/23

### Seminare Kryo-Seminare

- **23.–24.03.2023:** DKV-Seminar Kühlung von Rechenzentren (Neumann)
- **04.–05.05.2023:** DKV-Seminar Kältemittel (Neumann)
- **13.–15.09.2023:** VDI-Seminar Kryotechnik (Neumann)
- **27.–29.09.2023:** HdT-Seminar Kryostatbau (Neumann)
- **18.–19.10.2023:** DKV-Seminar Grundlagen der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik (Neumann)

### Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau

- **Arbeitssicherheit und Umweltschutz** (Bauer) WS 22/23

# Abgeschlossene Doktorarbeiten

(\* akademischer Betreuer)

## ENERGIE

### **Carsten Räch**

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)\*

# Abgeschlossene Masterarbeiten

(\* akademischer Betreuer)

## ENERGIE

### **Marco Verlohner**

Implementation and Validation of Grid Codes Compliant Inverter for Grid Storage Applications  
Betreuer: Prof. Dr. R. Bojoi (Politecnico di Torino), Prof. Dr. G. de Carne\*

### **Fan Wu**

Development of a Communication Architecture for Real-Time Application  
Betreuer: M. Courcelle, Dr. G. de Carne\*

### **Jan Hendrik Wüpper**

Modelling Accuracy Evaluation of Power Electronics Converters for Power System Analysis  
Betreuer: Prof. Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing M. Noe\*

## VAKUUM

### **Federico Constantin**

A layout of the tritium subsystems for the European demonstration fusion power plant  
Betreuer: Dr. T. Giegerich, Dr. C. Day

## MATERIAL

### **Celine Apfelbach**

Entwicklung des Brückenmoduls „Kernphysik“ für einen Quantenmechanik-Seminar Kurs am KIT-Schülerlabor Energie  
Betreuer: A. Rimikis, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

### **Julian Bell**

Entwicklung des Moduls „Klima“ eines dualen Quantenmechanik-Seminar Kurses am KIT-Schülerlabor für das Fach Geographie  
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel\*

### **Dawid Ciszewski**

Superconductor Film Growth Tests of a Newly Commissioned Industrial High Temperature Superconductor R&D Deposition Line for High-field Coated Conductors with Application in Fusion-relevant Devices  
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel\*



# Abgeschlossene Bachelorarbeiten

(\* akademischer Betreuer)

## ADMIN

### **Marcel Armbruster**

Machbarkeitsstudie zur Wirksamkeit eines zertifizierten Energiemanagementsystems in einem Forschungsinstitut

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

### **Luca Tobler**

Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens zur sicheren Installation und Nutzung von Wasserstofftestanlagen

Betreuer: Dr. K.-P. Weiss, Dipl.-Ing. Kohl (DH)

## MATERIAL

### **Fabian Follner**

Entwicklung für eines didaktischen Konzepts für die Station „Wirbelstrombremse“ im KIT – Schülerlabor Energie

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

### **N.N.**

Optimierung und Aufbau eines Elektromotors in modularer Bauweise im KIT-Schülerlabor Energie

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

## ENERGIE

### **Antonia Huber**

Development of a Communication Architecture for Real-Time Application

Betreuer: M. Courcelle, Prof. Dr. G. de Carne\*

## KRYO

### **Pascal Kubis**

Entwicklung eines Wärmeübertragers zum Anwärmen von tiefkaltem gasförmigen Wasserstoff

Betreuer: S. Bobien, Dr. H. Neumann

### **Thomas Mack**

Konstruktion einer kapazitiven Füllstands-sonde für flüssigen Wasserstoff

Betreuer: S. Bobien, Dr. H. Neumann

## MAGNET

### **Antonia Huber**

Studie zum Einsatz von durchgehend kontaktierten Hochtemperatursupraleiter-Bandstapeln in kompakten Magneten

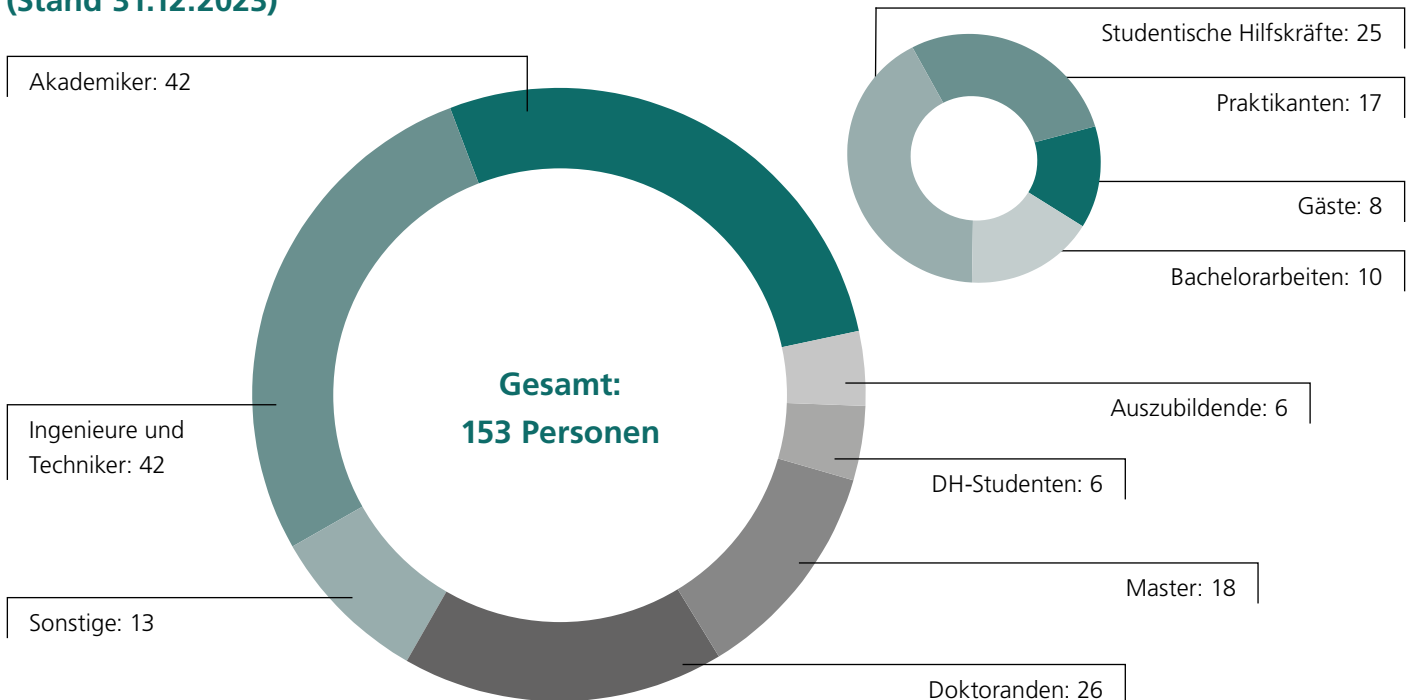
Betreuer: Dr. M. Kläser, Prof. Dr. T. Arndt\*

# Zahlen, Fakten, Daten

## Forschungsfelder und -themen

Supraleiter- und Kryo-Materialien (Holzapfel)	Supraleitende Energietechnische Anwendungen (Noe)	Supraleitende Magnettechnologie (Arndt)	Technologien des Fusionsbrennstoff-kreislaufs (Day)
Supraleitende Materialien (Hänisch)	Netz- und Energiekomponenten (Noe)	Spulen- und Magnettechnologie (Hornung)	Vakuumtechnologie und Prozessintegration (Day)
Leiter- und Kabelkonzept-technologien (Holzapfel)	Modellierung von Supraleitern und Komponenten (Grilli)	Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion (Wolf)	Strömung verdünnter Gase (Varoutis)
Struktur- und Funktionsmaterialien für Kryoanwendungen (Weiss)	Echtzeit Systemintegration (De Carne)	Rotierende Maschinen (Arndt)	Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation (Giegerich)

## Personalstand (m/w/d) (Stand 31.12.2023)



# Gastwissenschaftler

**K. Liu**

09.01.–14.12.23

Southwest Jiaotong University, Chengdu,  
P.R. China

**C. Iurlaro**

16.01.–31.07.23

Polytechnic University of Bari, Bari, Italien

**Z. Huang**

13.04.–19.09.23

Southwest Jiaotong University, Chengdu,  
P.R. China

**Ye Hong**

13.04.–19.09.23

Southwest Jiaotong University, Chengdu,  
P.R. China

**Dr. P. Zhou**

23.08.21–22.08.23

Southwest Jiaotong University, Chengdu,  
P.R. China

**A. Hussain**

12.09.–29.11.23

Slovak University of Technology, Bratislava,  
Slowakei

**F. Reissner**

17.09.–20.10.23

Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

**M. Di Pietrantonio**

18.09.23–18.03.24

University of Tuscia, Tuscia, Italien

# Fach- und Gastvorträge

**21. Januar 2023,**

Future-Proof Power Electronic Systems  
for Residential Microgrids

Prof. Dmitri Vinnikov, Dr. Andrii Chub,  
TalTech, Estland

Gastvortrag, IB Energie

**16. November 2023**

REBCO Coatings for High-Gradient RF  
Applications

Sergio Calatroni, Cern, CH

Gastvortrag, IB Material

**14. Juli 2023**

Resilient Micro-grids for the More Electric  
Aircraft

Prof. Buticchi, from Nottingham University  
Ningbo, China

Gastvortrag, IB Energie



# Mitgliedschaften

## in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

### **Tabea Arndt**

- Programmkomitee der Tagung ZIEHL, 10.-11.04.2024, Berlin
- International Organizing Committee Conference Magnet Technology, MT
- International Organizing Committee Conference EUCAS, Large Scale
- Mitglied DKE TC90
- Delegierte zum Technology Cooperation Program High-Temperature Superconductivity der International Energy Agency
- Kuratorin BMWK „Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung
- Member program board

### **Nadja Bagrets**

- Experte innerhalb des Arbeitsfeldes TWA16 der VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards bei ISO) zur Durchführung von Ringversuchen
- Experte im Komitee K 184 „Supraleiter“ der deutschen Kommission Elektrotechnik (DKE) im DIN
- Experte im technischen Komitee TC90 „Supraleiter“, Arbeitsgruppe WG5 der internationalen elektrotechnischen Kommission (IEC)

### **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).
- Projektleitung des Bereichs Tritium-Materiezufuhr-Vakuum (TFV) im Europäischen Fusionsprogramm EUROFUSION
- 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 Team zur Erarbeitung des Forschungsplans von DTT, verantwortlich für Fusionstechnologie.

### **Giovanni de Carne**

- Leiter des IEEE Power and Energy Society „Task Force on Solid State Transformer integration in distribution grids“
- Helmholtz Nachwuchsgruppen-Leiter – 2020
- Chairman der IEEE PES Task Force „Solid State Transformer integration in distribution grids“
- Sekretär und Mitglied der CIGRE Arbeitsgruppe B4.91 „Power electronics-based transformer technology, design, grid integration and services provision to the distribution grid“

- Mitglied der CIGRE Arbeitsgruppe A3.40 „Technical requirements and field experiences with MV DC switching equipment“
- Mitglied der IEEE Arbeitsgruppe P2004 „Hardware in the Loop“.
- Mitglied der IEEE Arbeitsgruppe „Modelling and Simulation with High Penetration of Inverter-Based Renewables“
- Subject Editor der IET Zeitschrift „IET Generation, Transmission & Distribution“
- Assoziierter Editor der IEEE Zeitschrift „IEEE Open Journal for Power Electronics“
- Assoziierter Editor der IEEE Zeitschrift „IEEE Industrial Electronic Magazine“
- Assoziierter 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

### **Francesco Grilli**

- Vorstandsmitglied der Europäischen Gesellschaft für angewandte Supraleitung (ESAS)

### **Jens Hänisch**

- Superconductor Science and Technology, Mitglied im Editorial Board
- European Magnetic Field Laboratory EMFL, Mitglied im User Proposal Selection Committee

### **Bernhard Holzapfel**

- European Conference on Applied Superconductivity, Member of International Program Committee
- International Symposium on Superconductivity (ISS), Member of International Program Committee
- Member of the Scientific Advisory Board of ICMAB-CSIC
- Coated Conductor for Applications (CCA), Member of International Program Committee

### **Holger Neumann**

- Member of the ICE Committee
- Altvorsitzender des DKV
- Gastprofessur in China an der Zhejiang University in Hangzhou (China)

### **Mathias Noe**

- Deutscher Abgesandter der International Energy Agency, Technology Cooperation Programm Hochtemperatur-Supraleitung
- Mitglied des internationalen Beratungsgremiums des IRIS Projektes
- Mitglied des Interessenverbandes Supraleitung (ivsupra)
- Mitglied beim Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

### **Sonja Schlachter**

- Mitglied des „International Cryogenic Material Conference (ICMC) Board of Directors“
- ICMC Conference Chair bei der CEC/ICMC Conference 2023, 9.–13. Juli 2023, Honolulu, HI
- Technischer Editor der Zeitschrift IEEE Transactions of Applied Superconductivity

### **Wesley T. B. de Sousa**

- Vorstandsmitglied des „HTS Modelling Workgroup“.
- Vorstandsmitglied des COST ACTION CA19108 – „High-Temperature Superconductivity for Accelerating the Energy“
- Experte in der CIGRE Arbeitsgruppe B4/A3.86 – Strombegrenzungs-technologien für DC-Netze
- Technischer Editor der IEEE Zeitschrift IEEE „Transactions on Applied Superconductivity“

### **Stylianos Varoutis**

- Mitglied im Auswahlkomitee des EU High Performance Computers MARCONI
- Mitglied im Europa/Japan-Auswahlkomitee für Großrechnersimulationen im „Broader Approach“
- Mitglied der Deutschen Vakuumgesellschaft (DVG)
- Vorsitzender des Fachverbandes Vakuumphysik und –technik der Dt. Physikalischen Gesellschaft (DPG).

### **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
- DIN NA 062-01-42 AA „Zug- und Duktilitätsprüfung für Metalle“ Mitglied
- ISO ISO/TC 164/SC 1 “Uniaxial Testing” Mitglied
- Member of the International Technical Program Committee – Workshop on Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors
- Board Member ICMC (International Cryogenic Materials Conference) & Subcommittee International Cryogenic Material Library
- ICMC Program Chair bei der CEC/ICMC Conference 2023, 9.–13. Juli 2023, Honolulu, HI
- Experte im EUROfusion Scientific & Technical Advisory Committee (STAC)

# Veröffentlichungen

## Fusion

### Zeitschriftenaufsatz

S. Hanke, Chr. Day, T. Giegerich, et al.  
Experimental Characterization of an NEG Pump of Novel Size – A Major Step toward Its Application in DEMO Neutral Beam Injectors, *Energies* 16 (2023) 3148.  
Doi: 10.3390/en16073148 // open access

C. Tantos, V. Hauer, S. Varoutis, et al.  
3D numerical study of neutral gas dynamics in the DTT particle exhaust using the DSMC method, *Nucl. Fusion* 64 (2024) 016019.  
Doi: 10.1088/1741-4326/ad0c80 // open access

C. Tantos, E. Kritikos, S. Varoutis, et al.  
Kinetic modeling of polyatomic heat and mass in rectangular microchannels, *Heat and Mass Transfer* 59 (2023) 167–184.  
Doi: 10.1007/s00231-022-03224-z // open access

Y. Kathage, A. Vazquez Cortes, S. Merli, et al.  
Experimental Progress in the Development of a Metal Foil Pump for DEMO, *Plasma* 6 (2023) 714–734.  
Doi:10.3390/plasma6040049 // open access

B. Ploeckl, P.T. Lang, Chr. Day, et al.  
Testbed for the Pellet Launching System for JT-60SA, *Fusion Engineering and Design* 186 (2023) 113370.  
Doi: 10.1016/j.fusengdes.2022.113370 // Open Access

B. Ploeckl, P.T. Lang, Th. Giegerich, et al.  
Proposal of a control scheme for testing a centrifuge-based pellet injection system in DIPAK-PET, *Fusion Engineering and Design* 199 (2024) 114142.  
Doi: 10.1016/j.fusengdes.2023.114142 // Open Access

P.T. Lang, L.R. Baylor, R. Dux, et al.  
Admixed pellets for fast and efficient delivery of plasma enhancement gases: investigations at AUG exploring the option for EU-DEMO, *Fusion Engineering and Design* 196 (2023) 114020  
Doi: 10.1016/j.fusengdes.2023.114020 // Open access

P. T. Lang, M. van Berkel, W. Biel, et al.  
Targeting a Versatile Actuator for EU-DEMO: Real Time Monitoring of Pellet Delivery to Facilitate Burn Control, *Fusion Science Technology* 80 (2024) 24-37.  
Doi: 10.1080/15361055.2023.218893 // open access

I. Ivanova-Stanik, P. Chmielewski, Ch. Day, et al.  
Divertor power spreading in the Divertor Tokamak Test facility for a full power scenario with Ar and Ne seeding, *Plasma Physics Controlled Fusion* 65 (2023) 055009.  
Doi: 10.1088/1361-6587/acc2e3 // open access

J.C. Schwenzer, A. Santucci, Chr. Day  
Modeling of the HCPB Helium Coolant Purification System for EU-DEMO: Process Simulations of Molecular Sieves and NEG Sorbents, *Fusion Science Technology* 79 (2023) 1208-1218.  
DOI: 10.1080/15361055.2023.2189550

T. Teichmann, X. Luo, T. Giegerich, et al.  
Study of the Effective Torus Exhaust High Vacuum Pumping System Performance in the Inner Tritium Plant Loop of EU-DEMO, *Fusion Science Technology* (2023)  
Doi: 10.1080/15361055.2023.2229679 // open access

E. Sartori, M. Siragusa, P. Sonato, et al.  
Development of non evaporable getter pumps for large hydrogen throughput and capacity in high vacuum regimes, *Vacuum* 214 (2023) 112198.  
Doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112198 // open access



## Buchbeitrag

C.F.G. Neugebauer  
Investigation on the Semi-Continuous Separation of Hydrogen Isotopes for Fusion; KITopen, Mai 2023.  
DOI: 10.5445/IR/1000158827

Chr. Day  
Vacuum Pumping and Fuelling, in: G. van Oost (Ed.), *Fundamentals of Magnetic Fusion Energy*, pp. 483-564, ISBN 978-92-0-110721-3, IAEA, 2023

## Vortrag

J.C. Schwenzer, Chr. Day  
Tritium inventory evolution modelling for demonstration and future fusion power plants, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

S. Hanke, X. Luo, K. Battes, et al.  
Cryopump concept development for the cryogenic mirror region of the Einstein Telescope – the future gravitational wave observatory, Cryogenic Engineering Conference CEC-ICMC, Hawaii, USA, July 2023.

K. Battes, S. Hanke, C. Day, et al.  
Design development of the cryogenic pumps for the low frequency interferometer of the Einstein Telescope, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2023, Isola d' Elba, Italy, May 2023.

S. Hanke, K. Battes, X. Luo, et al.  
Cryopumps at the extremities of the ET beampipes, Gravitational Wave Telescopes 2023, 27-29 Mar 2023, CERN, Switzerland, 27-29 Mar 2023.

F. Ravelli, M. Fillion, A. Kuang, et al.  
Overview of the Vacuum Pumping Systems for the SPARC Tokamak, 26th Conf. of the Italian Vacuum Society AIV XXVI, Rome, Italy, 7-10 Nov 2023.

M. Fillion, A. Kuang, Chr. Day, et al.  
Overview of the Vacuum Pumping Systems for the SPARC Tokamak, American Vacuum Society 69th International Symposium, Portland, OR, USA, 5-10 Nov 2023.

Chr. Day, V. Hauer, P. Innocente, et al.  
Design of the DTT divertor cryopumps, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

S. Roccella, R. Neu, P. Innocente, et al.  
A Versatile Divertor for the Italian Divertor Tokamak Test Facility, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

B. Butler, G. Karajgikar, A. Santucci, et al.  
Reynolds, Tritium related challenges to be overcome in order to deliver fusion power plants, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

J. Ayllon-Guerola, C. Sozzi, G.L. Falchetto, et al.  
European Machine Enhancements for the JT-60SA Tokamak, Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (APPS), Nagoya, Japan, 12-17 Nov 2023.

S. Merli, Y. Kathage, A. Schulz, et al.  
Numerical and experimental investigations of a linear microwave plasma source for metal foil pumps for DEMO, 49th European Conference on Plasma Physics (EPS), Bordeaux, France, 3-7 July 2023.

I. Podadera, S. Becerril, M. García, et al.  
IFMIF-DONES facility: a fusion-oriented 5 MW superconducting CW linear accelerator, 14th Int. Particle Accelerator Conference (IPAC), Venice, Italy, 7-12 May 2023.

## Poster

Y. Kume, Chr. Day  
Plasma Exhaust Processing System with a Tritium Compatible Reciprocating Pump, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

V. Narcisi, J.C. Schwenzer, T. Giegerich, et al.  
On the possibility to recover Plasma Enhancement Gases from DEMO tokamak exhaust stream, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

X. Luo, Y. Kathage, T. Teichmann, et al.  
Assessment of Metal Foil Pump Configurations for EU-DEMO, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

T. Teichmann, Chr. Day, T. Giegerich, et al.  
Simulation and concept design of continuous mercury-driven vacuum pumps for EU-DEMO, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.

- V. Hauer, Chr. Day, P. Cara, et al.  
Gas flow modelling of the IFMIF-DONES beamline, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.
- A. Uihlein, J. Schwenzer, T. Giegerich, et al.  
Process Design of Hydrogen Isotope Separation using Temperature Swing Absorption in the EU-DEMO Fuel Cycle, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.
- Yu. Igitkhanov, S. Hanke, Y. Kathage, et al.  
Energetic neutral screening of the metal foils in metal foil pumps, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.
- P.T. Lang, L.R. Baylor, R. Dux, et al.  
Admixed pellets for fast and efficient delivery of plasma enhancement gases: investigations at AUG exploring the option for EU-DEMO, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.
- B. Ploeckl, P.T. Lang, Th. Giegerich, et al.  
Proposal of a control scheme for testing a centrifuge-based pellet injection system in DIPAK-PET, 15th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology ISFNT, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 10-15 Sept 2023.
- T. Kremeyer, D. Boeyaert, C. Day, et al.  
Particle and heat exhaust with the island divertor in Wendelstein 7-X, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, 16-21 Oct 2023.
- C. P. Dhard, V. Haak, T. Bräuer, et al.  
First operation and validation of simulations for the divertor cryo-vacuum pumps in W7-X, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, 16-21 Oct 2023.
- C. Tantos, S. Varoutis, V. Hauer, et al.  
Innocente, 3D numerical evaluation of the DTT divertor pumping performance, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, 16-21 Oct 2023.
- P. Innocente, R. Ambrosino, L. Balbinot, et al.  
Design of the divertor for the DTT facility optimized for power exhaust experiments, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, 16-21 Oct 2023.
- Y. Igitkhanov, T. Giegerich and Chr. Day  
Burn-up fraction in DEMO operation with the Direct Internal Recycling, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, 16-21 Oct 2023.
- F. Crisanti, R. Albanese, E. Alessi, et al.  
Physics basis for the DIVERTOR TOKAMAK TEST FACILITY, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, 16-21 Oct 2023
- T. Kremeyer, D. Boeyaert, R. Duligal, et al.  
Design criteria for a particle exhaust optimized divertor for Wendelstein 7-X, 49th European Conference on Plasma Physics (EPS), Bordeaux, France, 3-7 July 2023

# Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)

## Zeitschriftenaufsatz

- A. Lani, V. Sharma, V. F. Giangaspero, et al.  
A Magnetohydrodynamic enhanced entry system for space transportation: MEESSST  
Journal of Space Safety Engineering 10 (2023) pp. 27–3, <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.11.004>
- Cayado, Pablo, Hänisch, Jens, Iida, Kazumasa, et al.  
Focus on recent advances in superconducting films  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
Superconductor Science and Technology 0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/ace997
- Cayado, Pablo, Namburi, Devendra K., Erbe, Manuela, et al.  
Transport measurements in single-grain GdBCO+Ag bulk superconductors processed by infiltration growth  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0947-8396, 1432-0630  
10.1007/s00339-023-06402-w
- Chow, Calvin C. T., Grilli, Francesco, Chau, K. T.  
Numerical modelling of HTS tapes under arbitrary external field and transport current via integral method: review and application to electrical machines \*  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/ace701
- de Sousa, Wesley T. B., Noe, Mathias Huwer, Stefan, et al.  
Design of a 110-kV 2.0-kA SmartCoil Superconducting Fault Current Limiter  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1051-8223, 1558-2515  
10.1109/TASC.2023.3246818
- Freitag, W., Erbe, M., Hänisch, J., et al.  
Optimization of the Crystallization Process of TFA-MOD ErBCO Films on IBAD-Substrate Under Low-Pressure Conditions via DSD Approach  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1051-8223, 1558-2515  
10.1109/TASC.2023.3259922
- Hänisch, Jens  
Superconducting undulators: permanent magnets after all  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/aced71
- Iida, Kazumasa, Hänisch, Jens, Hata, Satoshi, et al.  
Recent progress on epitaxial growth of Fe-based superconducting thin films  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/acccb2
- Li, Chao, Xing, Yuying, Xin, Ying, et al.  
Time-dependent development of dynamic resistance voltage of superconducting tape considering heat accumulation  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
2772-8307  
10.1016/j.supcon.2023.100066
- Oliveira, R., Zeng, X., Pei, X., et al.  
HTS-Tape Magnetic Bearing for Ultra High-Speed Turbo Motor  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1051-8223, 1558-2515  
10.1109/tasc.2023.3253064
- Oliveira, Roberto, Pei, Xiaozhe, Nilsson, Emelie, et al.  
Performance Analysis of Resistive Superconducting Fault Current Limiter Using LN<sub>2</sub> and GHe Cooling  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1051-8223, 1558-2515  
10.1109/TASC.2023.3237642
- Oswald, Johannes W., Behnke, Alexander, Herdrich, Georg, et al.  
Assessment of MHD-relevant parameters in high enthalpy air plasma for flow manipulation experiments  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0042-207X  
10.1016/j.vacuum.2023.112504
- Petroušek, Patrik, Kvačák, Tibor, Bidulská, Jana, et al.  
Investigation of the Properties of 316L Stainless Steel after AM and Heat Treatment  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1996-1944  
10.3390/ma16113935
- Santos, Bárbara Maria Oliveira, dos Santos, Gabriel, Martins, Flávio Goulart dos Reis, et al.  
Magnetic bearings with double crossed loops modelled with T-A formulation and electric circuits  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
2772-8307, 0235-8964  
10.1016/j.supcon.2023.100058



- „Schlachter, S. I., Bagrets, N., Branco, M. B. C., et al.  
Development and Test of High-Temperature Superconductor Harness for Cryogenic Instruments on Satellites  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1051-8223, 1558-2515, 2378-7074  
10.1109/TASC.2023.3241570
- Shi, Jiangtao, Zhao, Yue, Wu, Yue, et al.  
Supersaturation and crystallization behaviors of rare-earth based cuprate superconducting films grown by chemical solution deposition  
38.05.03 (POF IV, LK 01), 0169-4332  
10.1016/j.apsusc.2022.155820
- Sirois, Frédéric, Grilli, Francesco, Morandi, Antonio  
Addendum to “Comparison of Constitutive Laws for Modeling High-Temperature Superconductors”  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
1051-8223, 1558-2515, 2378-7074  
10.1109/TASC.2023.3318573
- Vargas-Llanos, Carlos Roberto, Krämer, Joachim, et al.  
Design and test of a setup for calorimetric measurements of AC transport losses in HTS racetrack coils  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/acbba5
- Yazdani-Asrami, Mohammad, Song, Wenjuan, Morandi, Antonio, et al.  
Roadmap on Artificial intelligence and big data techniques for superconductivity  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/acbb34
- „Zhang, Hongye, Yang, Tianhui, Grilli, Francesco, et al.  
A superconducting wireless energiser based on electromechanical energy conversion  
38.05.03 (POF IV, LK 01), 2772-8307  
10.1016/j.supcon.2023.100057
- Zhang, J., Hänisch, Jensm Yang, X. S., et al.  
Effect of carbon doping on magnetic flux pinning and superconducting performance in  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  single crystals  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/acadb5
- Zhou, Pengbo, Ghabeli, Asef, Ainslie, Mark, et al.  
Characterization of flux pump-charging of high-temperature superconducting coils using coupled numerical models  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
0953-2048, 1361-6668  
10.1088/1361-6668/acf739
- Zhou, Pengbo, Zhou, Yanyu, Ainslie, Mark, et al.  
Charging process simulation of a coil by a self-regulating high-T superconducting flux pump  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
2772-8307  
10.1016/j.supcon.2023.100061
- Grünewald, Lukas, Cayado, Pablo, Erbe, Manuela, et al.  
Analytical electron microscopy study of the composition of  $\text{BaHfO}_3$  nanoparticles in REBCO films: the influence of rare-earth ionic radii and REBCO composition  
38.05.03 (POF IV, LK 01)  
2633-5409  
10.1039/D3MA00447C
- W.T.B. de Sousa, M. Noe, S. Huwer, et al.  
“Design of a 110-kV 2.0-kA SmartCoil Superconducting Fault Current Limiter”.  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, 33(4), 5600709, DOI 10.1109/TASC.2023.3246818
- C. R. Vargas-Llanos, J. Krämer, M. Noe, et al.  
“Design and test of a setup for calorimetric measurements of AC transport losses in HTS racetrack coils”.  
Superconductor Science and Technology, 2023, 36(4), 045015, DOI 10.1088/1361-6668/acbba5
- L. Grünewald, P. Cayado, M. Erbe, et al.  
Analytical electron microscopy study of the composition of  $\text{BaHfO}_3$  nanoparticles in REBCO films: the influence of rare-earth ionic radii and REBCO composition, Materials Advances (2023), DOI: 10.1039/d3ma00447c
- J. Hänisch,  
Superconducting undulators: permanent magnets after all, Supercond. Sci. Technol. 36, 090501 (2023)
- P. Cayado, J. Hänisch, K. Iida, et al.  
Focus on recent advances in superconducting films, Supercond. Sci. Technol. 36, 090401 (2023)
- K. Iida, J. Hänisch, S. Hata, et al.  
Recent progress on epitaxial growth of Fe-based superconducting thin films, Supercond. Sci. Technol. 36, 063001 (2023) (Review)
- W. Freitag, M. Erbe, J. Hänisch, et al.  
Optimization of the Crystallization Process of TFA-MOD ErBCO Films on IBAD-Substrate Under Low-Pressure Conditions via DSD Approach, IEEE Tran. Appl. Supercond. 33, 6601905 (2023)
- P. Cayado, D. K. Namburi, M. Erbe, et al.  
Transport measurements in single grain GdBCO+Ag bulk superconductors processed by infiltration growth, Applied Physics A (2023) 129-137, <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06402-w>

J. Zhang, J. Hänisch, X. Yang, et al.  
Effect of Carbon Doping on Magnetic Flux Pinning and Superconducting Performance in FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> Single Crystals, *Supercond. Sci. Technol.* 36 ,025008 (2023)

J. Shi, Y. Zhao, Y. Wu, et al.  
Supersaturation and crystallization behaviors of rare-earth based cuprate superconducting films grown by chemical solution deposition, *Applied Surface Science* 612, 155820 (2023)

S. Fatehi, A. Bernhard, S. C. Richter, et al.  
Fabrication and Powering Test of a High-Temperature Superconducting Periodic Quadrupole Driving a Short-Length Transport Line for Laser-Plasma Accelerators *IEEE TAS* <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3351958>

B. Krasch, F. Abusaif, T. Arndt, et al.  
Measurement Setup and Magnetic Field Studies of a Compact Superconducting Undulator With Laser-Structured HTS Tapes *IEEE TAS* <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3355320>

## Proceedingsbeitrag

S.I. Schlachter, N. Bagrets, M.B.C. Branco, et al.  
Development and Test of High-Temperature Superconductor Harness for Cryogenic Instruments on Satellites  
*IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 33 (2023) 4800505  
doi: 10.1109/TASC.2023.3241570

Johannes W. Oswald, Alexander Behnke, et al.  
Assessment of MHD-relevant parameters in high enthalpy air plasma for flow manipulation experiments  
Talk, 34th International Symposium on Space Technology and Science, June 3-9 2023, Kurume, Fukuoka, Japan  
*Vacuum* 217 (2023) 112504, doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112504

Freitag, W.  
Optimization of the Crystallization Process of TFA-MOD ErBCO Films on IBAD-Substrate Under Low-Pressure Conditions via DSD Approach  
*IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (Volume: 33, Issue: 5, August 2023)  
DOI: 10.1109/TASC.2023.3259922

## Vorträge

S. I. Schlachter, M.B.C. Branco, M. Collier-Wright, et al.  
Development and Test of Flexible High-Temperature Superconducting Current Lead Harness for Satellites  
Space Cryogenics Workshop '23, July 16-18, Kailua-Kona, HI, USA

S.I. Schlachter, A. Drechsler, R. Gehring, et al.  
Design, fabrication and test of high temperature superconducting magnet for heat flux and radio blackout mitigation experiments in plasma wind tunnels  
CEC/ICMC 2023 July 9-13, 2023, Honolulu, HI, USA

C. Schulz, N. Bagrets, V. Tschan, et al.  
Cryogenic Hydrogen and testing methods: microstructural and mechanical properties under cryogenic hydrogen environment  
International Cryogenic Materials Conference 2023, Hawaii, USA

K.-P. Weiss, N. Bagrets, C. Schulz  
Cryogenic thermo-physical properties of additive manufactured materials  
International Cryogenic Materials Conference 2023, Hawaii, USA

M. Maarouf, C. Schulz, C. Herwerth, et al.  
Macro- and microscopic properties of an austenitic steel after long-term hydrogen exposure  
International Cryogenic Materials Conference 2023, Hawaii, USA

C. Schulz, M. Monzer, A. Pundt, et al.  
Cryogenic Hydrogen and Steels: microstructural and mechanical properties for cryogenic hydrogen environment  
Pressure Vessel & Piping 2023, Atlanta, USA

B. Holzapfel, N. Bagrets, C. Barth, et al.  
„Realization of an R&D synthesis line for tailored intermediate length CC“  
EUCAS 2023, 4.9.23, Bologna

B. Holzapfel, “WP2.1 – R&D on accelerator grade HTS REBCO conductors”  
RD line 2 kick-off forum meeting – HTS Conductors and HTS Magnet Technologies, 2.5.23, Geneva

R. Popov, P. Cayado, H. Rijckaert, et al.  
„Oxygen annealing: a tool for tailoring the pinning landscape in pristine GdBCO superconducting thin films.“ EUCAS2023, 4.09.2023, Bologna, Italy

## Buchaufsatz

M. Noe, C. Humpert, S. Poehler.  
“380 kV Superconducting Fault Current Limiter Feasibility Study”.  
KIT Scientific Publishing, 2023, *Karlsruher Schriftenreihe zur Supraleitung Band 37*, ISSN 1869-1765, ISBN 978-3-7315-1313-1, DOI 10.5445/KSP/1000161057

C. Findeisen, M. Schober, S. Appel, et al.  
Development and implementation of a parameter estimation and post-processing tool for the failure analysis of composite materials  
17th European Conference on Spacecraft Structures Materials and Environmental Testing, ECSSMET 2023. Proceedings

## Poster

N. Bagrets, K.-P. Weiss

Thermal and electrical resistance of HTS tapes stacks in radial direction

European Conference of Applied Superconductivity 2023, Bologna, Italien

O. Taylor, Y. Gao, D. Evans, et al.

Characterization of the Mechanical and Thermal Properties, Including Fracture Toughness, of Epoxy Resin System DGEBA / POPDA (D400)

MT28 2023, Aix-en-Provence, Frankreich

E. Weiss, N. Rimikis, N. Bagrets, et al.

Software Interface for Material Database to COMSOL® Material Library

COMSOL Konferenz 2023, München, Deutschland

# Energiesystemdesign (ESD)

## Zeitschriftenaufsatz

„Buticchi, Giampaolo, Pereira, Thiago, Yang, Jiajun, et al.

A Smart Transformer for the Electrical Power System of Green Airports: Smart Power Management

IEEE Industrial Electronics Magazine

1932-4529, 1941-0115

10.1109/MIE.2023.3304065

Wald, Felix, Tao, Qiucen, Carne, Giovanni De

Virtual Synchronous Machine Control for Asynchronous Grid Connections

IEEE Transactions on Power Delivery

0885-8977, 1937-4208

10.1109/TPWRD.2023.3235149

## Proceedingsbeitrag

„Arena, Gabriele, Emiliani, Pietro, Chub, Andrii, et al.

DC Fast Charging of Electric Vehicles: a Review on Architecture and Power Conversion Technology

IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2023)

10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227492

Emiliani, Pietro, Blinov, Andrei, Carne, Giovanni De, et al.

Three-Phase Four Wire High-Frequency Link Converter for Residential DC Grids

IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)

10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227416

Emiliani, Pietro, Blinov, Andrei, Carne, Giovanni De, et al.

Predictive Control for Isolated Matrix Rectifier Without Current Distortion at Sector Boundary

IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)

10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227405

Ashrafidehkordi, Fargah, Liu, Xiaochang, Carne, Giovanni De

Impedance-based Stability Analysis of a Power Hardware-in-the-Loop for Grid-Following Inverter Testing

2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)

10.1109/ECCE53617.2023.10362808

Rajashekaraiah, Karthik, Carne, Giovanni De, Iurlaro, Cosimo, et al.

P-Q Theory-based Dynamic Load Modeling in Short-Circuit Analysis

2023 8th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)

10.1109/eGrid58358.2023.10380853



# Eingeladene Vorträge

## Tabea Arndt

- 20.04.2023, Invited, T. Arndt, Supraleiter & Wasserstoff – Defossilisierung und Sektorkopplung, Rheinland-pfälzischer Supraleitungskongress, Mainz
- 02.05.2023, Invited, T. Arndt, Large Scale Superconducting Applications - Status and Prospects, Gordon Research Conference "Superconductivity", Les Diablerets
- 06.09.2023, Contributed, T. Arndt, 3-LS-MC2-02S Common Challenges and goals when using HTS in power engineering and accelerators, EUCAS, Bologna
- 06.09.2023, Invited, T. Arndt, Room Temperature Superconductivity – Impact on Power Engineering- a dream or a nightmare?, EUCAS, Bologna
- 20.09.2023, Invited Plenary, T. Arndt, Superconducting Magnet Technology – status, trends and prospects, FGMR conference, Konstanz

## Christian Day

- J.C. Schwenger, The fuel cycle simulator of the EU-DEMO fuel cycle, 30th IEEE Symp. Fusion Engineering (SOFE), Oxford, UK, 9-13 July 2023.
- Chr. Day, Progress in maturation of critical technologies for the EU DEMO fuel cycle, 30th IEEE Symp. Fusion Engineering (SOFE), Oxford, UK, 9-13 July 2023.

## Jens Hänisch

- J. Hänisch, S. Tokatlidis, D. Li, Vortex matter, anisotropy, and electrical transport in (Li,Fe)OHFeSe thin films, invited talk, MRM2023, Kyoto, Japan, 11.-16.12.2023

## Bernhard Holzapfel

- KC4: The KIT-CERN REBCO laboratory, 1st HiTAT workshop, 9.3.23, Geneva, „Teilchenphysik und Energiewende“, Physik im Rathaus, 3.7.23, Karlsruhe

## Mathias Noe

- Mathias Noe, "Ressourcen schonen und Energie sparen – Supraleiter für Netztechnik und Industrie", Rheinland-pfälzischer Supraleiterkongress – Zukunftstechnologie mit wirtschaftlichem Nutzen, 20. April 2023, Mainz
- Mathias Noe, Christof Humpert, Stephan Pöhler et al., "Technical and economic feasibility of a 380 kV, 5 kA resistive type SFCL", European Applied Superconductivity Conference 2023, September 3rd-7th, 2023, Bologna, Italy
- Mathias Noe, Bernhard Holzapfel, Tabea Arndt, "Supraleitung in der (Hybrid-) Elektrischen Luftfahrt", Workshop „Potenziale klimaneutrales Fliegen 2045 und Fähigkeitslücken bei Schlüsseltechnologien“, 10.2023, Bonn

# Schutzrechtsbestände

- Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einer veränderbaren Spulenimpedanz  
Noe, Mathias; Schacherer, Christian  
DE 2532016  
FR 2532016  
GB 2532016  
JP 5907894  
US 9583258
- 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  
Holzapfel, Bernhard; Rodriguez Zermeno, Victor  
DE 2983218  
US 10153071
- Schienengebundene Magnetschwebbahn  
Holzapfel, Bernhard; Noe, Mathias  
CN 2016800101353  
DE 3256359  
FR 3256359
- Transformator, Wickelkörper dafür und Verfahren zur Herstellung eines Wickelkörpers  
Hellmann, Sebastian  
DE 3341945  
FR 3341945  
GB 3341945
- Supraleitfähiger Leiter und Verwendung des supraleitfähigen Leiters  
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.  
CH 3335228  
CN 10814458  
DE 3335228  
FR 3335228  
GB 3335228  
IE 3335228  
US 10825585
- Verbinder für supraleitfähige Leiter und Verwendung des Verbinders  
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.  
CH 3335280  
CN 10814961  
DE 3335280  
DE 102015010634.1  
FR 3335280  
GB 3335280  
IE 3335280  
US 10218090
- Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines supraleitfähigen Leiters  
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.  
CN 10814715  
DE 102015010676.7  
EP 16756943.3-1212  
US 11328841
- Design of contacts for superconducting busbars and cables  
Rodriguez Zermeno, Victor  
DE 3352303  
FR 3352303  
GB 3352303
- Verfahren und Vorrichtung zur Anreicherung oder Abreicherung mindestens eines Wasserstoffisotops in einem Gasstrom  
Day, Christian; Giegerich, Thomas; Hörsensmeyer, Yannik; Müller, Ralf; Peters, Benedikt  
DE 3441129  
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
- Bitterprinzipbasierte Magnetvorrichtung und Verwendung einer bitterprinzipbasierten Magnetvorrichtung  
Arndt, Tabea  
DE 102020124852.0  
EP 21766121.4-1212  
US 18/245,899
- Bandleitervorrichtung und Kabel, das die Bandleitervorrichtung aufweist  
Arndt, Tabea  
DE 102020128417.9  
EP 21794557.5-1212  
US 18/250,223
- Hochtemperatur supraleitende Schaltvorrichtung  
Martz, Simon; Noe, Mathias; Pham, Quoc Hung  
EP 23180956.7  
LU LU502329
- Hochtemperatur supraleitender Schalter  
Noe, Mathias  
LU LU502334
- Pumpe  
Arndt, Tabea  
DE 102023115683.7
- Method for determining load parameters  
Courcelle, Maeva; De Carne, Giovanni; Tao, Qiucen  
EP 23195368.8
- Verfahren zum Betrieb eines elektrischen Energieversorgungsnetzes, Computerprogramm, Leistungselektronikeinrichtung  
De Carne, Giovanni  
DE 102016119422.0  
EP 17783483.5



# 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)

## **Sekretariat**

Dagmar Klimmek (-23501)

## **Supraleiter- und Kryomaterialien**

Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)

## **Supraleitende Energietechnische Anwendungen**

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)

## **Geschäftsführer**

Kai Bauer (-23705)

## **Kryobetrieb**

Dr. Holger Neumann (-22625)

## **Supraleitende Magnettechnologie**

Prof. Dr. Tabea Arndt (-23515)

## **Technologie des Fusionsbrennstoffkreislaufs**

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

Mai 2024

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