

ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung
Jahresbericht 2024



IMPRESSUM

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

Telefon +49 721/608-23501

www.itep.kit.edu

TEXTE:

Tabea Arndt, Nadezda Bagrets, Giovanni De Carne, Stefan Fink, Thomas Giegerich, Francesco Grilli, Stefan Hanke, Volker Hauer, Jens Hänisch, Frank Hornung, Bernhard Holzapfel, Marion Klaeser, Andrej Kudymow, Ralph Lietzow, Mathias Noe, Quoc Pham, Wesley de Sousa, Klaus Weiss

REDAKTION:

Ingeborg Meyer

FOTOS UND GRAFIKEN:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

TITELBILD:

Installation des supraleitenden 110 kV, 500 MVA Kabelsystems inklusive Endverschlüsse im Umspannwerk Menzing der Stadtwerke München

GESTALTUNG:

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

DRUCK:

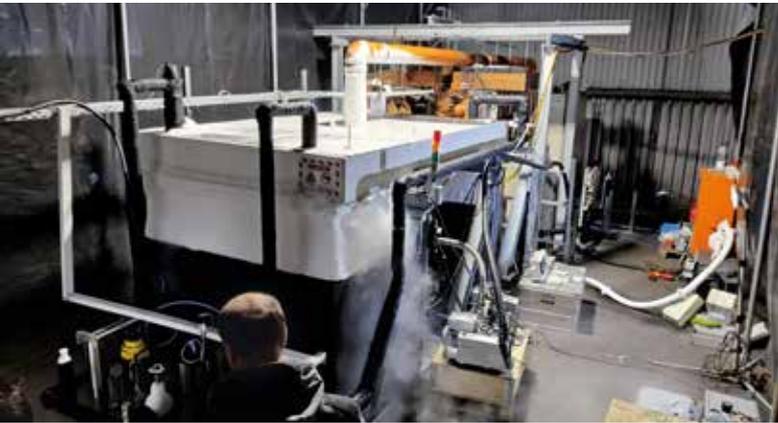
Stober Medien GmbH, 76344 Eggenstein

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

Mai 2025



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001



Inhalt

4–5 VORWORT

6–37 ERGEBNISSE AUS DEN FORSCHUNGSFELDERN

- 6 Supraleiter- und Kryomaterialien
- 14 Supraleitende Energietechnische Anwendungen
- 20 Echtzeitsysteme für Energietechnologie
- 25 Supraleitende Magnettechnologie
- 33 Vakuum- und Fusionstechnologie

38 PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

39 ABGESCHLOSSENE DOKTORARBEITEN

41–44 LEHRE UND BILDUNG

45–48 ZAHLEN, FAKTEN, DATEN

49–61 VERÖFFENTLICHUNGEN

- 49 Fusion
- 51 Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)
- 55 Energiesystemdesign (ESD)
- 57 Natural, Artificial and Cognitive Information Processing (NACIP)
- 58 Matter and Material (MT)
- 59 Eingeladene Vorträge
- 60 Schutzrechtsbestände

63 KONTAKT

Vorwort

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

- Supraleiter- und Kryomaterialien
- Energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- Echtzeitsysteme für Energietechnologien
- Supraleitende Magnettechnologie sowie
- Vakuum- und Fusionstechnologien

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 zu meist 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 werden.

Dazu gehören:

- Labor zur Entwicklung supraleitender Komponenten für die Energietechnik
- Technikum zur Entwicklung supraleitender Materialien
- Magnetlabor zur Entwicklung von speziellen supraleitenden Wicklungen und Magneten
- Kryogenes Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe
- Kryogene Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei sehr tiefen Temperaturen und das Power-Hardware-in-the-Loop-Labor des KIT Energy Lab.

2024 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 sehr herzlich zu diesem Ruf und freuen uns auf die weitere kollegiale Zusammenarbeit.

Weiterhin ergaben sich 2024 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. 2024 wurde ein Beitrag veröffentlicht, in dem die Röntgendiffraktometrie zur Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern beschrieben wurde. Dem Hauptautor Kai Walter wurde dafür auf der Applied Superconductivity Conference in Salt Lake City 2024 der Jan Evetts Awards der Zeitschrift Superconductor Science and Technology verliehen. Wir gratulieren Kai Walter sehr herzlich zu dieser Auszeichnung.

Im Rahmen einer langjährigen Kooperation mit CERN wurde 2024 die ehemalige Pilotproduktion von Hochtemperatur-Supraleitern der Firma Bruker in den Routinebetrieb am KIT überführt. Es konnten erste längere Bänder bis zu 15 m und erste breitere Proben bis zu 3 cm Breite mit guten Eigenschaften hergestellt werden.

Im CryomaKLabor zur Untersuchung mechanischer Materialeigenschaften bei tiefen Temperaturen konzentrierten sich die Arbeiten 2024 auf Zugversuche an Hohlkörpern in Wasserstoffumgebung. Insbesondere an Proben aus Kupfer, austenitischen und ferritischen Stählen wurde das wasser-

stoffinduzierte Ermüden des Materials untersucht und damit auch die Testmöglichkeiten hin zu Messungen mit Wasserstoffumgebung gasförmig oder flüssig erweitert.

Im Forschungsfeld **Energietechnische Anwendungen der Supraleitung** wurde im Rahmen des BMWK-Verbundprojektes DEMO200 ein Technologiedemonstrator für eine hochtemperatur-supraleitende Industriestromschiene erfolgreich mit den Industriepartnern getestet. Bei dem Test im Aluminiumwerk der Firma Trimet in Voerde wurde eine Stromstärke von bis zu 190 kA erzielt. Damit wurde die grundlegende Auslegung bestätigt, und es konnte im Rahmen des BMWK-Reallabors SuprAl mit der Entwicklung und den dauerhaften Einsatz einer 600-m-Stromschiene mit 200 kA für den Einsatz in einem Aluminiumwerk in Hamburg begonnen werden. Das ITEP begleitet das Reallabor wissenschaftlich und verantwortet die Datenerfassung und -auswertung.

Weiterhin wurden im BMWK-Verbundprojekt HighAmp zur Entwicklung eines neuartigen supraleitenden Mittelspannungskabels eine Vielzahl von Hochspannungsmessungen und AC-Verlustmessungen an verschiedensten Konfigurationen durchgeführt. Ziel ist es, eine optimale Anordnung der Dreiphasenleiter bei möglichst hoher Spannung zu entwickeln.

Bei der Entwicklung einer supraleitenden Brückenschaltung mithilfe des dynamischen Widerstands von Supraleitern konnte ein Dauerbetrieb aufgezeigt werden. Damit sind zunächst die grundlegenden Arbeiten dazu abgeschlossen.

Bei der Modellierung von supraleitenden Komponenten konnte durch eine neue Methode die Simulationszeit für die Berechnung von Wechselstromeigenschaften eines supraleitenden Kabels auf einem runden Kern von einigen Stunden auf einige Minuten verkürzt werden – bei gleicher Genauigkeit.

Im Forschungsfeld **Echtzeitsysteme für Energietechnologien** sind wichtige Forschungsthemen die Modellierung von Netzen, die Untersuchung von dynamischen Energiespeichersystemen und die Integration von Wasserstoff in zukünftige Energiesysteme.

In dem Verbundprojekt SuperLink wurde die Berechnung des 110-kV-Netzes der Stadtwerke München abgeschlossen, indem der Einfluss eines supraleitenden 110-kV-Kabels auf ein neu strukturiertes Netz untersucht wurde. Im Vergleich zum Bestand könnten etwa 10 % an Leitungslänge eingespart werden. Weiterhin wurde das 110-kV-Prototypkabel mit 500 MVA im Oktober erfolgreich für einen Präqualifikationstest in Betrieb genommen.

Ein hybrider Energiespeicher, bestehend aus einer Batterie und einem schnellen Schwungrad, ergibt Vorteile für die Lebensdauer eines Batteriespeichers. Hierfür wurden verschiedene Regelstrategien für die Frequenz- und Leistungsregelung entwickelt.

Im Energy Lab des KIT ist die sogenannte „Hydrogen Integration Platform“ der Baustein für die Untersuchung von wasserstoffbasierten Energietechnologien. Für mehrere große Demonstrationsprojekte wurde das Baufeld dazu weiter vorbereitet und die Planung detailliert. Für 2025 ist beispielsweise die Anbindung des H₂-in-the-Loop-Labors geplant ebenso wie die Inbetriebnahme einer Wasserstoffverflüssigung.

Eine wichtige Aufgabe im Forschungsfeld **Supraleitende Magnettechnologie** ist die Entwicklung hochtemperatur-supraleitender Magnete. Am Institut existiert eine Apparatur zum robotischen Wickeln von nicht planaren hochtemperatur-supraleitenden Magneten. Mit dieser Apparatur wurden 2024 erstmals Versuche unternommen, eine nicht planare Wicklung herzustellen. Das EU-Projekt MEESST wurde 2024 abgeschlossen, indem der am ITEP

entwickelte Magnet im Plasmakanal erfolgreich getestet werden konnte.

Für eine hybride Energiepipeline für Strom und Flüssigwasserstoff wurde das Konzept finalisiert und erste Komponenten bestellt. Im Verbundprojekt SPEEDY-HTS zur Entwicklung eines 1:1-Demonstrators für einen supraleitenden Mid-Speed-Windgenerator wurde das Design finalisiert und für die Pitch-Regelung ein Patent eingereicht. In diesem Typ von Windgeneratoren kann durch den Ersatz des konventionellen Rotors gegen einen supraleitenden Rotor die Generatorleistung von 6 auf 13 VA mehr als verdoppelt werden. Bei der weiteren Entwicklung von supraleitenden rotierenden Maschinen wurde die Modellierung der Asynchronmaschine mit Käfigläufer begonnen.

Im Forschungsfeld **Vakuum- und Fusions-technologien** hat Dr. Thomas Giegerich im Mai 2024 die Leitung von Dr. Christian Day übernommen, der eine leitende Funktion bei einer Firma angenommen hat. Wir bedanken uns sehr herzlich bei Dr. Christian Day für die ausgezeichnete Leitung und Aufstellung seiner Arbeitsgruppe und freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit mit Dr. Thomas Giegerich.

Im Rahmen des Aufrufs des BMBF zur Fusionsforschung konnten zwei neue Projekte mit Industriepartnern eingeworben und begonnen werden.

Im Projekt SyrVBreTT geht es um die Entwicklung des Brennstoffkreislaufs und wichtiger Komponenten für einen Stellarator, und im Projekt KaLiAS wird eine Strategie für die Lithium-6-Produktion entwickelt.

Bei der Entwicklung von Kryovakuumpumpen wurden zwei wichtige Ziele erreicht: Für die Pumpe des italienischen Divertor-Test-Tokamak-Projektes wurde das Design erstellt, und ebenso wurde für die Pumpen im Einstein-Teleskop-Projekt das Konzept erstellt und überprüft.

Im Projekt DIPAK, in dem ein komplett neues Labor für große Vakuumtechnolo-

gien aufgebaut wird, wurde die vorläufige Planung des Gebäudes finalisiert und die Gesamtplanung beauftragt. Weiterhin wurde die Produktion des großen Vakuumbehälters für die zentrale Testeinheit begonnen.

2024 wurden in der **Ausbildung** 37 Doktorarbeiten, 22 Masterarbeiten und 11 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 das vielfältige und fruchtbare Zusammenarbeiten mit unseren Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und der Industrie nicht möglich gewesen. Dafür unser ganz besonderer Dank. Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit 2025 und wünschen Ihnen alles Gute.

Herzlich

Ihre Institutsleitung


Matthias Noe


Bernhard Holzapfel


Tabea Arndt


Giovanni De Carne

Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Testkammer für mechanische Zug- oder Bruchuntersuchungen in kryogenem Wasserstoff (gasförmig oder flüssig).

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

HOCHTEMPERATURSUPRALEITER

In der ersten Hälfte des Jahres 2024 veröffentlichten wir unsere Arbeit über die Korrelation von Kristallstruktur und Sauerstoffmangel δ von $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [1], die uns den dritten Platz des Jan Everts Awards 2024 der IoP-Zeitschrift Superconductor Science and Technology einbrachte. Dieser Preis wurde auf der ASC 2024 in Salt Lake City an Kai Walter verliehen. Dort präsentierten wir Erkenntnisse über gemischte $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (mREBCO)-Dünnschichten. mREBCO kann durch eine Mischung der seltenen Erde RE (zum Beispiel Er, Ho, Dy, Gd, Eu, Sm) realisiert werden, die zur Bildung von Dünnschichten verwendet wird. Die chemische Lösungsabscheidung (CSD) machte es außerordentlich einfach, die chemische Zusammensetzung zu verändern. Es stellte sich heraus, dass die Kristallstruktur sehr genau durch den mittleren Ionenradius vorhergesagt werden kann, der aus den RE-Verhältnissen der verwendeten Lösung berechnet wurde (Abbildung 1a). Dadurch war es möglich, fünf verschiedene Probenätze zu erstellen, die zwar alle ähnliche Gitterparameter, aber unterschiedliche Mengen an RE-Mischung aufwiesen. Unsere Vermutung, dass diese zunehmende RE-Mischung die Pinning-Eigenschaften verändern würde, konnte bisher nicht bestätigt werden. Nichtsdestoweniger scheint die RE-Mischung die Mikroverformung entlang der c-Achse zu beeinflussen (Abbildung 1c). Mit zunehmender RE-Mischung nahm die Mikro-

verformung deutlich ab. Dies war sehr überraschend, da wir davon ausgingen, dass die RE-Mischung die Mikroverformung erhöhen würde. Wir führen diesen Rückgang auf einen zusätzlichen Freiheitsgrad während des Filmwachstums zurück, der dem wachsenden Film hilft, sich selbst zu optimieren. Der zusätzliche Freiheitsgrad hat seinen Preis, denn der Abscheideprozess wird komplexer und ist daher schwieriger zu steuern, um dünne Schichten mit guter Kristallinität zu erhalten, was sich in einer leichten Abnahme der kritischen Temperatur ä-

Bert (Abbildung 1b). Eine große Chance ergibt sich aus dieser Abnahme der Mikrodehnung. mREBCO könnte das Potenzial haben, die Pinning-Kapazität durch Optimierung der Grenzflächen zwischen künstlichen Pinning-Zentren (APCs) und der REBCO-Matrix zu erhöhen, da durch optimierte Grenzflächen mehr oder effektivere APCs eingebaut werden könnten.

In früheren Arbeiten zeigten wir, dass BaHfO_3 (BHO) die kritische Stromdichte von supraleitenden $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (GdBCO)-Dünnschichten drastisch erhöhen kann. Aufgrund von dehnungsbedingten Effekten wächst BHO in GdBCO-Dünnschichten, die durch gepulste Laserabscheidung gewachsen sind, in Form von Nanosäulen, die sich durch die gesamte Schicht ziehen. Dünnschichten aus GdBCO+2,5Gew.-% BHO, die auf (100)-orientierten LaAlO_3 -Einkristallen gewachsen sind, zeigen die höchsten J_c -Werte für 800 °C Depositionstemperatur und 5-Hz-Laserfrequenz. Um die Lücke zwischen Labor und industrieller Produktion von Bandleitern zu schließen, bei denen GdBCO genutzt wird, ist es daher notwendig, die Transporteigenschaften von GdBCO-Schichten mit 2,5 Gew.-% BHO auf technischen Substraten zu untersuchen. Deshalb wurden GdBCO-Dünnschichten mit 2,5 Gew.-% BHO auf IBAD-MgO-Bändern von Sunam mit einer LaMnO_3 -Abschlusspufferschicht bei unterschiedlichen Depositionstemperaturen T_{dep} und Laserfrequenzen f aufgewachsen. Eine Erhöhung der T_{dep} führt zunächst zum Wachstum von gut ausgerichteten BHO-Nanosäulen, die sich durch den gesamten Film ziehen, und dann zu einem Wachstum der Nanosäulen. Das Gleiche gilt für f . Daher würde man erwarten, dass es für jede Fre-

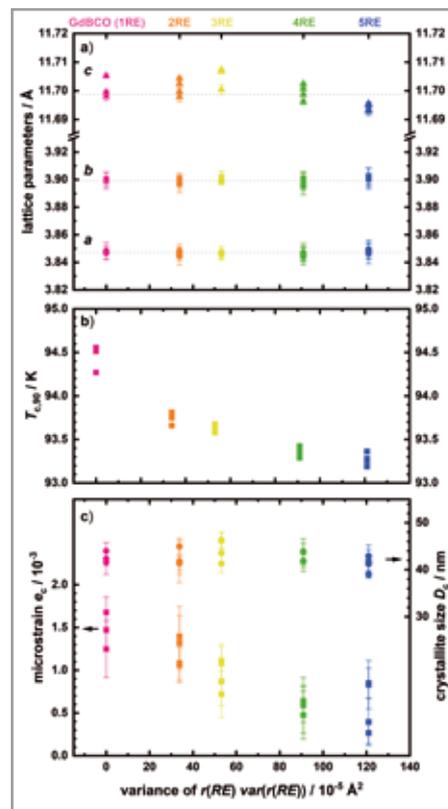


Abb. 1: Abhängigkeit der Gitterparameter (a), der kritischen Temperatur (b) und der Mikroverformungen und Korngröße (c) von der Varianz des Seltenerd-Ionenradius in mREBCO-Dünnschichten (einspaltig).

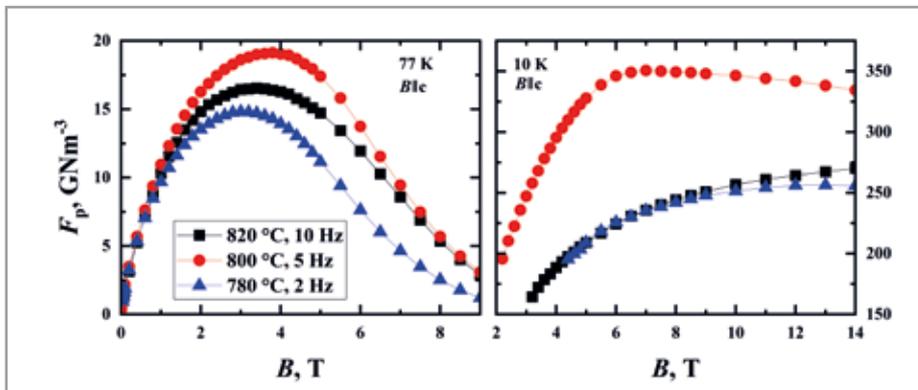


Abb. 2: Feldabhängigkeit der Pinning-Kraftdichte bei 77 K und 30 K für drei verschiedene Sets von Depositionsparametern (zweispaltig).

quenz eine T_{dep} gibt, bei der man eine optimale Defektmorphologie erreichen kann.

Abbildung 2 zeigt die Abhängigkeit der Pinning-Kraftdichte (F_p) vom Magnetfeld bei 77 K und 30 K für die optimierten Proben, die bei a) 820 °C, 10 Hz, b) 800 °C, 5 Hz und c) 780 °C, 2 Hz abgeschieden wurden. Jede zweifache Verringerung von f erfordert eine Verringerung der Abscheidetemperatur um rund 20 °C, um supraleitende GdBCO+2,5 Gew.-% BHO-Schichten mit vergleichbaren maximalen Pinning-Kraftdichten ($F_{p,max}$) zu erhalten. $F_{p,max}$ (77 K) = 16,5 GNm⁻³ für die bei 820 °C, 10 Hz abgeschiedene Probe, $F_{p,max}$ (77 K) = 19,1 GNm⁻³ für die bei 800 °C, 5 Hz abgeschiedene Probe und $F_{p,max}$ (77 K) = 14,8 GNm⁻³ für die bei 780 °C, 2 Hz abgeschiedene Probe. Bei 30 K sind die Unterschiede in $F_{p,max}$ jedoch deutlicher. Die bei 800 °C deponierte Probe weist einen Wert von 350,6 GNm⁻³ auf, der im Vergleich zu den anderen Proben 1,5-mal höher ist. Diese Unterschiede in $F_{p,max}$ sind auf die Unterschiede in der Dichte und Größe der BHO-Nanosäulen zurückzuführen. Möglicherweise führen 800 °C und 5 Hz zur optimalen Größe der BHO-Nanosäulen, was zu den höchsten J_c - und $F_{p,max}$ -Werten führt.

Im Rahmen des SFB-Projekts HyPERION, das sich mit der Entwicklung kompakter

NMR-Geräte befasst, wurden für zukünftige Pinning-Erhöhen, die für das Erreichen der angestrebten 10 T unerlässlich sind, REBCO-Schichten auf SrTiO₃-Substraten optimiert. Diese Substrate werden in einem Nachbarinstitut (IMT) oberflächenmodifiziert.

Im Zuge des Projekts KeraSolar sollen neuartige keramische Solarzellen entwickelt werden, um Alternativen zum aktuellen Standard Silizium zu liefern. Das Projekt wird durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert und vereint ein interdisziplinäres Team von unterschiedlichen Instituten. Das ITEP ist für die Herstellung dünner Schichten mittels PLD zuständig.

Die erste Keramik, die im Zuge des Projekts am ITEP hergestellt wurde, ist BaNbO₂N, ein Oxynitrid mit einer Bandlücke von 1,7 eV. Hierfür wurde ein Barium-Niob-Oxid als Target verwendet und der benötigte Stickstoff über N₂-Prozessgas während der Laserdeposition hinzugefügt. Obwohl eine phasenreine Schicht noch nicht abgeschieden werden konnte, zeigt sich die Machbarkeit bereits in den ersten Ergebnissen.

EISENBASIERTE SUPRALEITER

Als Partner eines italienischen Verbundprojekts wurden im Rahmen einer Masterarbeit Co-dotierte BaFe₂As₂-Schichten auf

metallischen Bändern hergestellt. Ziel des Projekts ist die kostengünstige Herstellung Fe-basierter supraleitender Bandleiter durch Modifikation der Pufferschichtarchitektur und Depositionsmethoden, nämlich durch chemische Lösungsabscheidung deponierte CeO₂-Schichten auf NiW-RABiTS-Bandproben. Unsere Aufgabe war es zu ermitteln, ob sich BaFe₂As₂ ebenso gut eignet wie Fe(Se,Te).

Epitaktische Ba(Fe,Co)₂As₂-Schichten auf IBAD-MgO-beschichteten metallischen Substraten wurden unter Verwendung einer Eisenpufferschichtarchitektur bereits realisiert. Allerdings ist die Abscheidung von Ba(Fe,Co)₂As₂ auf CeO₂ noch nicht durchgeführt worden. Die ersten Filme zeigten fehlorientiertes Wachstum und nur teilweise Supraleitfähigkeit. Um die Qualität der Filme zu verbessern, werden Keimschichten aus unterschiedlich dotiertem Ba122 eingebracht, wie sie für Fe(Se,Te) bereits eingesetzt werden, was gute Wachstumsbedingungen schafft und die Sauerstoffdiffusion von CeO₂ verhindert. Filme mit 8 % dotierter Pufferschicht zeigen die besten Ergebnisse hinsichtlich der Breite des supraleitenden Übergangs, der Filmqualität und T_c (18,8 K). Sowohl auf der undotierten als auch auf der 3%-dotierten Ba122-Pufferschicht zeigt sich eine Dickenabhängigkeit der supraleitenden Schicht, woraus eine Co-Diffusion von der supraleitenden Hauptschicht in die Keimschicht geschlossen werden kann. Variationen der Laserrepetitionsrate während der Abscheidung von 3 % dotierten Keimschichten, um die Auswirkungen der Co-Diffusion zu verringern, führen zu einer verbesserten Filmtextur, aber auch zu einer vermehrten Bildung von Fehlorientierungen. Ein Vergleich der Gitterparameter von Ba122 und CeO₂ zeigte, dass insbesondere die (103)- und (110)-Fehlorientierungen mit dem gewünschten (001)-orientierten Wachstum konkurrieren. Darüber hinaus wurden

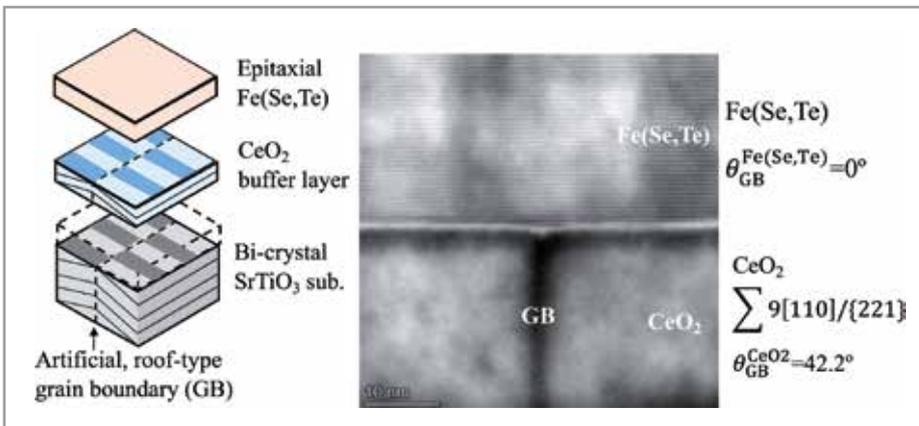


Abb. 3: Schematische Darstellung und elektronenmikroskopische Aufnahme zum c-Achsen-orientierten Wachstum von Fe(Se,Te)-Schichten auf Bikristallen mit [010]-Großwinkel-Kippkorngrenzen (zweispaltig).

Glühversuche durchgeführt, um die die strukturelle Qualität der Filme zu verbessern.

Für die Herstellung und Charakterisierung von Fe(Se,Te)-Dünnschichten wurde die PLD-Anlage hinsichtlich maximaler Energiedichten auf dem Target durch Verkürzen des Laserstrahlgangs und den Einbau eines Teleskops optimiert sowie die elektrische Kontaktierung dieser Dünnschichten und von Einkristallen deutlich verbessert.

In Zusammenarbeit mit mehreren japanischen Universitäten konnte das Wachstum von Fe(Se,Te) auf vizinalen Templaten (CeO₂-gepufferte SrTiO₃-Bikristalle) aufgeklärt und erstmals das Verhalten von [100]-Kippkorngrenzen in Fe-basierten Supraleitern untersucht werden [2]. Aufgrund des geometry coherency models sind die Korngrenzenwinkel in SrTiO₃, CeO₂ und Ba122 in einer Probe jeweils unterschiedlich, und aufgrund der domain matching epitaxy wachsen Ba122-Schichten auf Bikristallen mit Korngrenzenwinkel $\geq 24^\circ$ -c-Achsen-texturiert, also ohne Korngrenze auf (Abbildung 3). Kleinwinkelkorngrenzen dieser Geometrie verhalten sich ähnlich wie [001]-Kippkorngrenzen mit einem kritischen Winkel von mindestens 9° für nicht reduzierte kritische Stromdichten.

[1] K. Walter et al., Supercond. Sci. Technol. 37, 075002 (2024)

[2] K. Iida et al., Sci. Technol. Adv. Mater. 25, 2384829 (2024)

Kontakt: jens.haenisch@kit.edu

LEITER- UND KABEL-TECHNOLOGIEN

Die KC4-Produktionslinie für Hochtemperatursupraleiter (HTS)-Bänder hat den regulären Betrieb erreicht mit Probenlängen bis zu 15 m und einer Stromtragfähigkeit der Bänder von 450 A/cm² bei 4,2 K und 10 T (siehe Abbildung 4). Parallel zur Produktion von langen Bändern laufen Experimente mit kurzen Längen, um die Abscheidungsbedingungen für reguläre Y123-Beschichtungen zu optimieren, IBAD-Bänder von Faraday, SUNAM, HTSI und Shanghai SC zu testen und Pinning-

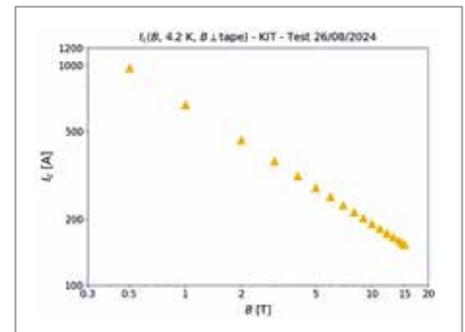


Abb. 4: Feldabhängigkeit von J_c bei 4,2 K.

Optionen zur Verbesserung der Bandleistung bei hohen Magnetfeldern zu prüfen. Die Herstellung breiter Bänder (30–40 mm) war erfolgreich und zeigte eine gute Homogenität über die Breite des Bandes (siehe Abbildung 5). Die Charakterisierung der Bänder ist im Gange einschließlich der Standardtransporteigenschaften, des mechanischen Verhaltens und der Messung der Stromübertragungslänge und des Barrierenwiderstands zwischen supraleitenden und stabilisierenden Schichten. Bei diesen Parametern wurde eine sehr gute Homogenität sowohl über die Breite als auch über die Länge beobachtet, wobei die Werte im Vergleich zu kommerziellen HTS-Bändern niedriger liegen.

In Abbildung 6 sind die J_c -Werte der KC4-Probe S2401-018/019 bei verschiedenen Temperaturen und Magnetfeldern von 0 bis 14 T dargestellt. Hohe J_c -Werte von über 5 MAcm² bei 30 K und 10 T und über 9 MAcm² bei 10 K und 10 T werden erreicht. Die J_c -Werte liegen bei über

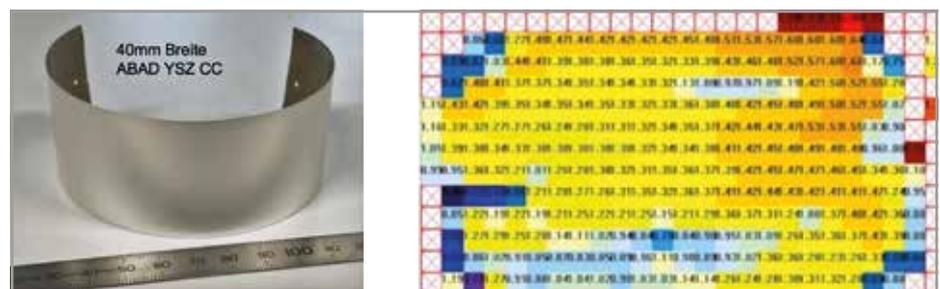


Abb. 5: Das 40 mm breite Bruker Template (links) zeigt eine gute und homogene J_c -Verteilung (rechts) von $>1 \text{ MA/cm}^2$ bei 77 K.

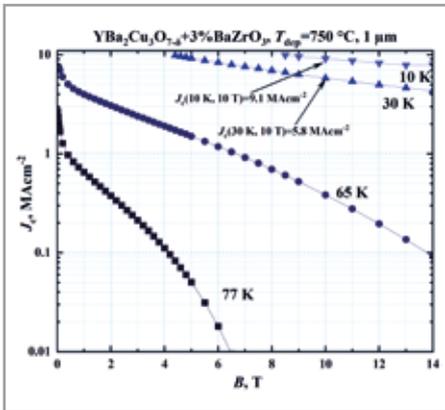


Abb. 6: J_c -Werte der KC4-Probe S240-018/019 bei unterschiedlichen Temperaturen und Magnetfeldern.

180 A bei 77 K s.f. YBCO+3%BZO-Filme zeigen, dass die Einführung solcher Defekte zu einer leichten Verringerung der J_c -Werte bei einem Magnetfeld von 0 bis 5 T und 77 K führen kann. BZO-Nanosäulen haben jedoch die Fähigkeit, die Vortices entlang ihrer gesamten Länge zu fixieren, sodass für diese Bänder im Vergleich zu ursprünglichem YBCO eine 2- bis 3-fache Erhöhung des J_c -Wertes bei niedrigen Temperaturen und hohen Feldern erreicht wird.

Die hergestellten KC4-Bänder weisen geringe Schwankungen bei CTL (Stromübertragungslänge) und R_b (Barrierewiderstand)

über die Länge und Breite auf. Die Messkonfiguration dieser Parameter ist sehr anspruchsvoll und umfasst mehrere Schritte: zum einen die Messung der räumlichen Verteilung des Spannungsabfalls in der umgebenden Metallschicht des HTS-Bandes auf einer sehr kurzen Strecke von weniger als 1 mm (siehe Abbildung 7) und zum anderen die Messung des Widerstands der Metallschicht. Im Vergleich zu kommerziellen HTS-Bändern sind diese Parameter relativ niedrig, was auf eine sehr gute Verbindung der aufgebrauchten Schichten schließen lässt. Derzeit laufen Experimente zum Einfluss der Luft- oder Wasserstoffexposition der REBCO-Schicht, um die Faktoren zu verstehen, die den Barrierewiderstand und die Stromübertragungslänge beeinflussen und für verschiedene Anwendungen von HTS-Bändern relevant sind.

Kontakt: bernhard.holzapfel@kit.edu, nadezda.bagrets@kit.edu

STRUKTUR- UND FUNKTIONSMATERIALIEN FÜR KRYOANWENDUNGEN

SUPRALEITERCHARAKTERISIERUNG

Im Rahmen des Vorhabens KC4 zur Herstellung spezieller Hochtemperatursupraleiter (HTS)-Bänder wurden diverse Charakterisie-

rungen an den Supraleitern zur Prozessoptimierung und Qualitätssicherung durchgeführt. Die Arbeiten sind in dem Forschungsthema Supraleitende Kabel beschrieben.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde der thermische Kontaktwiderstand zwischen HTS-Bändern untereinander und HTS-Bändern mit den sie berührenden Strukturmaterialien für ausgesuchte HTS-Kabelkonfigurationen im Temperaturbereich von 4 bis 300 K und in Abhängigkeit des Anpressdruckes gemessen. Hierfür wurde eine spezielle Erweiterung für die Option „Thermischer Transport“ des Physical Properties Measurement System verwendet. Diese Messungen liefern sehr wichtige und bisher fehlende Daten für die Simulation der Quenchausbreitung in HTS-Kabeln. In Abbildung 8 ist zum einen die Messkonfiguration zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes (links) gezeigt sowie relevante Kabelkonfigurationen mit gestapelten HTS-Bändern (mittig und rechts), eingebettet in eine äußere Matrix.

PROJEKT „APPHY! – MATERIALASPEKTE“

Hohlzugproben (Innendurchmesser von 2 mm und Probenaußendurchmesser von >5 mm) erlauben eine schnelle und effiziente Untersuchung des Wasserstoffein-

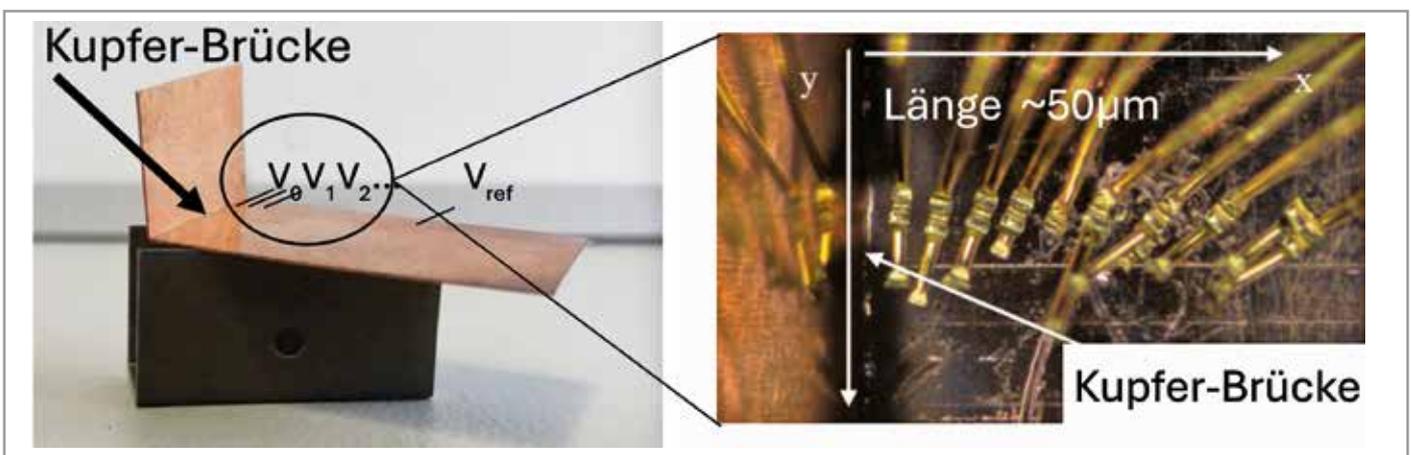


Abb. 7: Messkonfiguration der Stromübertragungslänge an einem HTS-Band (links) und das Detail der mittels Wire-Bonder aufgebrauchten Spannungskontakte (rechts).

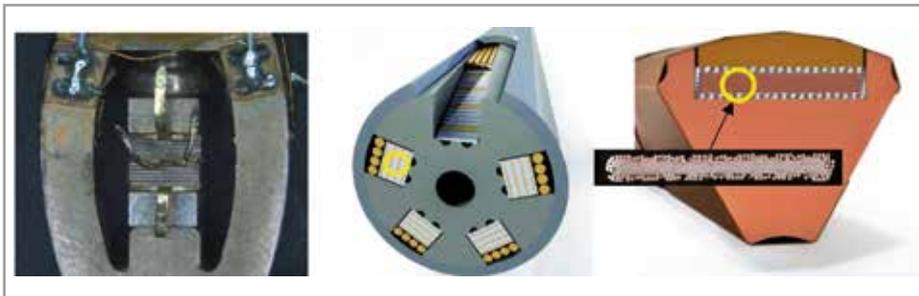


Abb. 8: Messkonfiguration (links) und relevante Kabelkonfigurationen (mittig und rechts).

flusses auf ein Material. Die Innenumgebung der Hohlzugproben wurde entweder mit Wasserstoff oder Helium bei einem Druck von 0 oder 200 bar gefüllt. Zugversuche mit einer reduzierten Dehnrates von $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ wurden im Temperaturbereich zwischen der Raumtemperatur und 77 K durchgeführt. Die Innenumgebung der Hohlzugproben wurde entweder mit Wasserstoff oder Helium bei einem Druck von 0 oder 200 bar gefüllt. Hohlzugproben wurden aus Materialien, relevant für verschiedene Wasserstoffanwendungen, gefertigt.

■ Austenitischer Stahl 1.4571 (316Ti): Um den Einfluss des Drucks auf das mechanische Verhalten zu untersuchen, wurden Zugversuche mit einem Helium-

druck von jeweils 1, 100 und 200 bar bei Raumtemperatur in dem Kapillarrohr der Proben durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigten einen Unterschied in der Dehnung vor dem Bruch bei unterschiedlichen Drücken. Bei 1 bar wiesen die Proben eine höhere Dehnung bis zum Versagen auf im Vergleich zu den bei 100 und 200 bar getesteten Proben. Zwischen 100 und 200 bar wurde jedoch kein signifikanter Unterschied in der Dehnung festgestellt. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Zugversuche an Hohlzugproben aus 316Ti bei RT und 77 K, verschiedenen Prüfgasen und Drücken in der Kapillare dargestellt. Bei RT ist mit 200 bar Wasserstoff eine signifikant reduzierte maximale Dehnung zu sehen, die bei 77 K

nicht mehr vorhanden ist.

Das Experiment wurde auch unter Verwendung von Wasserstoff als Medium durchgeführt. Bei einem Druck von 1 bar wurden aufgrund der Umgebungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede im mechanischen Verhalten beobachtet. Ein Wasserstoffdruck von 100 bar entspricht 100 bar in Helium; jedoch wurde bei 200 bar Wasserstoff eine deutlich reduzierte Dehnung bis zum Bruch festgestellt. Dieses Ergebnis unterstreicht den schädlichen Einfluss von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften von Stahl. Es ist jedoch bekannt, dass austenitischer Stahl bei Raumtemperatur nur eine geringe Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung aufweist, was hauptsächlich auf die niedrige Diffusionsrate von Wasserstoff in diesem Material zurückzuführen ist.

Die Untersuchung der Proben im Längsschnitt nach der Prüfung ergab große Risse an der Innenfläche an den Stellen der Druckeinwirkung. Bei Wasserstoff waren die Risse deutlich tiefer und häufiger, insbesondere im stark deformierten Bereich der Probe. Darüber hinaus wurden im un-

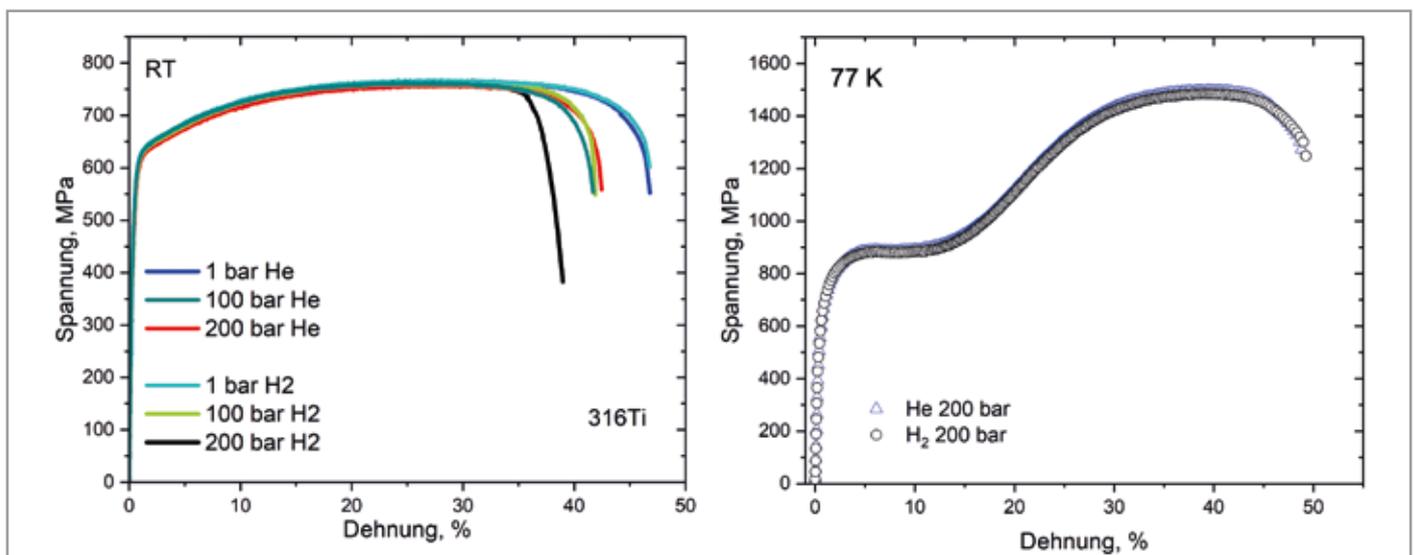


Abb. 9: Zugversuche an Hohlzugproben aus 316Ti bei RT und 77 K, verschiedenen Prüfgasen und Drücken in der Kapillare.

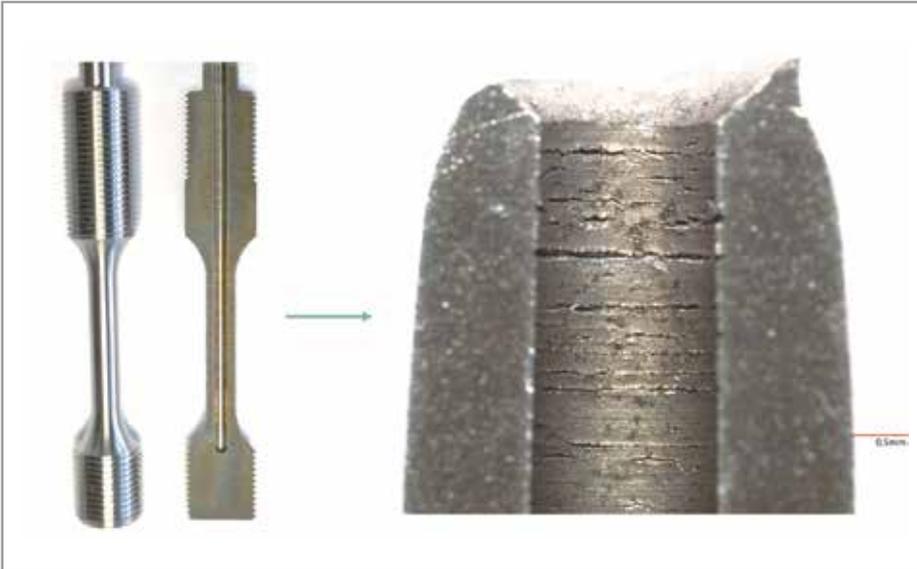


Abb. 10: Detailansicht der 316Ti-Hohlzugprobe vor (links) und nach (rechts) dem Test.

verformten Bereich grobe Spuren beobachtet, die von der Bearbeitung des Innenkapillare herrührten (siehe Abbildung 10).

Deutlich sind in der Aufnahme horizontale Rillen erkennbar, die scheinbar das Versagen in Wasserstoffatmosphäre begünstigen. Die EBSD-Analyse der Längsschnitte ergab das Vorhandensein einer martensitischen Phase mit einer Dicke von bis zu 20 µm vom inneren Durchmesser. Diese Phase könnte aufgrund von induzierter Deformation während der mechanischen Bearbeitung der inneren Kapillare entstanden sein. Weitere Studien sind erforderlich. Die fraktografische Analyse der Probe, die bei einem Wasserstoffdruck von 200 bar getestet wurde, zeigte spröde Brüche in einem Abstand von 50 µm vom inneren Durchmesser, während der Rest des Bruchs duktil war. Bei 1 bar wurde keine spröde Bruchschicht beobachtet, während bei 100 bar spröde Brüche in etwa 10 µm festgestellt wurden. Die bei 77 K durchgeführten Zugversuche in Wasserstoff und Helium bei einem Druck von 200 bar zeigten keine si-

gnifikanten Unterschiede in den Spannungs-Dehnungs-Kurven.

- Kupfer wurde bei 0 und 200 bar in verschiedenen Umgebungen bei Raumtemperatur getestet. Das Material wies eine Härte von 125 HV auf. Ein Anstieg des Drucks im Inneren der Kapillare führte zu einer Verringerung der Zugfestigkeit und einer leichten Reduktion der Dehnung, die sowohl in Wasserstoff- als auch in Heliumumgebungen beobachtet wurde. Im Vergleich der beiden Gase führte die Deformation in Wasserstoff zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit. An den geglähten Proben wurden Tests mit Wasserstoff bei Drücken von 0 und 200 bar sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 77 K durchgeführt. Weitere Experimente sind zur vertieften Untersuchung geplant.

- Ferritischer X60-Stahl: Aufgrund der begrenzten Anzahl an Proben wurden nur zwei Tests durchgeführt: einer bei Raumtemperatur unter 200 bar Wasserstoff

und ein weiterer unter Helium. Die in Wasserstoff getestete Probe zeigte im Vergleich zur in Helium getesteten Probe eine geringfügig kürzere Dehnung, und die fraktografische Analyse ergab einen signifikanten Anteil an sprödem Bruch. Studien der Längsschnitte identifizierten wasserstoffinduzierte Risse auf der inneren Oberfläche, während die Heliumprobe keine Risse aufwies und zu einem duktilen Versagen führte. Eine feinkörnige Schicht von bis zu 20 Mikrometer Dicke wurde in der mit Wasserstoff getesteten Probe nachgewiesen, die in der Heliumprobe nicht vorhanden war. Weitere Untersuchungen sind erforderlich.

PROJEKT „CRYOGENIC SCALMALLOY CX“

Elektrische Antriebe für Flugzeuge, basierend auf Wasserstoff als Energieträger, sind eine Schlüsseltechnologie, die zum Beispiel im abgeschlossenen Projekt AdHyBau (siehe Jahresbericht 2023) entwickelt wurde und in einem Nachfolgeprojekt AdHyBau-2 bis 2027 zu einem Prototyp gebracht werden soll. Dazu sind spezifische Leichtbaumaterialien zu betrachten. Scalmalloy (von Airbus entwickelte hochfeste Aluminiumlegierung zur additiven Fertigung) ist zwar durchaus interessant, aber durch die signifikante Tieftemperaturversprödung bisher nicht für eine kryogene Anwendung einsetzbar. Zusammen mit AP-Works als Hersteller additiv gefertigter Komponenten wurde Probenmaterial eines modifizierten Herstellungsprozesses untersucht, das als Scalmalloy-CX den kryogenen Temperaturbereich erschließen soll.

Hierzu wurden Mikrostrukturuntersuchungen an Standard- und CX-Proben durchgeführt, um den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu verstehen. Mittels Wärmebehandlung der CX-Proben bei

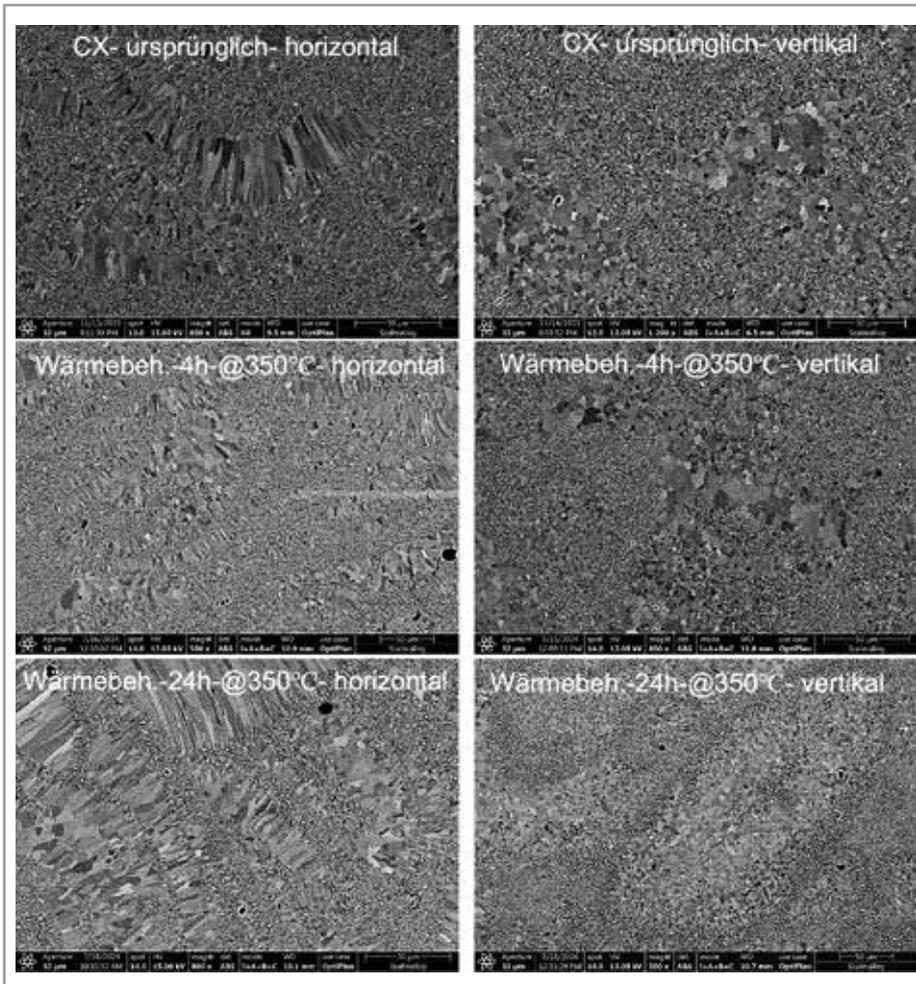


Abb. 11: Mikrostruktur einer Scalmalloy-CX-Probe in horizontaler (links) und vertikaler (rechts) Richtung im ursprünglichen Zustand sowie nach 4 beziehungsweise 24 h bei 350 °C (von oben nach unten).

350 °C für 4 und 24 h wurde die Mikrostruktur gezielt verändert. Mikrohärtemessungen nach den verschiedenen Zeitstufen zeigen eine Zunahme insbesondere in der horizontalen Aufbaurichtung. [Abbildung 11](#) zeigt die Details der Mikrostruktur einer Scalmalloy-CX-Probe in horizontaler und vertikaler Richtung im ursprünglichen Zustand sowie nach 4 beziehungsweise 24 h bei 350 °C. In horizontaler Richtung zeigt sich eine Ausweitung grober Körner, in vertikaler Richtung eine Verfeinerung der Kör-

ner mit längerer Wärmebehandlung.

In zusätzlichen EDX-Analysen wurde eine zweite Phase mit fein verteilten Mg-reichen Partikeln beobachtet. Weitere Wärmebehandlungen sollen die systematische Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften aufzeigen.

Kontakt: klaus.weiss@kit.edu

Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Installation eines Technologiedemonstrators für
eine supraleitende 200 kA Industriestromschiene
im Test bei der Firma Trimet in Voerde

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

Die Schwerpunkte des Themas „Energietechnische Anwendungen der Supraleitung“ liegen auf der Entwicklung neuartiger Betriebsmittel für Elektroenergiesysteme sowie auf der anwendungsorientierten Entwicklung von nutzerfreundlichen Simulationsmodellen dieser Betriebsmittel. 2024 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

SUPRALEITENDE NETZ- UND ENERGIEKOMPONENTEN

SUPRALEITENDE BRÜCKENSCHALTUNG

Eine vielversprechende Anwendung für REBCO-Bandleiter ist das supraleitende

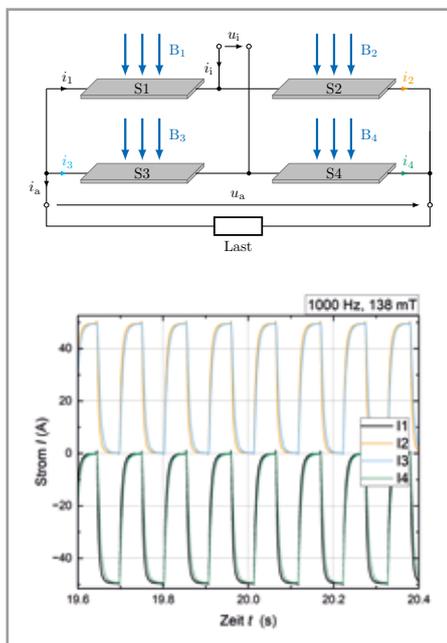


Abb. 1 oben: Grundlegender Aufbau der Brückenschaltung mit zwei parallelen supraleitenden Pfaden. Unten: Stromverlauf in den einzelnen Stromzweigen der Brückenschaltung bei Dauerbetrieb.

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 2023 eine supraleitende Brückenschaltung demonstriert werden. Durch das gezielte Ansteuern der Schalter S1–S4 (siehe Abbildung 1 oben mit HTS-Bandleitern) kann somit analog zu Halbleitern ein Umrichter aufgebaut werden.

2024 wurde die Schaltung im Dauerbetrieb getestet und die experimentellen Arbeiten zum grundlegenden Verständnis abgeschlossen. Wie in Abbildung 1 unten dargestellt, konnte die gewünschte Stromumrichtung demonstriert werden. Durch eine Erhöhung des supraleitenden Widerstandes können die Kommutierungszeit und damit die Frequenz erhöht und die erreichbare Spannung der Schaltung angepasst werden.

Kontakt: quoc.pham.kit.edu

BMWK-PROJEKT HIGHAMP

In innerstädtischen Energieverteilungsnetzen wird der Ersatz bestehender Kabel durch Systeme mit höheren Strömen notwendig. Angestrebt werden innovative Systeme, mit denen die vorhandenen Rohrleitungen der bestehenden AC-Gasdruckkabel weiter genutzt werden können, jedoch mit höherer spezifischer Leistung. Im Rahmen des Verbundprojektes HighAmp wird ein leistungsstarkes HTS-System als Ersatz von vorhandenen Gasdruckkabeln entwickelt. Projektziel ist ein dreiphasiges HTS-Kabel für einen Retrofit (Umrüstung in existierende Bodenkanäle):

- Länge: circa 15 m
- Übertragungsleistung: circa 100 MW

- Spannung: 20 kV
- Strom: 3 kA
- Betriebstemperatur: 70 K
- Isolation: unterkühlter flüssiger Stickstoff

Anders als in anderen HTS-Kabeln sind die drei Phasen nicht koaxial, sondern in einer Dreiecksstruktur angeordnet. Dies hat Vorteile im Hinblick auf die Hochspannungsfestigkeit und die elektrische Symmetrie. Andererseits erfordert diese Anordnung geeignete HV-feste Stützstrukturen, die die Position der Phasen im Kryostatrohr fixieren, insbesondere auch im Hinblick auf die abstoßenden Lorentzkräfte.

Wie Simulationen am KIT gezeigt haben, kommen Stapelvarianten im Hinblick auf die AC-Verluste nicht infrage. Derzeit bieten sich als einzige realisierbare Alternative CORT-Leiter (Conductor on round tube) an, helikal auf einen runden Kupferträger gewickelte HTS-Bänder. Für solche Leiter stehen Probeleiter zur Verfügung, die derzeit getestet werden.

2024 wurden die Simulationen zu den AC-Verlusten weiter verfeinert. Nach derzeitigem Stand bleiben die Gesamtverluste bei Nennstrom in einem dreiphasigen Kabel aus CORT-Leitern beherrschbar. Ein experimenteller Aufbau für die kalorimetrische Messung wurde aufgebaut, die Kalibrierungsmessungen wurden abgeschlossen. Mit der bisher verwendeten AC-Quelle konnten im Prüfling bisher nur Ströme bis zu 1 kA angeregt werden, zu niedrig, um kalorimetrisch messbare Verluste zu erzeugen. Entsprechend haben wir den Teststand für AC-Verluste weiterentwickelt: Die AC-Quelle wurde mit einem stärkeren und angepassten Transformator ausgerüstet, um den Zielwert von 3 kA bei Frequenzen von 30 bis 70 Hz zu erreichen.

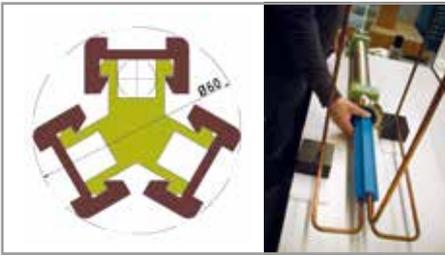


Abb. 2: Querschnittsskizze (links) und Bild vom Einschleiben (rechts) einer gefrästen kontinuierlichen Isolierung aus PE-UHMW in das Wellrohr von Combutt. Die Führung der drei Kupferrohre nach oben außerhalb der elektrischen Isolierung ermöglicht den Anschluss der Innenleiter an Hochspannung beim Test im Kryostaten.

Hochspannungsprüfungen an dreiphasigen Kurzproben wurden mit der Anlage Combutt (Cryogenic One Meter Build-Up for Tube Testing) mit Flüssigstickstoff durchgeführt. Stehspannungstests mit Einphasenwechselspannung, Drehstrom und Standardblitzstoßspannung wurden in Fortführung bisheriger Arbeiten an Prüflingen mit kontinuierlicher elektrischer Isolierung vorgenommen. Diese kontinuierlichen Isolierungen gewährleisteten eine durchgängige Abstützung der drei Innenleiter innerhalb des Wellrohres.

Hierbei wurden zwei Varianten mit gefrästen PE-UHMW-Isolatoren untersucht (Abbildung 2).

Danach wurde eine „Schlauch“-Variante untersucht, bei der zur Abstützung Druckschläuche, Verlegerohre und ein äußeres Abwasserrohr verwendet wurden (Abbildung 3). Die verwendeten Bauteile bestanden aus PE-Material und sind kostengünstig in langen Längen erhältlich.

Alle insgesamt fünf in Combutt untersuchten kontinuierlichen Varianten wurden er-

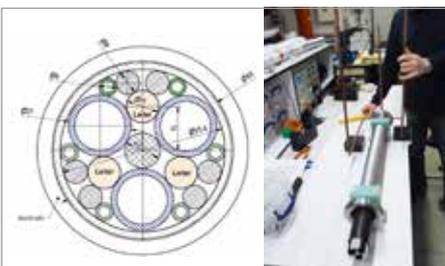


Abb. 3: Querschnittszeichnung (links) und Bild vom Zusammenbau des Prüflings (rechts), bei dem die Innenleiter mit Schläuchen und Rohren aus PE an der richtigen Position innerhalb des Wellrohres gehalten werden.

folgreich Biegetests unterzogen. Die im vergangenen Jahr erreichten Stehspannungsergebnisse (AC: 72 kVeff, Drehstrom: $\sqrt{3} \cdot 50$ kVeff, Blitzstoß: 145 kV) der beiden Prüflinge mit diskreten Isolatoren im Glattrohr konnten von keinem kontinuierlichen Typ im Wellrohr erreicht werden. Deshalb wurde ein Test mit einem diskreten Isolator im Wellrohr durchgeführt. Insgesamt zeigte bei den Hochspannungstests im Wellrohr die diskrete Isolatorvariante eine höhere dielektrische Festigkeit als die untersuchten kontinuierlichen Isolatoren. Ein Nachteil der diskreten Isolatorvariante ist jedoch der schwierige Einbau der Isolatoranordnung in das Wellrohr bei zunehmender Länge beziehungsweise Isolatorstückzahl. Zur Auswahl der Isolatorvariante für den 10-m-Demonstrator werden deshalb auch Kriterien wie die einfache Montierbarkeit berücksichtigt.

Als potenziell geeignetste Varianten bei den kontinuierlichen Isolatoren werden ein gefräster PE-Typ und die Schlauchvariante angesehen. Aktuell wird eine Modifikation der diskreten PE-Variante untersucht, die ein Einziehen auch in Wellrohre größerer Länge mit vielen diskreten Isolatoren erlaubt.

Kontakt: andrej.kudymow@kit.edu, stefan.fink2@kit.edu

BMW-K-PROJEKT RoWaMag

Ziel des BMW-K-Projekts RoWaMag (Robuster und wartungsarmer Magnetheizer mit Hochtemperatursupraleiter-Spulen für Warmformprozesse) ist die Entwicklung eines robusten und wartungsarmen Magneten mit HTS-Leitern der zweiten Generation (REBCO-Bandleiter) für Magnetheizer. Darüber hinaus soll der Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Eignung für die Industrie zum Erwärmen zylindrischer Werkstücke (Bolzen) für Strangpressen erbracht werden. Zu Jahresbeginn wurde ein

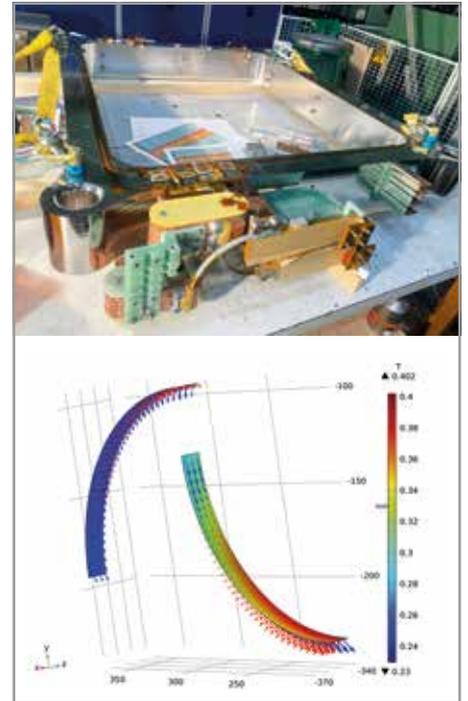


Abb. 4 oben: Magnet mit Stromzuführung vor dem Einbau. Unten: Berechnung der Magnetfeldstärke (Farbskala und blaue Vektoren) und der Lorentzkraft (rote Vektoren) an den HTS-Bändern der Stromzuführungen bei einem Strom von 500 A.

Test des Kryosystems und des Magneten durchgeführt. Es zeigte sich, dass die thermische Ankopplung der Spule stark von der Stärke des von der Spule erzeugten Magnetfeldes abhängt, da die einzelnen Teilspulen aufgrund der anziehenden Wechselwirkung zwischen Eisenjoch und Spule mit zunehmendem Magnetfeld besser an die Kühlplatten des Kaltbusses angedrückt werden.

Nach dem Abkühlen wurde der Magnet zunächst über mehrere Tage mit Strömen von 200 beziehungsweise 250 A beaufschlagt und das Kühlverhalten untersucht. Die am Magnet und den am warmen Ende der Stromzuführungen gemessenen Temperaturen lagen bei 250 A (entspricht etwa dem halben Betriebsstrom) unterhalb der Designtemperaturen von circa 25 K am Magneten beziehungsweise 80 K an den Stromzuführungen. Bei weiterer Erhöhung des Stromes, bei circa 286 A, quenchte jedoch eine der HTS-Stromzuführungen und wurde dabei zerstört. Anhand von Simulationsrechnungen (Abbildung 4) konnte gezeigt werden, dass der Einfluss des Magnetfeldes auf die Stromtragfähigkeit der

HTS-Stromzuführungen vom Hersteller unterschätzt wurde. Am ITEP wurden die Stromzuführungen daher mit zusätzlichen Supraleiterbändern und 3D-gedruckten Stützen zum Abfangen der Lorentzkräfte neu ausgelegt. Darüber hinaus wurde ein Konzept zur Verbesserung der thermischen Anbindung der Stromzuführungen an die erste Stufe des Kryokühlers entwickelt, sodass die Temperatur am warmen Ende der HTS-Stromzuführungen im Strombetrieb nicht über 80 K ansteigt.

Der Einbau des Magneten in den Kryostaten erfolgt im vierten Quartal 2024, sodass ein Test des Magneten in ersten Quartal 2025 erfolgen kann.

Kontakt: ralph.lietow@kit.edu

BMBF-PROJEKT FPP-MC

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Beiträge für die Erstellung eines Konzeptentwurfs für ein Fusionskraftwerk auf der Basis des magnetischen Einschlusses“ (Akronym: FPP-MC) arbeiten wir in unserem Teilvorhaben im Wesentlichen an der Entwicklung von demontierbaren, niederohmigen und hochstromfähigen Supraleiterkontakten für die Anwendung in Fusionsmagneten. Das Projekt wurde im Februar 2024 mit den Partnern IPP Garching, Proxima Fusion und Gauss Fusion begonnen. 2024 wurden zunächst die Anforderungen an den Kontakt definiert. Dabei ist für einen Strom von 100 kA ein Nanoohm an Widerstand zu erreichen bei einer Temperatur von 20 oder 4,5 K und einem Magnetfeld von etwa 12 T. Nach einer Vorauswahl von möglichen Leiter- und Verbindungskonzepten wurden erste Teilleiter in Auftrag gegeben und die Fertigung eigener Probeverbindungen begonnen. Unsere Arbeiten fokussieren sich ausschließlich auf hochtemperatur-supraleitende Bandleiter, da diese inzwischen ausreichend verfügbar sind und im Gegensatz zu Tieftemperatursupralei-

tern einen Betrieb bei 20 K ermöglichen. Weiterhin wurden mit den Projektpartnern erste Simulationsmodelle erstellt und der Test von Teilleiterverbindungen eng abgestimmt. In Vorbereitung befinden sich eine Vielzahl von Tests, die 2025 durchgeführt werden.

Kontakt: mathias.noe@kit.edu

MODELLIERUNG VON SUPRALEITERN UND KOMPONENTEN

Die Stromverteilungen in CORT-Kabeln (Conductor-on-Round-Tube), die Wechselstrom führen, wurden mithilfe von 3D-Simulationen auf der Grundlage der H-Formulierung der Maxwell-Gleichungen weiter untersucht.

Bei der zu analysierenden Geometrie handelte es sich um ein einlagiges CORT, das aus drei HTS-Bändern bestand. Es wurde festgestellt, dass es für eine solche Geometrie nicht notwendig ist, eine volle Drallsteigung mit periodischen Randbedingungen zu simulieren. Stattdessen reicht es aus, einen beliebig kurzen Längsschnitt des Kabels mit entsprechenden Randbedingungen für das Magnetfeld am Ende zu simulieren. Solche Randbedingungen berücksichtigen, wie sich das Feld entlang der Längsrichtung infolge der Verdrehungsteilung ändert. Die simulierte Länge kann somit sehr kurz gemacht werden. Die Rechenzeit eines Wechselstromzyklus dauert nur Minuten statt mehrerer Stunden für die gesamte Länge der Verdrehungsteilung.

Abbildung 5 zeigt die longitudinalen, azimuthalen und radialen Stromdichtekomponenten für die simulierte Geometrie eines einlagigen CORT-Kabels mit einem Verdrehungswinkel von 45°. Erwartungsgemäß fließt der Strom im äußeren Teil des Supraleiters in Längsrichtung und im inneren Teil in azimuthaler Richtung. Die Verbindung der

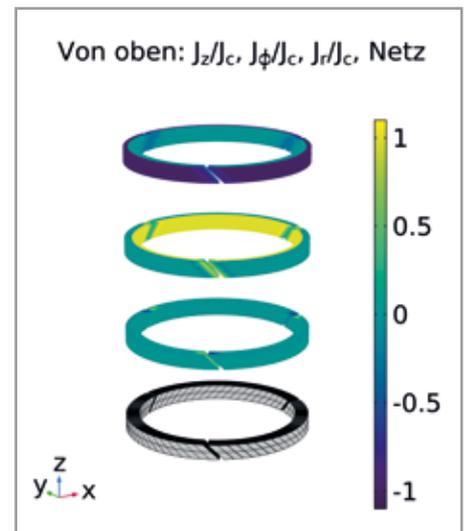


Abb. 5: Stromdichtekomponenten und Einflechtung in einem CORT-Kabel (AC-Spitzenstrom).

beiden Komponenten erfolgt über radiale Ströme an den Rändern. Die Abbildung 6 zeigt auch die Netzdiskretisierung, die aus nur zwei Elementen in Extrusionsrichtung besteht und so kurze Simulationszeiten ermöglicht.

2023 wurde die MEMEP-Methode (Minimum Electro-Magnetic Entropy Production) für 3D-Simulationen verwendet, die darauf abzielten, die Schwebekraft zwischen einem Permanentmagneten und einem Doppelstapel von HTS-Bändern zu berechnen. Es wurde eine hohe Übereinstimmung mit den Experimenten erzielt, die sowohl unter Nullfeldkühlungs- als auch unter Feldkühlbedingungen durchgeführt wurden. 2024 wurde das numerische Modell weiter verbessert, und es hat sich gezeigt, dass es wesentlich recheneffizienter ist als das sogenannte segregierte H-Formulierungsmodell, das in der Literatur von anderen Forschungsgruppen vorgeschlagen

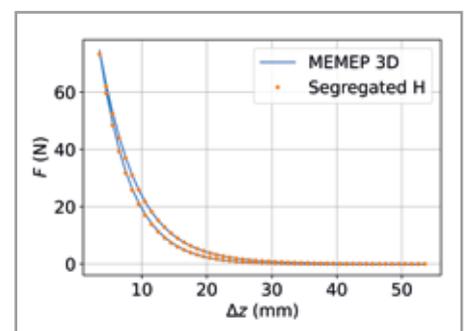


Abb. 6: Schwebekraft (F) als Funktion des Abstands (Δz) zwischen einem Permanentmagneten und einem Stapel HTS-Bänder: Vergleich zwischen den Modellen MEMEP 3D und Segregated-H.

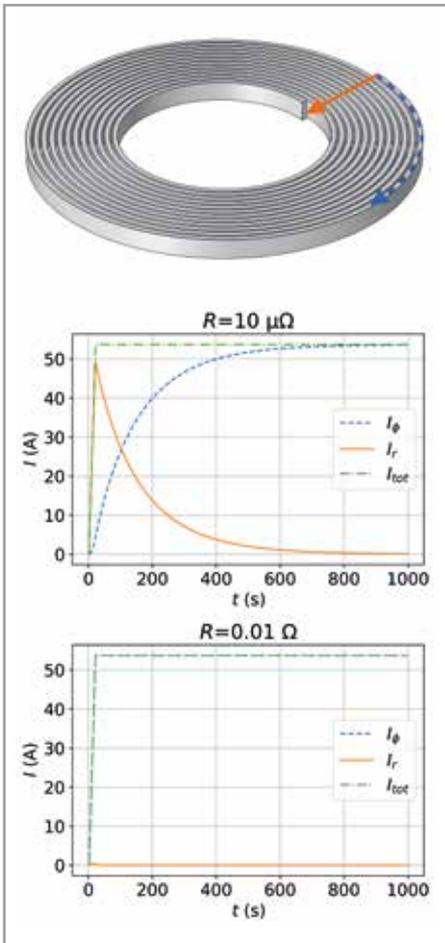


Abb. 7: Stromkomponenten in einer Pancake-Spule für unterschiedliche Werte des Windung-zu-Windung-Übergangswiderstands.

wird. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der mit den beiden Modellen berechneten Schwebekraft, wobei MEMEP 15-mal schneller ist. Ein weiterer Rechenvorteil könnte durch die Parallelisierung der Berechnung auf großen Computerclustern erzielt werden.

Im Rahmen des FPP-MC-Projekts haben wir ein numerisches 2D-Modell zur Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der aktuellen Komponenten in nicht isolierenden Spulen aufgebaut. Innerhalb dieses Modells kann der Strom in azimuthaler und radialer Richtung fließen, und das Verhalten

der Spule wird im Wesentlichen durch den Wert des Übergangswiderstands zwischen den Windungen bestimmt, wie in [Abbildung 7](#) gezeigt. In Zukunft soll dieser Modellierungsansatz genutzt werden, um Stromverteilungen in praxisnahen Spulen zu untersuchen, die von Proxima Fusion entwickelt wurden.

In einem Projekt mit Siemens haben wir die Minderung von Wechselstromverlusten in einem 15-MVA-HTS-Transformator für Windenergieanwendungen mittels numerischer Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode untersucht.

Unter Verwendung einer effizienten 2D-achsensymmetrischen T-A-Formulierung haben wir die AC-Verluste über bis zu Tausenden von Umdrehungen von HTS-Bändern innerhalb eines Volltransformators geschätzt. Um den hohen Bedarf an Transportstrom auf der Niederspannungsseite zu decken, haben wir mehrere parallele Roebel-Kabel eingesetzt. Unsere Analyse umfasste die Minderung von AC-Verlusten von einzelnen Bändern und Roebel-Kabeln bis hin zu den gesamten elektromagnetischen Komponenten des Transformators einschließlich des Kerns und der magnetischen Flussumlenkungen. Für jede Komponente untersuchten wir Faktoren, die die AC-Verluste beeinflussen, und schlugen Strategien vor, um sie zu reduzieren.

Schließlich schlugen wir drei verschiedene Designs vor, die bei Temperaturen von 20, 70 und 77 K arbeiten.

Wir haben an einer gemeinsamen Arbeit teilgenommen, die darauf abzielte, verschiedene numerische Modelle für das elektromagnetisch-thermische Verhalten von Hochtemperatursupraleiterspulen zu vergleichen. Bei den untersuchten Fällen handelte es sich um HTS-Spulen unterschiedlicher Form (Rennstrecke, zirkulär), die unter verschiedenen Arbeitsbedingungen überkritische Ströme erfuhren. Ein Ziel

der Studie war es, die Möglichkeit zu untersuchen, die elektrischen und thermischen Eigenschaften der verschiedenen Schichten, aus denen die HTS-Bänder bestehen, zu homogenisieren, um die Komplexität der simulierten Geometrie und die Rechenzeit stark zu reduzieren. Diese Zusammenarbeit, an der Forscher aus dreizehn verschiedenen Forschungsgruppen auf der ganzen Welt beteiligt waren, führte zur Veröffentlichung eines gemeinsamen Artikels (2024 Superconductor Science and Technology 37 125006).

Wir haben mit ENEA Frascati an der Entwicklung von Analyseformeln zur Berechnung der momentanen Verlustleistung in HTS-gestapelten Kabeln mit einer begrenzten Anzahl von Bändern pro Stapel zusammengearbeitet. Diese Formeln sind zwar nicht so genau wie die Modelle, die auf Finite-Elemente-Berechnungen basieren, erreichen aber bei hohen Feldern eine ausreichende Genauigkeit. Dies ermöglicht eine hinreichend genaue Abschätzung der Verlustleistung in bestimmten Momenten eines Plasmaszenarios, in denen die Variation des Feldes sehr hoch ist, zum Beispiel während der kritischen anfänglichen Entladungsperiode der Plasmainitiation. Auch diese Zusammenarbeit führte zur Veröffentlichung eines gemeinsamen Artikels in Superconductor Science and Technology.

Kontakt: francesco.grilli@kit.edu

Highlight

BMWK-Projekt DEMO200

Ziel des Projekts ist es, die Machbarkeit einer supraleitenden DC-Schiene zum Einsatz als Rückleiter in einem Aluminium-Elektrolyse-Werk für einen Strom von bis zu 200 kA zu demonstrieren.

Im Rahmen des Projektes wird die Machbarkeit mit einem Demonstrator für den vollen Strom von 200 kA DC, aber mit einer kurzen Übertragungslänge von etwa 2,5 m gezeigt. In einem Aluminiumwerk der Firma Trimet bei Voerde haben wir mit den Konsorten Vision Electric SuperConductors (VESC) als Systemintegrator und Messer für die kryogene Versorgung einen Fullscale-Technologiedemonstrator aufgebaut und getestet. Der Beitrag des KIT bestand in der Auswahl und Validierung von geeignetem 2G-HTS-Material, dem Layout der Leiteranordnung, Simulationen, dem Test eines Subscale-Demonstrators am KIT bei 77 K sowie

der messtechnischen Begleitung der abschließenden Tests in Voerde.

Wesentliche Herausforderung einer solchen Demonstration: Kaum eine Prüfeinrichtung kann eine Gleichstromquelle von 200 kA DC mit kleiner Spannung bereitstellen.

Als Lösung haben wir die Stromschiene als kreisförmige Anordnung von zehn Modulen mit einer Stromkapazität von je 20 kA in einem gemeinsamen Kryostatrohr konzipiert. Für Testzwecke wurden die Module in Reihe geschaltet. Der Gesamtstrom sowie die lokalen Magnetfelder und Lorentzkräfte sind damit die gleichen wie in der parallel geschalteten Zielanordnung, jedoch reicht ein Strom von 20 kA für den Nachweis der geforderten DC-Stromtragfähigkeit aus.

Im Jahr 2024 lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf dem Aufbau und der Durchführung des Fullscale-Tests DEMO200 in Voerde (siehe Abbildung 8).

Das KIT hat den Fullscale-Test messtechnisch vorbereitet und begleitet ihn mit eigener Datenakquisition, Quenchedetektion und einem Steuersystem für die Kryovertile. Auch zum Aufbau der Stromversorgungen hat das KIT beigetragen.

Im Einzelnen sah das Messkonzept eine induktionsarme Messung der kleinen Spannungen im μV -Bereich, eine thermische Verankerung der Stecker und Durchführungen

sowie ein Rangierfeld zur Kontrolle der Instrumentierung beim Aufbau vor. Zudem ermöglichten redundant ausgeführte Temperatursensoren, eine Stickstoffsonde und die Durchflussregelung den sicheren Betrieb der Stromzuführung. Stromversorgung, Steuerung, Überwachung, und Strommessung im „Tandem“-Betrieb wurden ebenfalls durch das KIT verantwortet. Begleitend zu den Tests erfolgte auch eine AC-Ripple-Messung der Wechselstromanteile im Prüfling und des Stromausgleichs zwischen den zwei parallel betriebenen Stromquellen.

Das Mess- und Steuersystem funktionierte in einer LabView-Umgebung. Die Spannungsmessung an einzelnen 20-kA-HTS-Modulen im Druckbehälter wurde redundant aufgebaut. Aufgenommene Daten können beim Testen als Zeitplots, als X-Y-Diagramme (zum Beispiel Spannung vs. Strom) oder auch an den implementierten RI-Schemata als aktuelle Werte dargestellt werden. Es können auch Trends, zum Beispiel zeitliche oder räumliche Temperaturgradienten, dargestellt und beziffert werden. Das komplette rechnergestützte Messsystem wurde in Voerde eingesetzt und wird nun für weitere ITEP-Projekte verwendet.

Der finale Test des DEMO200-Fullscale-Demonstrators erfolgte im September 2024 in einem Elektrodenwerk von TRIMET in Voerde. Dort wurde bei 77 K ein Strom von 190 kA in der Stromschiene erreicht. Bei der anvisierten Temperatur von 70 K können somit mehr als 200 kA übertragen werden. Dies ist bisher nicht in einer DC-Stromschiene mit Hochtemperatursupraleitern erreicht worden und war die Voraussetzung für das Projekt SuprAI, in dem nun die konventionelle 600-m-Stromschiene mit 200 kA dauerhaft durch eine supraleitende Stromschiene ersetzt wird. ITEP begleitet das Projekt wissenschaftlich und ist für die Datenaufnahme und -auswertung verantwortlich.

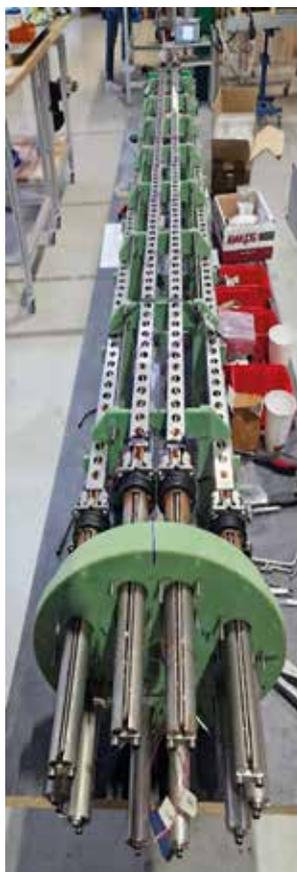


Abb. 8 oben: 200-kA-Modul (Bild Vision Electric SuperConductors).
Unten: DEMO200-Aufbau beim Testbetrieb in Voerde.

Kontakt: andrej.kudymow@kit.edu

Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Power Hardware In the Loop
Halle in Energy Lab

Echtzeitsysteme für Energietechnologie

Koordination: Prof. Dr. Giovanni De Carne

Im Forschungsfeld Echtzeitsysteme für Energietechnologie bearbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ITEP die folgenden Themen:

- Design und Regelung der zukünftigen Energienetze
- Experimentelle Validierung von Energietechnologie

Die Schwerpunkte des Themas „Echtzeitsysteme für Energietechnologie“ liegen auf der Entwicklung des Designs und der Regelungen von Energietechnologie und deren experimentelle Validierung unter realistischen Systembedingungen durch Echtzeitsimulation und Power Hardware in the Loop. 2024 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

ECHTZEIT-SYSTEMINTEGRATION

SCHNELLE ECHTZEITMODELLE FÜR ENERGIESYSTEME

Die Gruppe Real Time Systems for Energy Integration (RTSET) arbeitet intensiv an Ansätzen für Energiekomponenten und -netze für digitale Echtzeitsimulatoren, wobei der Schwerpunkt darauf liegt, diese Modelle bei der erforderlichen Rechenleistung leichter zu machen. Im Rahmen der Helmholtz-Nachwuchsgruppe „Hybride Netze“ haben wir das bestehende dreiphasige äquivalente dynamische Lastmodell zu einer einphasigen Version erweitert. Gegenüber dem Stand der Technik

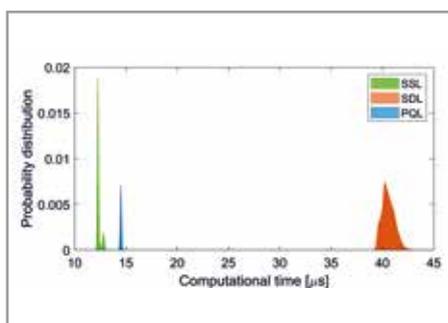


Abb. 1: Rechenzeit für die Berechnung des IEEE-34-Bus-Testnetzes mit dem vorgeschlagenen und dem bestehenden Ansatz.

haben wir die benötigte Rechenzeit um 50 % reduziert, was eine Vergleichbarkeit mit passiven Lastmodellen ermöglicht (Abbildung 1). Ähnlich wie die dreiphasige Version basiert dieses Modell auf der Theorie der Momentanleistung und stützt sich nicht auf den rotierenden Synchronrahmen, um die Wirk- und Blindleistungseinspeisung zu steuern, sodass trigonometrische Berechnungen und die Verwendung großer Speicherfelder vermieden werden. Das in einer kürzlich erschienenen Fachzeitschrift vorgestellte Modell wurde mit dem großen unsymmetrischen IEEE-34-Bus-Testnetz validiert und zeigte eine verbesserte Rechenleistung.

IDENTIFIZIERUNG DER LASTEMPFFINDLICHKEIT IN ECHTZEIT

Die Reaktion auf die Nachfrage spielt eine wichtige Rolle bei der Erreichung einer flexiblen Leistungssteuerung in Energienetzen. In der RTSET-Gruppe konzentrieren wir uns auf spannungs- und frequenzgesteuerte Laststeuerung, die die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit des Wirk- und Blindleistungsverbrauchs von Lasten und Erzeugern ausnutzt. In jüngster Zeit haben wir uns darauf konzentriert, die Abhängigkeit der Last von Spannung und Frequenz in größerem Maßstab zu testen. Dazu haben wir die KIT-Versuchsanlage „Energy Smart Home Lab“ mit kommerziell erhältlichen Lasten und unter realistischen Haushaltsbedingungen genutzt. Wir haben umfangreiche Experimente mit mehr als 30 verschiedenen Lasten und die Reproduktion eines realistischen Ein-Tages-Testfalls einer Haushaltslast durchgeführt. Als Ergebnis dieser Tests wurde die Lastempfindlichkeit gegenüber der Spannung einer typischen Wohnung abgeleitet, die zeigt, dass die

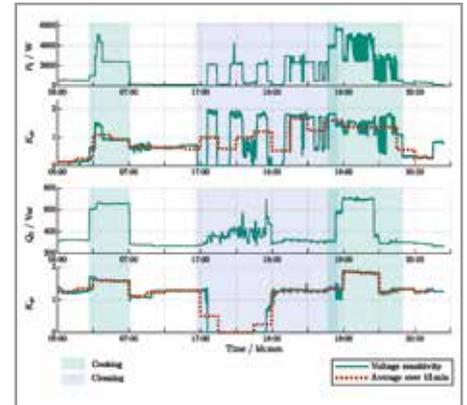


Abb. 2: Beispiel für das Tagesprofil der Lastempfindlichkeit im Energy Smart Home Lab.

Last im Durchschnitt immer noch linear von der Spannung abhängig ist (Abbildung 2). Bei der Betrachtung der Frequenz haben wir stattdessen das Verhalten der Lasten in einem sehr großen Frequenzbereich (40–60 Hz) ermittelt. Die Lasten sind in der Lage, in diesem großen Frequenzbereich zu überleben, allerdings ist ihr Verhalten nicht mehr linear, und es treten starke Nichtlinearitäten auf.

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

Experimental testing of novel energy 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. Eine der größten Herausforderungen bei PHIL-Tests ist die Genauigkeit der Ergebnisse. Aufgrund der Realisierung

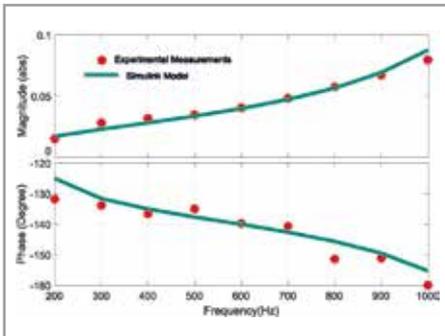


Abb. 3: Impedanzprofil des zu prüfenden Konverters in PHIL.

einer Schleife, die aus Leistungsverstärker, Filterung und Digital-/Analog-Wandlung besteht, weicht die PHIL-Prüfung leicht von der Realität ab. Aus diesem Grund arbeiten wir daran, impedanzbasierte Stabilitätsansätze zur Bewertung der Genauigkeit und Stabilität von PHIL-Tests zu verwenden. Wie in **Abbildung 3** zu sehen, können wir die Korrektheit des impedanzbasierten Stabilitätsansatzes anhand von experimentellen Ergebnissen überprüfen.

HYBRIDE ENERGIESPEICHERSYSTEME

Energiespeichersysteme spielen eine wichtige Rolle bei der Unterstützung der Netzstabilität und der Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Die Verwendung von Batterien zur Bewältigung sowohl langsamer als auch schneller Stromdynamik kann jedoch ihre Lebensdauer stark beeinträchtigen. Batteriespeichersysteme können durch leistungsintensive (aber mit geringer Energiedichte) Energiespeichersysteme wie Schwungräder oder Supercaps ergänzt werden. In der RTSET-Gruppe haben wir unser Wissen über hybride Energiespeichersysteme (HESS) erweitert, bei denen eine energieintensive Speichertechnologie (zum Beispiel Batterie oder Wasserstoff) mit einer leistungsintensiven gekoppelt wird (zum Beispiel Schwungrad oder Supercap). In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung wurde gezeigt, dass die Leistungsdynamik

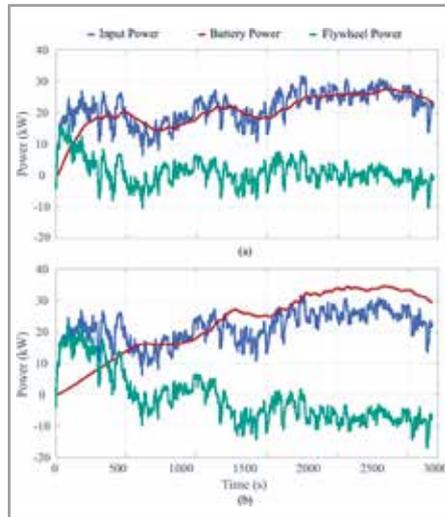


Fig. 4: Leistungsprofil des hybriden Schwungrad-/Batterie-HESS während der Bereitstellung von Netzdienstleistungen. Experimenteller Vergleich der Leistung bei zwei Methoden (a) Filtermethode und (b) Fuzzy-Moving-Average-Methode.

zwischen den beiden Energiespeichersystemen (in diesem Fall eine Batterie und ein Supercap) mithilfe von maßgeschneiderten, auf Fuzzy-Logik basierenden Ansätzen leicht entkoppelt werden kann, was ein besseres Management der Leistung und des Ladezustands der Ressourcen ermöglicht (**Abbildung 4**). In unseren aktuellen Studien analysieren wir das Potenzial zur Verlängerung der Batterielebensdauer mithilfe von HESS. In Zusammenarbeit mit der Universität Perugia in Italien entwickeln wir einen neuen Ansatz zur Alterungsanalyse auf der Grundlage von Leistungshardware im Kreislauf, der eine realistischere Bewertung der Batteriealterung ermöglicht.

HYDROGEN TECHNOLOGY PLATFORM

Einer der Hauptschwerpunkte in Deutschland und insbesondere am KIT ist die Produktion, der Transport und die Nutzung von Wasserstoff für Energieprozesse. Die RTSET-Gruppe ist federführend bei der Wasserstoff-Integrationsplattform, der neu entwickelten Plattform im Energy Lab zur Entwicklung und der Erprobung von Wasserstofftechnologien unter realistischen Bedingungen mithilfe der PHIL-Verbindung. Zwei Labore sind von RTSET geplant: das H₂-in-the-Loop-Labor, in dem ein 50-kW-Elektrolyseur, ein Kompressor, ein Tank und ein 10-kW-Brennstoffzellensystem abgeschlossen und in Betrieb sind. Ziel ist es,

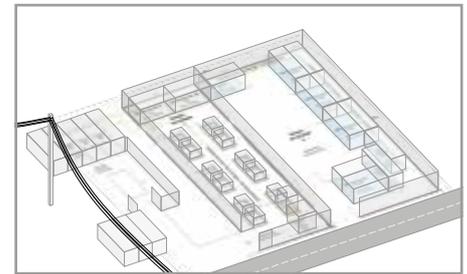


Abb. 5: H₂-Rail-Labor in der Entwicklung für die experimentelle Validierung von Hybridzugtechnologien.

mit dieser Anlage im kleinen Maßstab die Integration von Wasserstoffanlagen in das Stromnetz zu untersuchen. Insbesondere konzentrieren wir uns auf die Frequenzunterstützung bei der Modulation des Strombedarfs in Netzen mit geringer Trägheit. Das zweite Labor (**Abbildung 5**) ist das H₂-Rail-Labor, in dem in diesem Jahr eine 1,2-MW-Brennstoffzelle und eine 1,8-MW-Batterie mit 1,2 MWh installiert werden, um die Leistung von Hybridfrachtzügen (Wasserstoff + Batterien) zu emulieren. Dies ist ein gemeinsames Projekt mit Siemens Mobility zur Entwicklung optimaler Lösungen für das Energie- und Leistungsmanagement.

KIT TESTFIELD FÜR ENERGIEEFFIZIENZ UND NETZSTABILITÄT IN GROSSEN FORSCHUNGSINFRASTRUKTUREN – KITTEN

Teilchenbeschleuniger sind energieintensive Anlagen, die den Experimenten Vorrang einräumen müssen und hohe Anforderungen an die Stromqualität stellen. Auf der anderen Seite wird das Stromnetz immer unbeständiger, und der Druck, die Energiekosten zu senken und die Energienutzung zu verbessern, steigt. Die RTSET-Gruppe ist zusammen mit dem Teilchenbeschleuniger KARA am KIT mit der neu entwickelten Forschungsinfrastruktur KITTEN bundesweit führend beim Thema Nachhaltigkeit der Forschungsinfrastruktur. Das Hauptaugenmerk von KITTEN

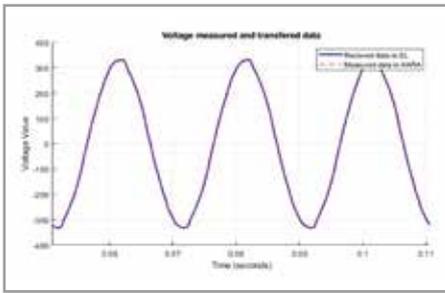


Abb. 6: KITTEN erste Spannungswellenform bei 4-kHz-Übertragung zwischen KARA und Energy Lab.

liegt darauf, die Herausforderungen im Bereich Energieeffizienz und Stabilität von Beschleunigern zu adressieren und Lösungen im breiten physikalischen und energetischen Bereich anzubieten. Als Ergebnis läuft derzeit am KIT ein Horizon-Europe-Projekt „Research Facility 2.0“ im Wert von 5 Millionen Euro, zusammen mit fünf der größten Beschleuniger in Europa (ALBA, CERN, DESY, HZB, MAX IV). Untersucht werden Energieeffizienzthemen von der Komponenten- bis zur Systemebene, sowohl für die Physik als auch für die Energietechnik, wobei der Schwerpunkt auf konkreten Lösungen im Bereich der digitalen Zwillinge, Permanentmagnete, Festkörperversärker und der KI-basierten Steuerung von Beschleunigern liegt. Das wichtigste Ergebnis für die RTSET-Gruppe besteht in der Entwicklung einer schnellen Kommunikationsinfrastruktur (4-kHz-Abtastrate), die die Echtzeitkommunikation zwischen der KARA und dem im Energy Lab realisierten digitalen Zwilling der KARA ermöglicht. Die ersten Spannungs- und Stromdaten wurden bereits übertragen, und das System wird derzeit für mehr als 30 Messpunkte im KARA-Beschleuniger erweitert (Abbildung 6).

Kontakt: Giovanni.carne@kit.edu

TRANSIENTENMODELL FÜR SUPRALEITENDE STROMKABEL

Die weltweit steigende Nachfrage nach Strom und die zunehmende Integration erneuerbarer Energiequellen stellen eine Herausforderung für die Stromnetze dar und machen einen Ausbau und eine Modernisierung der Netze erforderlich. Um dem entgegenzuwirken, wurden mehrere Projekte für supraleitende Kabel gestartet, die

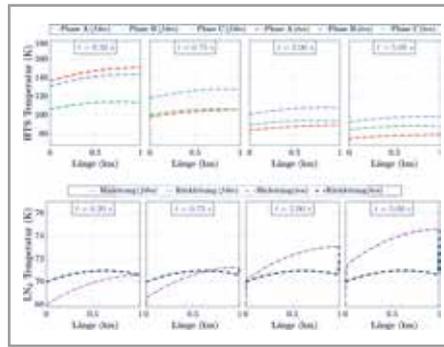


Abb. 7: Temperatur entlang der Kabellänge (a) für die HTS-Bänder und (b) für den LN2-Vor- und -Rücklauf im dreiphasigen konzentrischen Design. Vergleich zwischen den Ergebnissen des FDM-Schemas und der TEA-Methode.

das Potenzial dieser Technologie verdeutlichen. Das Verständnis der Rolle von HTS-Kabeln in Stromnetzen ist von entscheidender Bedeutung, doch stützen sich herkömmliche Studien oft auf vereinfachte Modelle. Unser Team hat eine Simulationemethode entwickelt, die mit großen Energiesystemsimulatoren kompatibel ist und eine detaillierte Analyse der elektrischen und thermischen Leistung von HTS-Kabeln bei elektromagnetischen Transienten ermöglicht. Anhand des dreiphasigen konzentrischen Designs haben wir gezeigt, dass Analogien zwischen elektrischen und thermischen Variablen eine genaue Simulation von HTS-Kabeln in Stromnetzen ermöglichen.

Abbildung 7 vergleicht diese thermische Analogiemethode (TEA) mit der genaueren Finite-Differenzen-Methode (FDM) aus der Literatur und zeigt eine hohe Übereinstimmung im thermischen Verhalten. Darüber hinaus berechnet die TEA-Methode den elektrischen Widerstand des Kabels, der vom Netzsimulator verwendet wird, um die Auswirkungen des Kabels auf das Netz zu analysieren.

Das Modell ist nicht nur schneller und erfordert weniger Rechenaufwand, sondern berücksichtigt auch automatisch die Randbedingungen zwischen den Kabellagen. Dies führt zu einer unkomplizierten Implementierung, die für Echtzeitsimulatoren in Hardware-in-the-Loop-Umgebungen sehr attraktiv ist.

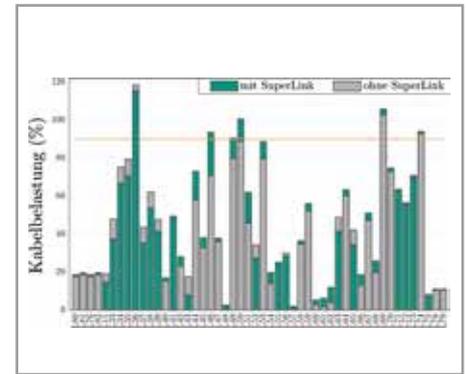


Abb. 8: Auswirkungen der SuperLink-Kabelintegration auf den Lastfluss im 110-kV-Netz: Vergleich der Kabelbelastung mit und ohne SuperLink-Kabel.

NETZOPTIMIERUNG DURCH INTEGRATION EINES 110-KV-HTS-KABELS

Ein Hauptziel des SuperLink-Projekts ist die Entwicklung eines 15 km langen supraleitenden Stromkabels für das 110-kV-Netz in München. Eine erste Analyse (Abbildung 8) zeigt, dass das Kabel die Belastung einiger Leitungen reduziert, aber den Stromfluss verschieben kann, was zu einer Überlastung bisher nicht betroffener Leitungen führen könnte.

Abbildung 8 verdeutlicht den Bedarf für ein neues Verteilernetz aufgrund des steigenden Strombedarfs. Das künftige Netzdesign beinhaltet das im Rahmen des SuperLink-Projekts entwickelte supraleitende Kabel, wodurch möglicherweise neue Umspannwerke vermieden und die Länge der Übertragungsleitungen reduziert werden kann. Es wurden zwei Netzkonzepte entwickelt und verglichen.

Beide Netze reduzieren die Gesamtkabellänge von derzeit 383 km. Im Vergleich zu einem Netz, das ausschließlich aus Kupferkabeln besteht, macht Net.02 die Platz- und Kostenvorteile der Supraleitertechnologie deutlich. Net.02 ermöglicht auch die Stilllegung der Wärmekraftwerke MS-02 und SB-06 und reduziert die Stromerzeugung von SB-21 auf 65 %. LN steht für die normale Kabellänge, LHTS für die supraleitende Verbindungslänge und LT für die gesamte Netzkabellänge.

Kontakt: sousa@kit.edu

Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Wickelversuche in der robotischen Wickelzelle zur Herstellung von nicht planaren Spulen aus der zweiten Generation von Hochtemperatursupraleiter-Bändern (2G-HTS). Die besondere Herausforderung ist die degradationsfreie Führung über die hohe Kante der Bänder mit einem hohen geometrischen Aspektverhältnis.

Supraleitende Magnettechnologie

Koordination: Prof. Dr. Tabea Arndt

Im Jahr 2024 konnten die in den Vorjahren erarbeiteten Infrastrukturkomponenten und Technologiebausteine zusammengefügt werden. Das Zusammenspiel der verschiedenen Forschungsgruppen ermöglichte besondere Ergebnisse.

Die drei Forschungsthemen „Spulen- und Magnettechnologie“, „Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion“ und „Rotierende Maschinen“ des Forschungsfeldes „Supraleitende Magnettechnologie“ zeigten 2024 sowohl schöne Einzelergebnisse als auch ein gelungenes Zusammenspiel.

Beispielsweise sind die ursprünglich aus der Magnettechnologie initiierten DUDA-Spulen und die Kühlung per kryogenem Thermosiphon sowohl wesentlich für die Forschungsarbeiten zum Thema Rotierende Maschinen als auch wichtige Bindeglieder für kompakte Anwendungen im Umfeld von Flüssigwasserstoff im Energiesystem. (Ein neonbasierter Thermosiphon erlaubt vorteilhaft die Kopplung per Wärmeübertrager an Flüssigwasserstoff ohne die Herausforderungen von Wasserstoff direkt in der Anwendung). Auch die Erfahrungen mit den entwickelten Fusionsverbundleitern liefern wesentliche Vorarbeiten und Basisexpertise für die hybride Energie-Pipeline.

Es zeigt sich nun die vorteilhafte Aufstellung sowohl in der Kombination der drei Forschungsthemen als auch über das Forschungsfeld „Supraleitende Magnettechnologie“ hinaus zu den anderen Forschungsfeldern im ITEP.

SPULEN- UND MAGNET- TECHNOLOGIE

ROBOTISCHE WICKELTECHNIK

Dipolmagnete für Beschleuniger, verteilte Wicklungen für Statoren sowie Stellaratormagnete sind Beispiele für Magnete aus nicht planaren Spulen. Die Entwicklung nicht planarer Spulen, die aus bandförmigen

hochtemperatur-supraleitern (HTS) gewickelt werden, stellt aufgrund der Empfindlichkeit des HTS-Materials gegenüber mechanischer Belastung und Magnetfeldausrichtung eine besondere Herausforderung dar.

Zur Herstellung nicht planarer Spulen wurde am ITEP ein robotergestütztes Wickelsystem aufgebaut. Die Roboterzelle besteht aus einem Werkstückpositionierer zur Aufnahme des Spulenkörpers und zwei sechssachsigen Gelenkrobotern zur Handhabung des Wickelwerkzeugs, der sogenannten Wickelhand. Die Wickelhand führt das HTS-Band aus einer Vorratsspule zu und regelt die Wickelspannung.

Die Programmierung der Roboter für das Wickeln nicht planarer Spulen über einen digitalen Zwilling erfordert die Festlegung der Bahn, der Drehung und der Neigung der Wickelhand entsprechend der spezifischen Form der zu wickelnden Spule. Es wurden erfolgreich Wickeltests für eine superellipsenförmige Spule mit aufgestellten Enden durchgeführt (Abbildung 1). Dabei wurden wertvolle Erkenntnisse zur Gestaltung des Wickelkörpers für eine



Abb. 1: Testwicklung einer Spule mit aufgestellten Wickelköpfen auf einem superellipsenförmigen Wickelkörper.

nicht planare Spule gewonnen. Basierend auf diesen Vorarbeiten, wird die Herstellung der ersten nicht planaren Spule vorbereitet. Diese Spulenform ist die erste in einer Reihe von zunehmend komplexeren Designs, die mit den Robotern gewickelt werden sollen. Ziel ist es, ein flexibles Roboterprogramm zu entwickeln, das in der Lage ist, eine Vielzahl von nicht planaren Spulenformen zu wickeln.

KÜHLKONZEPT: THERMOSIPHON MIT KRYOKÜHLER

Der Temperaturbereich zwischen 20 und 30 K ist für eine Vielzahl technischer Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) relevant. Außerdem siedet der zukünftig wichtige Energieträger Wasserstoff in diesem Bereich, nämlich bei 21 K.

Daher ist es notwendig, diesen Temperaturbereich für Experimente und Untersuchungen möglichst einfach und effizient bereitzustellen. Aufgrund des weiter gestiegenen Preises von Flüssighelium ist hier die trockene Kühlung mit Kryokühlern erste Wahl. Im Gegensatz zur üblichen Anbindung eines Testobjekts an den Kryokühler über Wärmeleitung durch massives Kupfer soll bei dieser Anlage die Ankopplung über einen Thermosiphon untersucht werden. Ein Thermosiphon (englisch: Heatpipe) besteht prinzipiell aus einem Verdampfer (am zu kühlenden Objekt), einem Kondensator (am Kaltkopf des Kryokühlers) und einem Verbindungsrohr oder -schlauch zwischen beiden. Dieses geschlossene System enthält eine geringe Menge eines Kryogens (hier Neon), das im gewünschten Temperaturbereich siedet. Durch den Stoffstrom und die Phasenübergänge des Neons am kalten und warmen Ende erfolgt eine äußerst effektive Wärmeabfuhr. Nachdem 2023 der



Abb. 2: Thermosiphon-Teststand mit Kryostat und Kryokühler (links), Messrack (Mitte) und PC mit Lab-View-Messprogramm (rechts).

Aufbau des Thermosiphon-Versuchstandes fertiggestellt wurde (Abbildung 2), erfolgte 2024 dessen erfolgreiche Inbetriebnahme im Rahmen einer Masterarbeit.

Dabei wurde die Heatpipe gezielt an die Systemgrenzen gefahren und deren Stabilität und Resilienz getestet. Hierzu wurde eine Matrix von Wärmelasten an Kondensator und Verdampfer aufgeprägt. Es zeigte sich, dass bis zu 130 W ohne Probleme sicher stationär abgeführt werden können. Dies entspricht der Kühlleistung des Kryokühlers bei 28 K. Im anderen Extrem – nämlich ohne Wärmelast – friert das System dagegen ein: Das Neon-Inventar wird fest (Abbildung 3: Abkühlprotokoll des Thermosiphon-Teststandes). Nach der Kondensation erster Neon-Tropfen entsteht nach einiger Zeit ein Flüssigkeitsspiegel. Die volle Kühlleistung führt zum Erstarren des Neons (circa 10:40). Danach wurde das System mit unterschiedlichen Wärmelasten an Kondensator und Evaporator un-

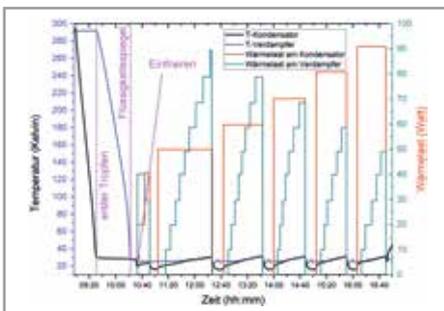


Abb. 3: Abkühlprotokoll des Thermosiphon-Teststandes. Nach der Kondensation erster Neon-Tropfen entsteht nach einiger Zeit ein Flüssigkeitsspiegel. Die volle Kühlleistung führt zum Erstarren des Neons (circa 10:40). Danach wurde das System mit unterschiedlichen Wärmelasten an Kondensator und Evaporator untersucht.

tersucht. Eine Wärmeabfuhr ist in diesem Zustand nicht mehr möglich. Um das Einfrieren zu vermeiden, wurde erfolgreich eine Heizung mit PID-Temperaturregelung am Verdampfer implementiert. Diese verhindert zuverlässig das Einfrieren und sichert so die Wärmeabfuhr.

SONDERFORSCHUNGSBEREICH HYPERION

Die Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) ist die chemisch spezifischste Methode zur Gewinnung detaillierter Informationen über die Molekularstruktur.

Der Sonderforschungsbereich 1527-HyPERION befasst sich mit grundlegenden Herausforderungen zur Verbesserung der NMR-Spektroskopie in einem stark interdisziplinären Projekt.

Ein Schwerpunkt von HyPERION ist die Miniaturisierung von NMR-Systemen, um kompakte NMR-Tischlösungen zu entwickeln. Dies beinhaltet die Verkleinerung verschiedener Komponenten einschließlich des NMR-Magneten, der Ausgleichsspulen, des kryogenen Systems und anderer wesentlicher Elemente.

Im Arbeitspaket „Kompakte supraleitende Hochfeldmagnete“ ist das Ziel, einen kompakten Magneten zu entwerfen und zu bauen, der ein starkes, homogenes Magnetfeld erzeugen kann, das für die NMR-Spektroskopie „auf dem Tisch“ geeignet ist.

Es wurde ein konzeptioneller Entwurf für ein solches Magnetsystem entwickelt. Der

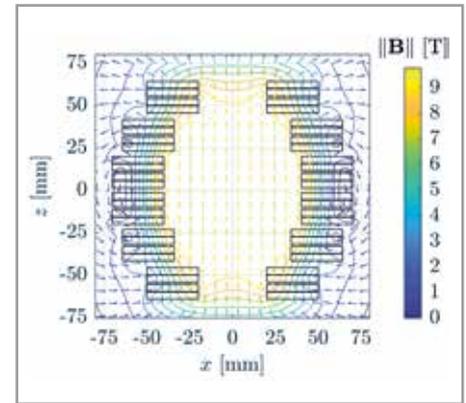


Abb. 4: Magnetfeld B in der Querschnittsebene des HyPERION-Magnetentwurfs (die z-Richtung entspricht der Symmetrieachse).

Magnet besteht aus sechs Spulenmodulen, die jeweils zwei Doppel-Pancake-Spulen enthalten (Abbildung 4). Die Module sind so angeordnet, dass die Inhomogenität des Magnetfelds in der Mitte der Bohrung minimiert wird. Der Bau eines Spulenprototyps für diesen Magneten wird vorbereitet.

EU-PROJEKT MEESST

Das EU-Projekt MEESST (Magnetohydrodynamic Enhanced Entry Systems for Space Transportation, Fördernummer 899298) konnte 2024 erfolgreich abgeschlossen werden. Zu Beginn des Jahres wurden im Plasmakanal des Von Karman Instituts für Fluidodynamik (VKI, Belgien) noch Experimente zum Nachweis der Abschwächung des Radio-Blackouts mittels magnetohydrodynamischer Effekte durchgeführt. Der vom ITEP mit HTS-Bändern der Firma THEVA robotisch gewickelte Magnet und das von Absolute Systems konzipierte Kühlsystem funktionierten bei den Experimenten weiterhin stabil, jedoch wurden beim finalen Experiment, bei dem die Plasmakammer des VKI auf mehrere 100 °C aufgeheizt wurde, die Daten- und Stromkabel in der Plasmakammer irreparabel beschädigt.

Bevor der Magnet und das Kryosystem für Hitzeabschirmungsexperimente an das Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) der Universität Stuttgart gebracht werden konnten, mussten daher neue Kabel mit hitzebeständiger Isolation gefertigt werden. Das Kryosystem mit dem MEESST-Magneten und die Mess- und Steuerelektronik wurden in Zusammenarbeit mit Absolute Systems im PWK1-Windkanal des IRS instal-



Abb. 5: MEESST-Magnet und Kryostat während der Installation im PWK1-Plasmakanal des IRS.

liert und in Betrieb genommen (Abbildung 5). Auch am IRS funktionierte der MEESST-Magnet problemlos, sodass über einen Zeitraum von mehreren Wochen zahlreiche Experimente durchgeführt werden konnten. Wie bereits bei den Experimenten am VKI konnten die Datenerfassung und Magnetsteuerung sowohl vor Ort als auch ferngesteuert vom KIT aus durchgeführt werden, sodass die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ITEP jederzeit Hilfestellung geben konnten.

Die am IRS durchgeführten Plasmaexperimente (Abbildung 6) zeigten eindrucksvoll, dass die Hitzeabschirmung mit zunehmendem Magnetfeld besser wird. Bei Plasmabedingungen, die dem Wiedereintritt unter mondähnlichen Bedingungen entsprechen,

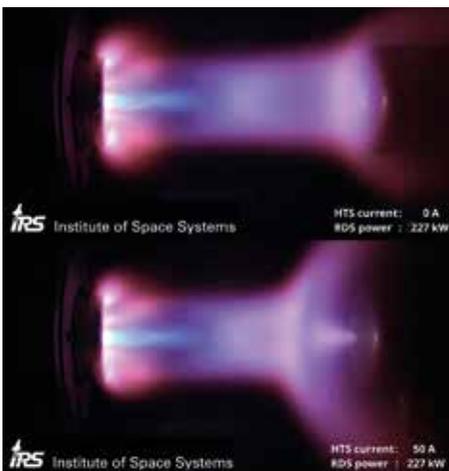


Abb. 6: Schnittbild des Plasmaexperiments am IRS ohne Magnetfeld/Spulenstrom (oben) und bei einem Spulenstrom von 50 A (unten). Der Kryostat mit dem Magneten ist rechts zu sehen.

konnte beim maximalen Spulenstrom von 50 A ein Abschirmungseffekt von 36 % beobachtet werden, während die Abschirmung unter Mars-ähnlichen Bedingungen sogar 83 % betrug. Die im Rahmen des Projekts von Partnern durchgeführten Simulationen konnten die beobachteten Änderungen in der Stoßdistanz der Schockwelle sowie einen Tunneleffekt in Richtung Magnetachse erfolgreich reproduzieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Die MEESST-Sonde hat ihre Relevanz durch erstaunliche Ergebnisse unter Beweis gestellt, auch wenn noch weitere Studien notwendig sind, um die Technologie voranzutreiben, zum Beispiel für Tests unter flugrelevanten Bedingungen.

SHIP-PROJEKT

Unentdeckte Teilchen, die über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen, sind entweder sehr schwer oder gehören zu einer Klasse, die als schwach wechselwirkende Teilchen (Feebly Interacting Particles – FIPs) bezeichnet werden und nur sehr schwach mit bekannten Teilchen wechselwirken. Das Experiment „Search for Hidden Particles“ (SHiP) am CERN ist ein Allzweckexperiment zur Suche nach FIPs. Im Jahr 2024 wurde der Bau von SHiP in der Hochintensitäts-Strahlendump-Anlage im CERN-ECN3-Experimentierbereich genehmigt und soll 2032 in Betrieb gehen.

Die Protonenstrahlen des Super-Protonen-Synchrotrons (SPS) werden auf ein festes Ziel gerichtet und erzeugen Teilchenschauer, die FIPs enthalten können. Um den Nachweis von FIPs zu ermöglichen, müssen alle stark oder elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen aus dem Teilchenschauer entfernt werden, bevor dieser das Detektorsystem erreicht. Dies wird durch die Installation eines Hadronenabsorbers und einer Myonenabschirmung zwischen dem Strahltarget und dem Detektorsystem erreicht.

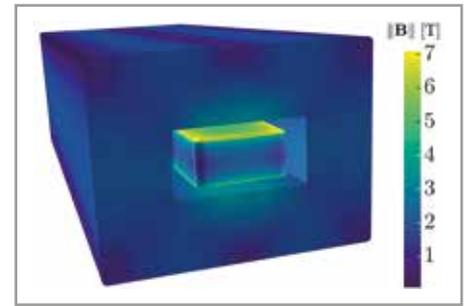


Abb. 7: 3D-Ansicht der Magnetfeldstärke B im supraleitenden SHiP-Myonenschildmagnetsystem (HTS-Spulensystem mit Eisenkern und äußerem Eisenjoch; laut aktuellem Konzeptentwurf).

Im Jahr 2024 hat sich das ITEP dem SHiP-Projekt angeschlossen, um einen HTS-Magneten für den Myonenschild zu entwickeln. Dieser Magnet soll Myonen vom Detektorvolumen ablenken. Die Arbeiten befinden sich derzeit in der Konzeptionsphase, wobei der aktuelle Magnetentwurf in Abbildung 7 dargestellt ist. Die Länge des 5-Tesla-Magneten beträgt 7 m bei einer Breite von 1 m und einer Höhe von 0,6 m. Der Magnet wäre damit einer der größten HTS-Magnete weltweit.

Um neue Wicklungs- und Fertigungstechnologien für den SHiP-Myonenschildmagneten zu entwickeln und zu testen, sind eine Reihe von Test- und Prototypspulen geplant.

Kontakt: Frank.Hornung@kit.edu

HOCHSTROMKOMPONENTEN FÜR DIE FUSION UND FÜR FLÜSSIGWASSERSTOFF

Im Forschungsthema Hochstromkomponenten für Wasserstoff und Fusion wurde 2024 weiter in nationalen und europäischen Projekten gearbeitet. Für die Fusion wurde im Rahmen von EUROfusion an einer Probe zur Untersuchung des Quenches in Hochtemperatursupraleitern in Hochstromkabeln für die Fusion gearbeitet, für Wasserstoffanwendungen im Rahmen des Wasserstoffleitprojektes TransHyDE an der kombinierten Übertragung von Flüssigwasserstoff und elektrischer Energie per supraleitendem Kabel.

EUROFUSION-QUENCH IN HTS

Nach mehreren fehlgeschlagenen Reparaturversuchen einer Leckage in der Sensor-

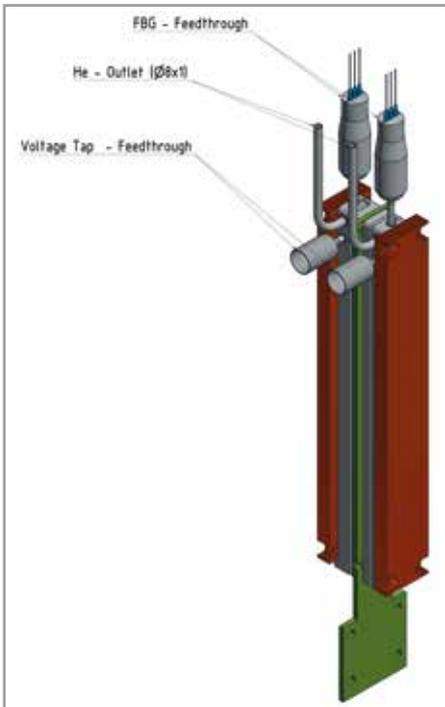


Abb. 8: CAD-Modell des überarbeiteten oberen Kontakts der SULTAN-Probe.

durchführung am oberen Kontakt der SULTAN-Probe wurde dieser Bereich neu überarbeitet. Hierfür wurden die zwei Kontakthalbschalen neu konstruiert und gefertigt (Abbildung 8). Anstatt einer stirnseitigen Sammeldurchführung wurden in der überarbeiteten Version getrennte Durchführungen für Spannungsabgriffe und Glasfaserthermometer eingeführt. Dies reduziert die Komplexität jeder einzelnen Durchführung auf ein gesichert händelbares Niveau. Hierfür werden in Absprache mit dem Betriebspersonal der SULTAN-Testeinrichtung in Villingen (CH) die Spannungsdurchführungen in radialer Richtung aus der Probe geführt.

Zur Durchführung der Reparatur wurden die oberen 450 mm jedes Beins vorsichtig rückgebaut und aufgetrennt. Hierfür musste die Probe komplett zerlegt und die einzelnen Beine ins Technikhaus gebracht werden. Beim Rückbau war besonders wichtig, dass alle Drähte und Kapillaren innerhalb der Probe nach dem Abtrennen der vergossenen Probenteile eine ausreichende Länge behalten. Anschließend konnte der Kontakt entlötet und der Leiter für das erneute Einlöten in den überarbeiteten Kontakt vorbereitet werden. Parallel zu diesen Arbeiten wurden die Edelstahl- und Kupferkomponenten des neuen Kon-



Abb. 9: Foto des Stands der Reparatur Ende 2024. Nachfolgend müssen die Drähte (oben) entfernt und durch Glasfasern ersetzt werden. Die Drähte dienen zur Vermeidung einer Verunreinigung der Kapillaren.

takts gefertigt und unter Vakuum hart miteinander verlötet. Nach dem Einlöten des Leiters in die neue Kontakthalbschale konnte mit der erneuten Konfektionierung der Spannungsabgriffe begonnen werden. Stand Januar 2025 sind die Spannungsab-

griffe beider Beine vollständig konfektioniert (Abbildung 9). Nachdem die Glasfasern in die neuen Durchführungen eingefädelt wurden, kann der Kontakt mit der zweiten Halbschale verschweißt werden. Nach der erneuten Montage der Probenklammer für den mechanischen Support ist die Reparatur beendet.

TRANSHYDE-PROJEKT APPLHY! – TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE EINER HYBRIDEN PIPELINE

Das Projekt ApplHY! befasst sich mit der Nutzung und der Übertragung von Flüssigwasserstoff (LH2). In diesem Zusammenhang untersuchen wir die synergetische Übertragung vom LH2 und Strom per Hochtemperatursupraleiter in einer gemeinsamen hybriden Pipeline. Eine der Hauptforschungsfragen lautet: Unter welchen Bedingungen kann eine hybride Pipeline günstiger als konventionelle Alternativen sein? Um diese Frage zu beantworten, sind nicht nur die Kosten für den Bau und den Betrieb der hybriden Pipeline relevant. Genauso entscheidend sind der Kontext und die Kosten für alle weiteren Systemkomponenten, die für die Übertragung beider Energieträger erforderlich sind.

An der deutschen Nordseeküste wird voraussichtlich ein großer Bedarf an neuer Infrastruktur für die Übertragung von elektri-

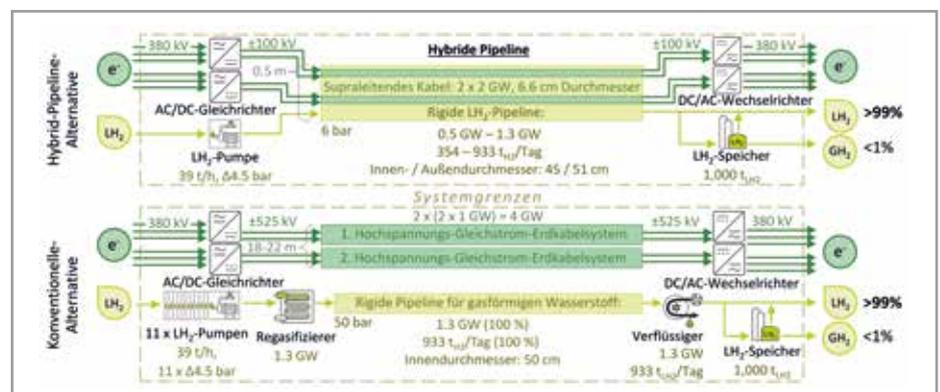


Abb. 10: Detaillierte Konfiguration für den techno-ökonomischen Vergleich einer hybriden Pipeline mit einer konventionellen Alternative über 75 km Länge für den Fall, dass Flüssigwasserstoff (LH2) am Endpunkt benötigt wird.

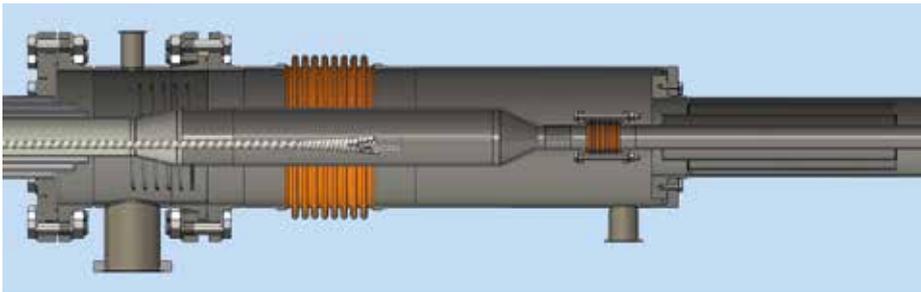


Abb. 11: Abschlussstelle des Demonstrators der hybriden Pipeline an den Endverschluss.

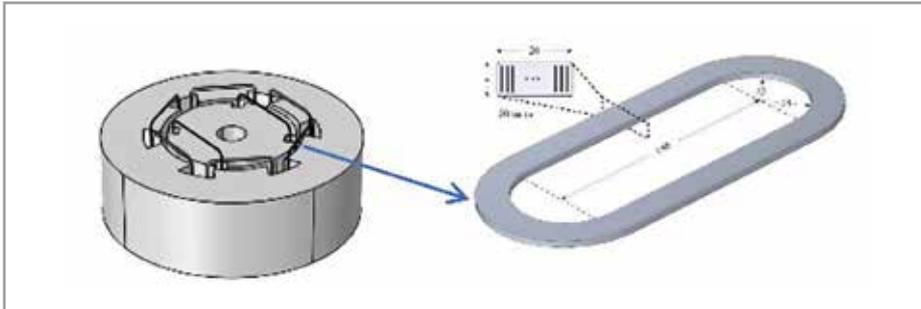


Abb. 12: Spulendesign und ein Beispiel für die Homogenisierung einer Rennbahnschleife.

scher Leistung und Wasserstoff entstehen. Aufgrund der potenziellen hohen Nachfrage nach Flüssigwasserstoff in Ballungszentren wie Hamburg wäre es sinnvoll, den über Häfen per Tankschiff importierten Flüssigwasserstoff auch in flüssiger und nicht nur in gasförmiger Form zu den Anwendern zu liefern. Für diese Fallstudie wurden die Systemgrenzen wie in [Abbildung 10](#) definiert.

Wir vergleichen zwei Übertragungsalternativen: die hybride Pipeline und eine konventionelle Alternative, bestehend aus Hochspannungs-Gleichstrom-Erdkabeln und einer Pipeline für gasförmigen Wasserstoff. Die benötigten Komponenten sowie die technischen Details sind in [Abbildung 10](#) dargestellt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass unter diesen Annahmen die Investitionskosten für die hybride Pipeline rund halb so hoch wie für die konventionelle Alternative sein können. Die Betriebskosten sowie weitere Konfigurationen werden im weiteren Projektverlauf untersucht. Eine zweite Fallstudie betrachtet zudem gasförmigen Wasserstoff als Endprodukt. Aktuell ist hier der Investitionskostenunterschied zwischen den Alternativen deutlich geringer.

TRANSHYDE-PROJEKT APPLHY! – REALISIERUNG EINES DEMONSTRATORS FÜR DIE HYBRIDE PIPELINE

Eine Schlüsselrolle bei der Realisierung des Hybride-Pipeline-Demonstrators ist der Anschluss des supraleitenden Kabels und der LH₂-Pipeline an den Endverschlüssen. Dort muss in dem begrenzten Bauraum zunächst das supraleitende Kabel mit geringem Kontaktwiderstand mit den Leitern der Endverschlüsse verbunden und elektrisch isoliert werden. Dazu wird für die Kontaktierung eine Schraubverbindung eingesetzt, die einfach im Versuchsfeld zu realisieren ist. Anschließend gilt es, die Flüssigwasserstoffleitung entsprechend den Anforderungen der Druckgeräterichtlinie zu schließen. Hierfür wurde das Design dahin gehend optimiert, die Pipeline ausschließlich unter Verwendung von Reduzierstücken, Normteilen und Normschweißungen nach dem AD2000-Regelwerk schließen zu können. Abschließend ist der Vakuummantel zur thermischen Isolation herzustellen; dieser wird durch ein glockenförmiges Bauteil realisiert. [Abbildung 11](#) zeigt ein CAD-Modell des Kontaktstellenkonzeptes.

Kontakt: Michael.Wolf@kit.edu

ROTIERENDE MASCHINEN

SUPRALEITENDE GENERATOREN

Im Projekt SupraGenSys 2 (Start 1. April 2024) wird ein skalierter 250-kW-Generator auf Basis des optimierten 10-MW-Voll-HTS-Generators als Demonstrator entwickelt und unter Laborbedingungen aufgebaut. Damit knüpft das Projektvorhaben nahtlos an das Vorläuferprojekt SupraGenSys an. Ziel ist es, die erarbeiteten Ergebnisse anhand eines Prüfaufbaus im Labor zu validieren, die Funktion zu demonstrieren und die Erkenntnisse weiter zu vertiefen.

Die AC-Verluste in der Maschinenwicklung eines Voll-HTS-Generators sind abhängig von den Radial- und Tangentialfeldern, die die Leiter durchdringen. Das bedeutet eine starke Abhängigkeit der AC-Verluste vom geometrischen Maschinenbau. Daher wurde eine Analyse der „Endeffekte“ des Eisenkerns auf die AC-Verluste der supraleitenden Spulen mithilfe einer 3D-Simulationen in homogenisierter T-A-Formulierung durchgeführt. [Abbildung 12](#) zeigt das Spulendesign und ein Beispiel für die Homogenisierung einer Rennbahnschleife.

Ein anderes Konzept wird im Projekt „Speedy-HTS“ (Start 1. Oktober 2023) verfolgt: Ein mittelschnell laufender Getriebegenerator für Windkraftanlagen mit supraleitendem Rotor und ölgekühltem Hochstromstator wird entwickelt, gebaut und getestet. Dazu wird der Permanentmagnetrotor eines vorhandenen Generators durch einen supraleitenden Rotor mit 24 Doppel-HTS-Spulen (Pole) ersetzt. Es wurde eine detaillierte Konstruktion des supraleitenden Rotors, bestehend aus einem drehbaren Kryostaten, dem Rotor mit 24 Doppelspulen, der mechanischen Abstützung dieser Spulen sowie deren elektrischer und kryotechnischer Versorgung, mithilfe eines Neon-Thermosiphons und eines Cu-Kaltbusses erstellt ([Abbildung 13](#)).

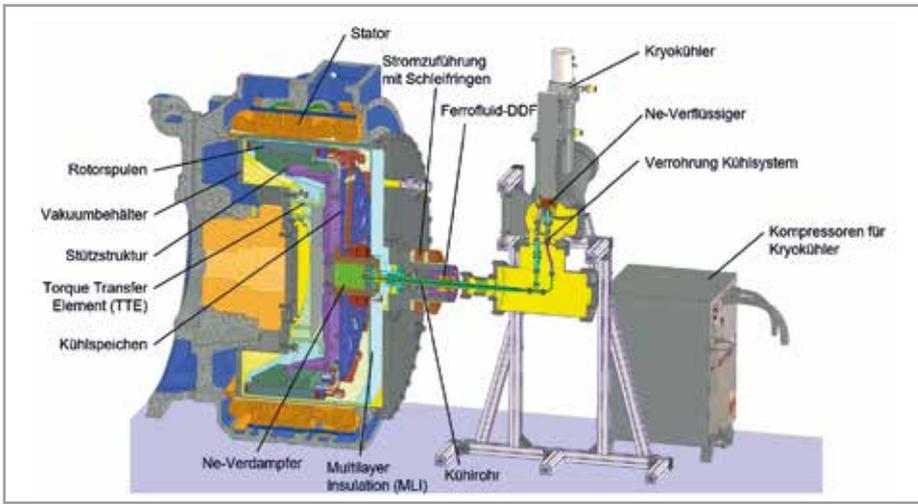


Abb. 13: Konzept des mittelschnell drehenden Generators mit supraleitendem Rotor (Version für den Teststand).

Aufgrund des engen Bauraums wurde ein Windowframe-Spulendesign festgelegt. Mögliche HTS-Lieferanten konnten durch eine durchgeführte Marktanalyse hinsichtlich technischer Spezifikation, Verfügbarkeit und Preis der benötigten HTS-Bandleiter identifiziert werden. Eine ITEP-Entscheidungsvorlage zu Eigenschaften von supraleitenden Spulen, Vor- und Nachteilen in Wicklung und Generatorsystem führte zur Festlegung auf unisolierte 12 mm breite HTS-Bandleiter und eine sogenannte NI-Wickeltechnik (NI = nicht isoliert).

Ein als Abbruchkriterium definierter Meilenstein, in dem eine konzeptionelle Problemlösung zur doppel-konzentrischen Durchführung von Pitch-Steuerung und Rotor-Kryoversorgung/-Elektrik erarbeitet werden musste, konnte durch eine vom ITEP erstellte neuartige technische Lösung erfüllt werden. Dieser Innovation ist als Patentanmeldung eingereicht. An einer berührungslosen Übertragung zum Beispiel der Temperturmesswerte wird derzeit gearbeitet.

DUDA (DISK UP-DOWN ASSEMBLY)-SPULEN

Simulationsvarianten von DUDA-Spulen haben gezeigt: Sie können ein starkes Magnetfeld mit akzeptablen AC-Verlusten erzeugen. Die Verluste wurden anhand der Daten der kritischen Ströme verschiedener Hersteller berechnet, wobei deren Leistung bei einer Betriebstemperatur von 30 K berücksichtigt wurde (Abbildung 14).

Mit größerem Strom steigen die AC-Verluste. Eine Frequenzerhöhung würde die AC-Verluste weiter erhöhen.

Die Abmessungen der Spule, insbesondere die Breite des Strompfades w_s und die Größe der Bohrung b , haben einen erheblichen Einfluss auf die Verluste. Eine größere Bohrung kann die AC-Verluste reduzieren (Abbildung 15.)

Es wurden erste Magnetisierungstests bei 77 K an einen Stapel aus fünf DUDA-HTS durchgeführt, um die Spulensuszeptibilität bezüglich eines externen Magnetfeldes zu untersuchen.

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Wechselstromquelle und einem Hochgeschwindigkeits-Datenerfassungssystem. Der Winkel des externen Magnetfeldes zur

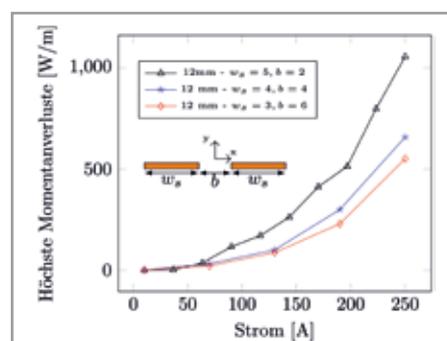


Abb. 15: AC-Verluste von rechteckigen DUDA-Spulen, aufgetragen über dem Strom (50 Windungen, 50 Hz, 30 K, beispielhaft für HTS des Herstellers Faraday). Drei verschiedene Varianten der Spulenbeinbreite w_s und der Bohrung b bei einer Gesamtbreite von 12 mm sind dargestellt.

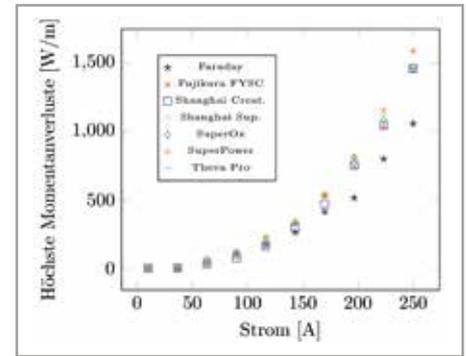


Abb. 14: Abhängigkeit der AC-Verluste in rechteckigen DUDA-Spulen über dem Betriebsstrom (verschiedene Leiterhersteller bei $f=50$ „Hz“ und $T=30$ „K“).

Ebene des DUDA-Stapels kann in Schritten von 10° variiert werden (Abbildung 16).

SUPRALEITENDE MOTOREN MIT HTS-STAPELN

Erstmals werden seit diesem Jahr supraleitende Käfigläufermotoren untersucht.

Analytische und numerische Analysen werden durchgeführt, und die experimentellen Arbeiten befinden sich in der Vorbereitung. Das Konzept nutzt im Rotor kurzgeschlossene DUDA-Stapel, die mittels Wärmeleitung auf eine Betriebstemperatur von circa 30 bis 80 K gekühlt werden. Das antizipierte Magnetfeld im Luftspalt liegt bei circa 0,8 T.

Die weiteren Arbeiten sollen in einer Partnerschaft mit dem KIT ETI und der Fraunhofer-Gesellschaft weiterverfolgt werden.

Im Rahmen einer Industriekooperation entwickelt das ITEP vollsupraleitende Motoren mit geringen Abmessungen und hohem Drehmoment. Dazu wird ein Voll- oder Teil-DUDA-Wicklungssystem verfolgt.

Kontakt: Marion.klaeser@kit.edu



Abb. 16: Aufbau zur winkelabhängigen AC-Magnetisierungsmessung an DUDA-Spulen.

Highlight

Erfindung eines Konzepts für die zentrale Pitch-Rohrdurchführung in HTS-Windkraftgeneratoren

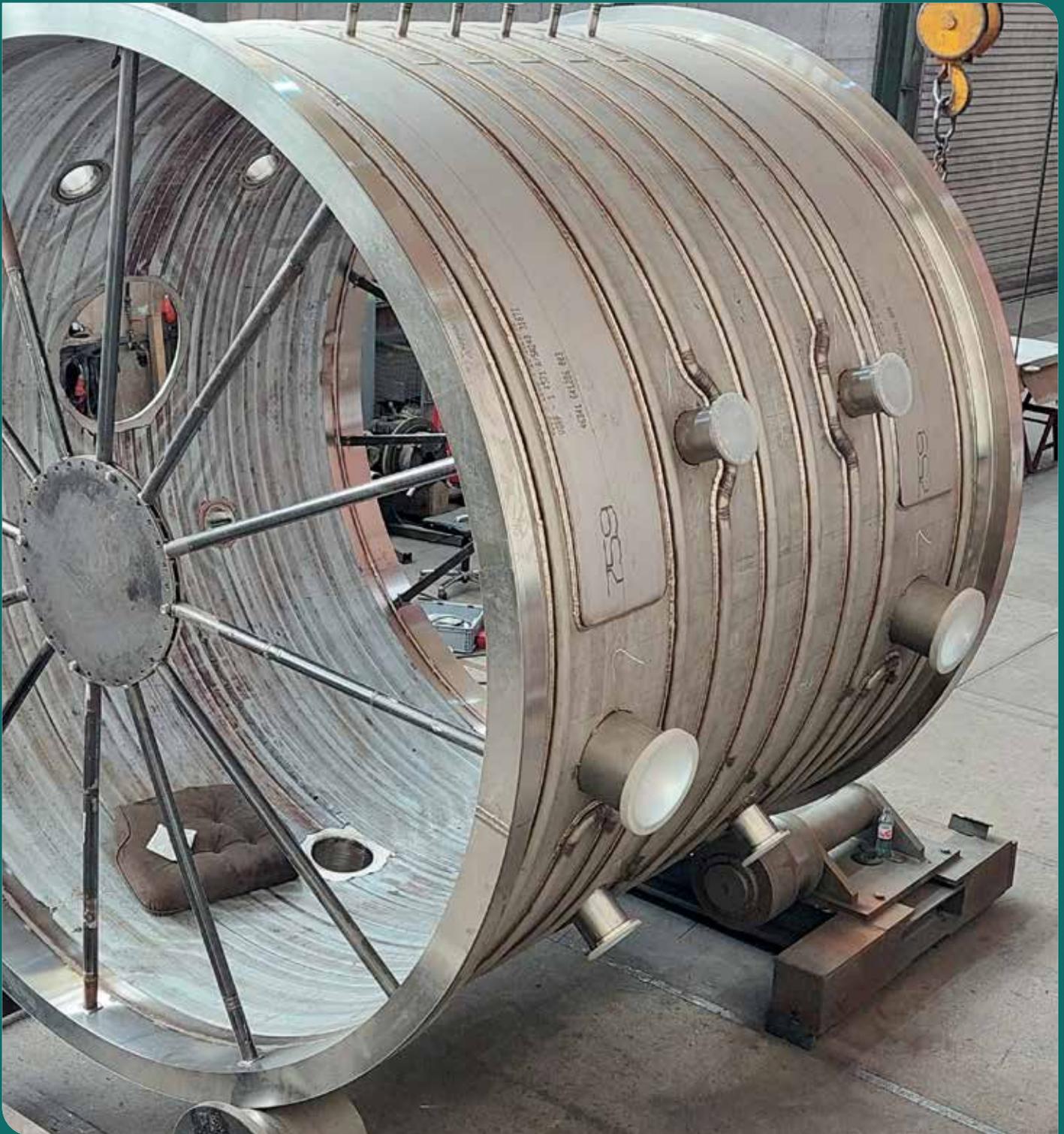
Im Forschungsprojekt „Speedy_HTS“ (Entwicklung einer HTS-Teststandmaschine im Gehäuse eines konventionellen Generators) war für den Sommer 2024 ein Abbruchmeilenstein gesetzt: die Entwicklung einer konzeptionellen Lösung für die zentrale Durchführung eines Steuerrohres (Rotationsgeschwindigkeit circa 11 Upm) durch den kryokalten HTS-Rotor (Rotationsgeschwindigkeit circa 600 Upm) des Windkraftgenerators bei Integration des stationären Kühlsystems und Durchführung des kryogenen Kältemittels. Da die Symmetrieachse eines Windkraftgenerators um circa 8° geneigt ist, ergibt sich die zusätzliche Herausforderung, das kryogene Kühlmittel den entsprechenden Höhenunterschied überwinden zu lassen. Diese Problematik ist seit mehr als 20 Jahren nicht zufriedenstellend gelöst. Das Team konnte aber – bereits vor Beginn der Projektarbeiten – eine Lösung skizzieren und weiterentwickeln, die den Abbruchmeilenstein erfüllte und Ende 2024 zum Patent angemeldet wurde.

Vorteilhaft ist weiterhin, dass mit dieser technischen Lösung beide Wellenenden einer rotierenden Maschine für die freie Nutzung in der Anwendung frei werden.



Abbildung 17: Antriebsseite (Getriebeseite) eines mittelschnell laufenden Windkraftgenerators mit zentraler Durchführung für die Blattverstellung („Pitch-Rohr“) der Windkraftanlage. Dieses Pitch-Rohr muss im finalen Produkt auch durch einen HTS-Rotor durchgeführt werden können – die Erfindung erlaubt das. Das Bild zeigt das Gehäuse der konventionellen Maschine (Fa. Flender/Winergy).

Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Der zentrale Teil des neuen Versuchsbehälters der Anlage DIPAK während seiner Herstellung. DIPAK wird dem Testen von Komponenten des inneren Brennstoffkreislaufs dienen.

Vakuum- und Fusionstechnologie

Koordination: Dr.-Ing. Thomas Giegerich

Im Forschungsfeld „Vakuum- und Fusionstechnologie“ arbeitet das ITEP an der Entwicklung neuartiger Technologien und Prozesse, um zukünftige Fusionskraftwerke Realität werden zu lassen. Des Weiteren finden allgemeine Arbeiten im Bereich der Vakuum- und Kryovakuumtechnik statt, insbesondere um andere Forschungseinrichtungen und auch die Industrie zu unterstützen. Ein zentrales Großprojekt in diesem Forschungsfeld ist der Bau und der Betrieb einer Test- und Entwicklungsplattform für den Brennstoffkreislauf von Fusionskraftwerken.

TECHNOLOGIEN DES FUSIONS-BRENNSTOFFKREISLAUFS

Der Brennstoffkreislauf ist unter anderem für das Bereitstellen und das Zuführen des für die Fusionsreaktion (die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium werden zu Helium umgesetzt) benötigten Brennstoffs zuständig sowie für das Aufrechterhalten des benötigten Vakuums im Reaktorgefäß. Aus Sicht des Brennstoffkreislaufs sind die vielversprechendsten Reaktorkonzepte (Tokamaks und Stellaratoren), die sich zurzeit in Entwicklung befinden, sehr ähnlich, aber eben nicht gleich: Stellaratoren arbeiten mit sehr langen Phasen, in denen das Plasma brennt. Dies kann zu einem Ansammeln von Verunreinigungen im Reaktionsgemisch führen, was wiederum den Betrieb des Plasmas unmöglich macht. Dieser Effekt wurde begonnen zu untersuchen mittels plasmaphysikalischer Berechnungen und des Erstellens und Anwendens eines neuen Codes, der es erlaubt, neue Brennstoffkreislaufarchitekturen schnell und quantitativ zu untersuchen. Diese Arbeiten sind Bestandteil des Projekts SyrVBreTT (Synergie-Verbund Brennstoffkreislauf Tritium Technologien), an denen die oben genannten Arbeiten zusammen mit einem Industriepartner (Gauss Fusion) und anhand eines konkreten Beispiels (des GIGA-Reaktorkonzepts von Gauss-Fusion, einer Maschine mit circa 3 GW thermischer und 1 GW elektrischer Leistung) durchgeführt werden.

Im Rahmen eines weiteren Projekts, KaLiAS (Karlsruher Lithium-6-Anreicherungs-Strategie), wurde begonnen, ein weiteres, für

den Erfolg der Kernfusion essenzielles Thema zu bearbeiten: die Entwicklung eines Prozesses zur großtechnischen Herstellung von Lithium, das an dem Isotop 6Li angereichert ist. Fusionsreaktoren müssen das als Brennstoff benötigte Wasserstoffisotop Tritium selbst herstellen („erbrüten“), was im Inneren des Reaktors in sogenannten Brutblankets durch Neutronenbestrahlung des oben genannten Lithiumisotops 6Li erreicht wird. Leider kommt es in natürlichem Lithium nur zu wenigen Prozent vor und muss daher bis zu einigen 10 Prozent angereichert werden. Hierfür wurde am KIT der sogenannte ICOMAX-Prozess entwickelt, der nun im Rahmen von KaLiAS zur Anwendungsreife weiterentwickelt werden soll. Hierzu gehören neben einer detaillierten Prozessmodellierung auch die Entwicklung und die Qualifikation des zugehörigen Prozessequipments.

Ein weiterer Bereich des Fusionsbrennstoffkreislaufs, bei dem eine Isotopentrennung erforderlich ist, ist das Abtrennen des unerwünschten Wasserstoffisotops Protium aus dem Abgas des Fusionsreaktors. Hierfür wurde ein Prozess namens Tempera-



Abb. 1: Funktionelle Materialien mit unterschiedlichem Absorptionsvermögen für die drei Wasserstoffisotope.

ture-Swing-Absorption (TSA, zu Deutsch: Temperaturwechselabsorption) entwickelt. Dieser Prozess erfordert das Vorhandensein spezieller Materialien (Abbildung 1), die die Wasserstoffisotope Protium, Deuterium und Tritium unterschiedlich stark absorbieren. Die Entwicklung dieser Materialien sowie deren Charakterisierung wurden in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner durchgeführt. 2024 konnten diese Materialien hergestellt und vermessen werden (Abbildung 2). Dies stellt die Grundlage dar für die Weiterentwicklung und Skalierung des TSA-Prozesses auf die für ein Fusionskraftwerk benötigte Größe.

Kontakt: Thomas.Giegerich@kit.edu

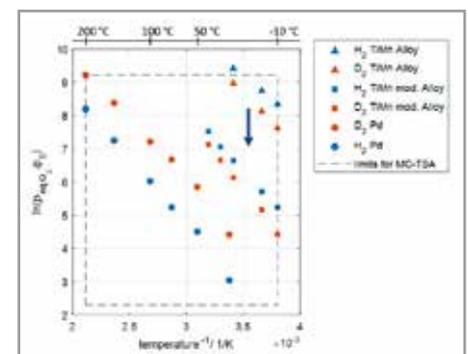


Abb. 2: Gleichgewichtsdrücke für verschiedene Materialien als Funktion der Temperatur.

VAKUUMTECHNOLOGIE UND KRYOVAKUUMTECHNOLOGIE

Für den Brennstoffkreislauf eines Fusionskraftwerkes ist eine kontinuierliche Abtrennung der unverbrauchten Wasserstoffisotope von Fusionsprodukten und Verunreinigungen unabdingbar. Da auch für diese



Abb. 3: Experimentieranlage HERMESloom im finalen Aufbaustadium.

Aufgabe bisher keine technische Lösung existiert, entwickeln wir die sogenannte Metallfolienpumpe (MFP). Diese macht sich das Prinzip der Superpermeation zunutze. Mithilfe eines Mikrowellenplasmas kann Wasserstoff durch eine dünne Niobfolie gelangen und somit ultrarein von allen anderen Gasen abgetrennt werden – selbst gegen Druckgradienten. Auf dem Entwicklungsweg zur MFP wurde nun die nächste Generation von Experimentalaufbauten erforderlich – eine Anlage unter DEMO-relevanten Bedingungen wegen niedrigeren Drucks und unvermeidlicher Magnetfelder. Die dafür entwickelte und 2024 aufgebaute HERMESloom (Abbildung 3) enthält dafür Magnetspulen, die in institutsübergreifender Zusammenarbeit hergestellt wurden (Abbildung 4).

Eine kontinuierliche Aktivität außerhalb der Fusion sind unsere Arbeiten am Kryopumpkonzept für das Einstein-Teleskop (ET) –



Abb. 4: Herstellung der Magnetspulen für HERMESloom am ITEP.

den geplanten europäischen Gravitationswellendetektor der dritten Generation.

Die angestrebte Sensitivität erfordert sehr niedrige Drücke sowie einen extremen Aufwand zum störungsfreien Betrieb von kryogenen Spiegeln im Interferometer. Diese Aufgabe ist nur mit Kryopumpen lösbar, deren Konzeptionierung wir erarbeiten haben (Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt). Alle Pumpen im ET haben etwa

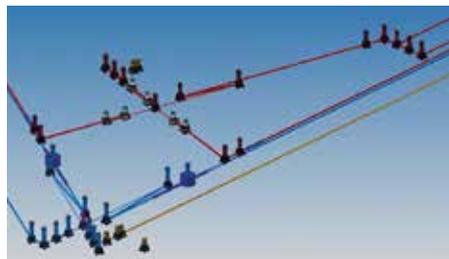


Abb. 5: Ecke des ET-Dreieck-Interferometers mit bereits integrierten Kryopumpen im Detektorlayout (Strahlrohre mit blau verdickten Bereichen).

1.500 m² Pumpfläche und damit einen entsprechend hohen Kältebedarf. Der nun erfolgreich abgeschlossene Zwischenschritt war die simulationsgestützte Voraussage der Wärmelasten auf all diese Kryopumpen, ein schon jetzt für die grobe Kostenabschätzung der Kälteversorgung von ET benötigter Wert. Hier konnten wir einerseits mit den Ergebnissen die signifikante Größe der Investition bestätigen, andererseits aber auch generelle Machbarkeitszweifel ausräumen.

Eine wichtige Rolle bei fast all den durchgeführten Aktivitäten spielt die Modellierung von Gasströmungen durch komplexe Vakuumsysteme, wie sie beispielsweise im Fusionsbrennstoffkreislauf vorkommen. Dies stellt eine große Herausforderung an die Codeentwicklung sowie an die benötigten Rechenressourcen dar. Diese Komplexität ergibt sich aus der Notwendigkeit, Strömungen über mehrere Regimes hinweg zu modellieren, was hochmoderne kinetische Algorithmen wie DSMC- und DVM-Methoden erfordert. Um dies zu bewältigen, wurde am ITEP der robuste DIV-GAS-Rechenprozess entwickelt, der beide Ansätze nahtlos integriert, um genaue Ergebnisse zu liefern.

Im Jahr 2024 wurde eine numerische Studie durchgeführt, um die 3D-Effekte – insbesondere poloidale und toroidale Leckagen – auf die Pumpeffizienz des DEMO-Divertors zu untersuchen (Abbildung 6).

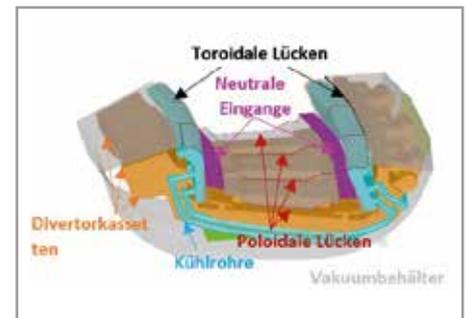


Abb. 6: 3D-Modell des DEMO-Subdivertors.

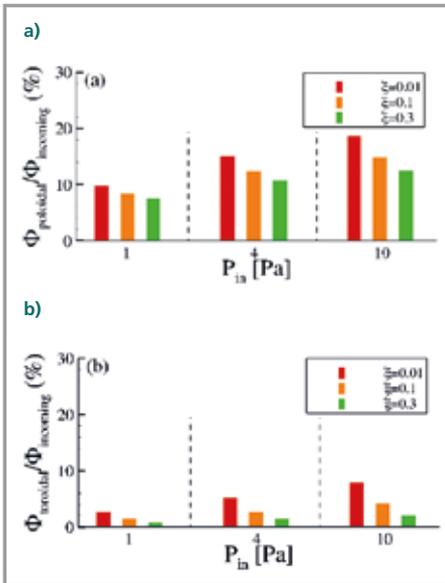


Abb. 7: Prozentualer Anteil des auftretenden Teilchenstroms, der durch die poloidalen (a) und toroidalen (b) Öffnungen entkommt.

Diese Studie nutzte groß angelegte Simulationen auf Hochleistungsrechnern (HPC), darunter Marconi in Italien und HoreKa in Deutschland, um diese komplexen Phänomene zu untersuchen.

Die Analyse ergab mehrere wichtige Erkenntnisse: Die poloidalen Lücken spielen eine entscheidende Rolle für den Wirkungsgrad der Pumpen. Wie in **Abbildung 7a** zu sehen ist, kehren je nach Einlassdruckbedingungen und Pumpszenario (mit variierender Pumpwahrscheinlichkeit ξ) etwa 7 bis 18 % des eintretenden Flusses Φ in die Plasmaregion durch die poloidalen Spalten zurück. Im Gegensatz dazu wurde festgestellt, dass die Wirkung der toroidalen Lücken schwächer ist, wie in **Abbildung 7b** dargestellt. Die Analyse ergab, dass der größte Anteil (60–85 %) des eintretenden Flusses durch die Eintrittsspalte in das Plasmagefäß zurückkehrt, was zwangsläufig dazu führt, dass nur ein geringer Anteil für das Pumpen zur Verfügung steht. Es wird erwartet, dass die oben erwähnten numerischen Ergebnisse einen bedeutenden Einfluss auf die laufen-



Abb. 8: Außenansicht des geplanten DIPAK-Gebäudes.

den Bemühungen zur Verbesserung des DEMO-Divertor-Designs haben werden.

Kontakt: Stefan.Hanke@kit.edu

BRENNSTOFFKREISLAUF ENTWICKLUNGSPLOTTFORM UND INDUSTRIE

DIPAK ist eine integrierte Testplattform zur Validierung der vom KIT entwickelten neuen und hochinnovativen Konzepte zur Minimierung des Tritiuminventars im Brennstoffkreislauf eines Fusionsreaktors. DIPAK steht für „DIR Integrated Development Plattform Karlsruhe“, wobei DIR das am KIT entwickelte „Direct Internal Recycling“-Konzept ist, das unsere Referenz für

die Brennstoffkreislaufarchitektur an Fusionsreaktoren darstellt.

Im Rahmen des Projektes DIPAK werden Komponenten für den Brennstoffkreislauf entwickelt und in Prototypen- oder sogar 1:1-Maßstab getestet. Neben dem neu zu errichtenden Gebäude (**Abbildung 8 und 9**) umfasst das Projekt auch einen zentralen Vakuumbehälter zum Test der Komponenten.

2024 konnte ein Generalplaner für den Bau des DIPAK-Gebäudes beauftragt werden. Der Arbeitsumfang der Generalplanung umfasst neben der Planung des Gebäudes auch die Baubegleitung. Der Beginn der Bauarbeiten ist im dritten Quartal 2025 geplant.

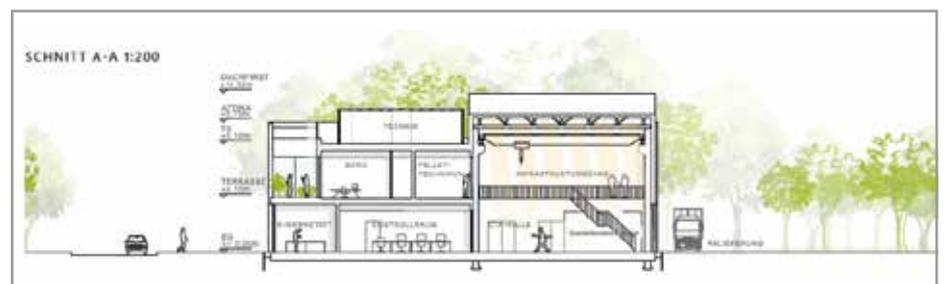


Abb. 9: Schnitt durch das DIPAK-Gebäude; links ist der Werkstattbereich angeordnet, rechts die Versuchshalle.



Abb. 10: Aufnahme aus der Fertigung des Mittelteils des zentralen Vakuumbehälters.

Die Herstellung des zentralen Vakuumbehälters von DIPAK, der den Torus oder den Pumpenschacht des Reaktors repräsentiert, wurde bereits Ende 2023 beauftragt. 2024 konnten wichtige Herstellungsschritte abgeschlossen werden (Abbildung 10). Die Herstellung schreitet schneller voran als ursprünglich geplant. Mit der Lieferung wird daher bereits Mitte 2025 gerechnet.

Die Entwicklung und Herstellung von komplexen Komponenten für den Brennstoffkreislauf wie den Pelletinjektor, der gefrorenen Brennstoff erzeugt und mit einer Geschwindigkeit von circa 1 km/s in die Maschine injiziert, wurden im Jahr 2024 fortgesetzt. So wurde beispielsweise mit der Fertigung der für den Pelletinjektor benötigten Extrudereinheit begonnen. Die Fertigstellung ist für das erste Quartal 2025 geplant.

Der Test des Pelletinjektors soll, bis DIPAK vollumfänglich zur Verfügung steht, in der eigens errichteten Anlage JASON erfolgen. Sie wird gerade im Gebäude 630 auf dem

Campus Nord des KIT aufgebaut. 2024 wurden die Infrastruktur (Elektroinstallation, Gasversorgung) erweitert oder neu gebaut. Die Fertigstellung erfolgt parallel zum Aufbau der Testumgebung für den Pelletinjektor im Jahr 2025.

Kontakt: Volker.Hauer@kit.edu

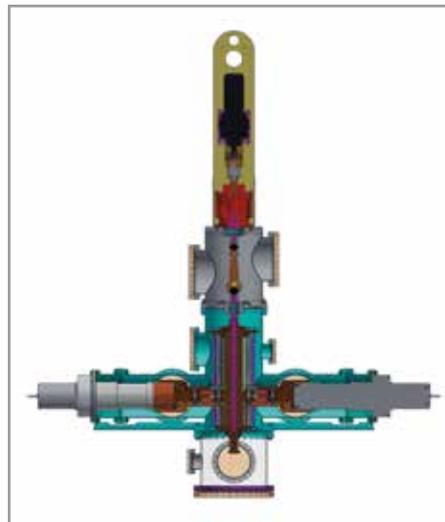


Abb. 11: Design der Extrudereinheit des Pelletinjektors.

Highlight

Nationale Förderprogramme für Arbeiten am Fusionsbrennstoffkreislauf eingeworben

2024 konnten zwei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierte Projekte beginnen, die es dem Institutsbereich Vakuum- und Fusionstechnologie (ITEP-VAK) ermöglichen werden, das Forschungsfeld „Vakuum- und Fusionstechnologie“ deutlich voranzubringen.

Die Möglichkeiten, welche die Fusionstechnologie als nachhaltige Art der Stromerzeugung in Zukunft bieten kann, wurden nun auch durch die Politik erkannt. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat mehrere Ausschreibungen als Bestandteil des Förderprogramms „Fusion 2040“ auf den Weg gebracht. ITEP-VAK war in zwei Anträgen mit einem Gesamtvolumen von circa 5 Millionen Euro erfolgreich (Abbildung 13): KaLiAS (Karlsruher Lithium-6-Anreicherungs-Strategie) und SyrVBreTT (Synergie-Verbund Brennstoffkreislauf Tritium Technologien). Jedes dieser Projekte beinhaltet auch mehrere Industriepartner, die im Rahmen einer sogenannten Public-Private-Partnership (PPP) zusammenarbeiten werden.

Die Genehmigung und der Start dieser Projekte waren ein bedeutender Erfolg für das gesamte Forschungsfeld, da sich dadurch die Möglichkeit ergeben hat, zusätzliches Personal aufzubauen und dadurch sowie durch eine zusätzliche Finanzierung die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Fusionsforschung deutlich zu beschleunigen. Das zusätzliche Personal kommt allen Forschungsthemen zugute, da die Arbeiten in den neuen Projekten gleichmäßig über alle drei Forschungsthemen verteilt sind.

KaLiAS beinhaltet die Weiterentwicklung des am KIT entwickelten ICOMAX-Prozesses zur Lithiumisotopentrennung. Dies ist insofern bedeutsam, da bisher noch kein großtechnischer Prozess zur Herstellung des an dem Lithiumisotop ^6Li hoch angereicherten Lithiums zur Verfügung steht. Dies ist bisher ein großes Risiko für die Fusion im Allgemeinen, da ohne ^6Li nicht das



Abb. 13: Die lange ersehnten Bewilligungsbescheide für die beiden Projekte KaLiAS und SyrVBreTT sind eingetroffen!

für die Fusionsreaktion benötigte Tritium erbrütet werden kann. Dieses Projekt wird überwiegend in dem Forschungsthema „Brennstoffkreislauf-Entwicklungsplattform & Industrie“ bearbeitet, da ein industrieller Prozess entwickelt werden soll und eine Vielzahl experimenteller Arbeiten in dem Quecksilberlabor (HgLab) Karlsruhe durchgeführt werden müssen, das eine Infrastruktur ist, die diesem Forschungsthema angegliedert ist.

SyrVBreTT beinhaltet die Entwicklung eines Brennstoffkreislaufs für ein konkretes Fusionsreaktordesign (des GIGA-Reaktors von Gauss Fusion) sowie Komponenten hierfür. Ein weiterer Bestandteil dieses Projekts ist die Entwicklung von Komponenten allgemeiner Relevanz für Fusionsreaktoren, zum Beispiel die bereits zuvor beschriebene Metallfolienpumpe und der Pelletinjektor. Die in SyrVBreTT durchgeführten Entwicklungen werden in den Forschungsthemen „Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs“ (zum Beispiel Architekturentwicklung des Brennstoffkreislaufs und Schnittstelle zu dem Plasma), Vakuumtechnologie und Kryovakuumtechnik (zum Beispiel Metallfolienpumpenentwicklung) sowie Brennstoffkreislauf-Entwicklungsplattform & Industrie (zum Beispiel Pelletinjektorentwicklung) durchgeführt.

Alle Projekte haben im November (KaLiAS) beziehungsweise Dezember (SyrVBreTT, Abbildung 12) mit einem Kick-Off-Meeting begonnen.



Abb. 12: Kick-Off-Meeting für das SyrVBreTT-Projekt im Dezember 2024.

Preise und Auszeichnungen

2024 wurden für Arbeiten und die Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ITEP die folgenden Auszeichnungen, Würdigungen und Preise verliehen.



Abb. 1: Dr. Nadja Bagrets (4. von rechts)

Foto: Milton Arias

Dr. Nadja Bagrets wurde im September 2024 in Offenbach der IEC 1906 Award für herausragendes Engagement deut-

scher Expertinnen und Experten in der internationalen Normung verliehen. Damit wird das außerordentliche Engagement

von Dr. Nadja Bagrets im internationalen Normungsgremium TC 90 Supraleitung gewürdigt.

Diese Kommission kümmert sich um die Erstellung von Standards für supraleitende Materialien und Komponenten.

Weiterhin wurde **Dr. Nadja Bagrets** 2024 vom IEEE Council for Superconductivity auf der internationalen Konferenz der angewandten Supraleitung ASC 2024 in Salt Lake City mit einem Preis für ihren herausragenden und langjährigen Service als Editor der Zeitschrift IEEE Transaction of Applied Superconductivity ausgezeichnet.

Im September 2024 wurde unser Doktorand **Kai Walter** auf der internationalen Konferenz der angewandten Supraleitung ASC 2024 in Salt Lake City, USA mit dem 3. Platz des „Jan Evetts Awards“ ausgezeichnet. Dabei handelt es sich um einen jährlichen Preis für die beste Publikation eines Nachwuchsforschers in der Fachzeitschrift Superconductor Science and Technology. Damit wird seine Publikation mit dem Titel „Precise determination of oxygen content in $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film samples using x-ray diffraction“ in oben genannte Fachzeitschrift besonders gewürdigt. Kai Walter beschreibt darin ein nicht destruktives Verfahren, in dem die Röntgendiffraktometrie zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts von hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern verwendet wird.



Abb. 2: Kai Walter (rechts) bei der Preisverleihung.

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

Abgeschlossene Doktorarbeiten

Dr. Tim Teichmann

Modellierung und Design einer quecksilbergetriebenen Vakuumpumpe zum Pumpen der Abgase eines Fusionskraftwerks

Für den Betrieb zukünftiger Kernfusionskraftwerke werden Vakuumsysteme von bisher unerreichter Größe und Komplexität benötigt. Gegenwärtig ist der Tokamak der am weitesten fortgeschrittene Reaktortyp. Dessen gepulster Betrieb stellt besondere Herausforderungen an die Auslegung der Vakuumsysteme, da diese einerseits hohen Gaslasten während der Brennphase prozessieren und andererseits sehr niedrige Drücke zwischen den Pulsen gewährleisten müssen. Zusätzliche Anforderungen entstehen durch die Deuterium-Tritium-Reaktion, die zurzeit als vielversprechendste Option für die Energieerzeugung durch Kernfusion auf der Erde gilt. Für diese Reaktion werden die zwei Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium benötigt. Deuterium stellt hier kein Problem dar, da es langzeitstabil und als Ressource hinreichend verfügbar ist. Tritium ist hingegen radioaktiv und aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit nicht natürlich verfügbar; es muss daher künstlich hergestellt werden. Aufgrund der

beschränkter Verfügbarkeit und kerntechnischer Rechtsvorschriften ist es notwendig, das Tritiuminventar von Fusionskraftwerken so gering wie möglich zu halten. Aus diesen Gründen müssen Vakuumpumpentechnologien entwickelt werden, die einerseits hohe Saugvermögen und niedrige Enddrücke bereitstellen und andererseits geringe Tritiuminventare aufweisen. Eine Pumpentechnologie, die diesen Anforderungen gerecht wird, ist die quecksilbergetriebene Diffusionspumpe. Diffusionspumpen stellen eine bereits etablierte Technologie dar, allerdings erfordert ihre Anwendung in neuartigen Abgaspumpensystemen eines Tokamaks eine dedizierte Untersuchung. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, Modelle dieser Pumpen zu entwickeln und diese für die Anwendung im Abgasstrang eines Tokamaks auszulegen und zu optimieren.

Link zur Arbeit: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000175884>



Abgeschlossene Doktorarbeiten

Dr. Jonas Schwenzer

A Process Simulator for the Prediction and Optimization of the Operation of the Fuel Cycle of a Fusion Power Plant

Zukünftige Fusionskraftwerke erfordern den Betrieb mit einem geschlossenen Deuterium-Tritium-Brennstoffkreislauf, um ihren Betrieb aufrechtzuerhalten und radioaktives Tritium sicher einzuschließen. Der Brennstoffkreislauf des in Entwicklung befindlichen Europäischen Demonstrationsreaktors (EU-DEMO) implementiert diese Funktionen in einer dreigliedrigen Architektur. Der gepulste Reaktorbetrieb eines Tokamaks, wie für EU-DEMO vorgesehen, propagiert zwangsläufig auch zum Betrieb dieses Brennstoffkreislaufes, der durch abwechselnde Phasen mit hohen und niedrigen Durchsätzen charakterisiert ist. Das Design des Gesamtsystems und die Integration der verschiedenen Teilkreisläufe erfordern somit auch die Berücksichtigung dynamischer Effekte auf Auslegungskriterien, wie etwa die Verfügbarkeit und Zusammensetzung des Brennstoffgemischs oder Tritiumemissionen.

Aus diesem Grund wurde eine dynamische Prozesssimulation des gesamten geschlossenen Brennstoffkreislaufs entwickelt. Die Simulation erreicht ein detailgetreues Abbild des Prozesses, indem sowohl die übergeordnete Architektur des gesamten Kreis-

laufs als auch die Architektur der einzelnen Systeme auf einer Komponentenbasis wiedergegeben wird. Das dynamische Verhalten der Komponenten wird durch eine Reihe von Bilanzräumen berücksichtigt, für die dynamische Massen- und Speziesbilanzen formuliert wurden.

Solch eine geschlossene, allumfängliche Simulation eines Brennstoffkreislaufs mit physikalischen Modellen ist bislang in Umfang und Komplexität einzigartig.

Mit der entwickelten Simulation wurde der Betrieb des EU-DEMO-Brennstoffkreislaufs für einen Referenzbetriebspunkt untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Betriebspunkt alle Anforderungen erfüllt und dynamische Effekte keine Einschränkung in Brennstoffverfügbarkeit und -zusammensetzung verursachen. Ebenso treten nur schwache Schwankungen in der Tritiumkonzentration im Abgas auf, und sowohl durchschnittliche als auch maximale Werte übertreffen alle Anforderungen an Emissionsvorgaben.

Link zur Arbeit: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000175224>



Lehre und Bildung

Vorlesungen, Seminare und Workshops

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Vorlesung

- **Energy Storage and Network Integration**
(apl. Prof. Dr. Francesco Grilli, Prof. Dr.-Ing. Giovanni De Carne) WS 24/25
- **Electrical Engineering and Electronics for Mechanical Engineers**
(Prof. Dr.-Ing. Giovanni De Carne) WS 24/25
- **Superconducting Materials Part I**
(Prof. Dr. Bernhard Holzapfel) WS 24/25
- **Superconductivity for Engineers**
(Prof. Dr. Sebastian Kempf, Prof. Dr. Bernhard Holzapfel) WS 24/25
- **Superconductors for Energy Applications**
(apl. Prof. Dr. Francesco Grilli) WS 24/25
- **Digital Real Time Simulations for Energy Technologies**
(TT-Prof. Dr. Giovanni De Carne) SS 2024
- **Superconducting Materials Part II**
(Prof. Dr. Bernhard Holzapfel) SS 2024

Vorlesung/Übung

- **Superconducting Power Systems**
(Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe) WS 24/25
- **Superconducting Magnet Technology**
(Prof. Dr. Tabea Arndt) SS 2024

Seminar

- **Anleitung zu selbständigen wissenschaftlichen Arbeiten**
(Prof. Dr. Bernhard Holzapfel) WS 24/25
- **Seminar Strategieableitung für Ingenieure**
(Prof. Dr. Tabea Arndt) WS 24/25

■ **Advanced Seminar: Accelerators and Detectors – Future Technologies for Research and Medicine**

(Prof. Dr. Ulrich Husemann, Prof. Dr. Bernhard Holzapfel, Prof. Dr. Anke-Susanne Müller, Prof. Dr. Matthias Fuchs, Prof. Dr.-Ing. Maria Francesca Spadea, Dr. Axel Bernhard, Markus Schwarz) SS 2024

■ **Seminar on Applied Superconductivity**

(Prof. Dr. Sebastian Kempf, Prof. Dr. Tabea Arndt, Prof. Dr. Bernhard Holzapfel, Prof. Dr. Mathias Noe) SS 2024

■ **Projektmanagement für Ingenieure** (Prof. Dr. Mathias Noe) SS 2024

Praktikum (P)

- **Supraleitende Materialien**
(Prof. Dr. Bernhard Holzapfel) WS 24/25
- **Robotische Wickeltechnik für Supraleiterdrähte**
(Prof. Dr. Tabea Arndt) WS 24/25
- **Supraleitende Materialien**
(Prof. Dr. Bernhard Holzapfel) SS 2024

KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

Vorlesung

- **Vakuumtechnik**
(Dr.-Ing. Thomas Giegerich, Dr. Christos Tantos) WS 24/25
- **Fuel Cycle Lecture**
(Politecnico die Torino) Giegerich
- **Vorlesung/Übung Fusionstechnologie A**
(Dr. Klaus-Peter Weiss, Dr. Sara Perez Martin) WS 24/25

KIT-Fakultät Maschinenbau

Vorlesung

- **Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren**
(Dr. Klaus-Peter Weiss, Dr. Michael Wolf) SS 2024
- **Angewandte Kryo-Technologie**
(Dr. Klaus-Peter Weiss, Dr. Holger Neumann) SS 2024
- **Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf,**
(Dr. Thomas Giegerich, Dr. Robin Gröble) SS 2024

Seminare

Kryo-Seminare

- **22.–23.02.2024:** DKV-Seminar Kühlung von Rechenzentren (Neumann)
- **25.–26.04.2024:** DKV-Seminar Kältemittel (Neumann)
- **11.–13.09.2024:** VDI-Seminar Kryotechnik (Neumann)
- **25.–27.09.2024:** HdT-Seminar Kryostatbau (Neumann)
- **18.–19.10.2023:** DKV-Seminar Grundlagen der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik (Neumann)

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau

- **Kryotechnik** (Neumann) WS 24

Abgeschlossene Doktorarbeiten

(* akademischer Betreuer)

VAKUUM

Jonas Schwenzer

A Process Simulator for the Prediction and Optimization of the Operation of the Fuel Cycle of a Fusion Power Plant

Betreuer: Dr.-Ing. T. Giegerich,
Prof. Dr. M. Kind (CIW)*

Tim Teichmann

Modellierung und Design einer quecksilbergetriebenen Vakuumpumpe zum Pumpen der Abgase eines Fusionskraftwerks

Betreuer: Dr.-Ing. T. Giegerich,
Prof. Dr. M. Kind (CIW)*

Abgeschlossene Masterarbeiten

(* akademischer Betreuer)

MAGNET

Sreekar Gandikota

Theoretical description and experimental verification of a Ne-Heatpipe for electric power equipment

Betreuer: Dr. F. Hornung,
Prof. Dr. T. Arndt*

Cheng Ma

Precise determination of the oxygen deficiency in thin film YBCO and GdBCO samples

Betreuer: K. Walter, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Kerstin Märkle

Messung der Polarisationsrichtung ferroelektrischer Domänen in Methylammoniumbleiodid

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. A. Colsmann (LTI),
Prof. Dr. B. Holzapfel*

Yassin Rahman

From Raw data to Insights: Revealing Correlations between REBCO-HTSC Parameters through Automated Data Evaluation; Analysis and Visualization

Betreuer: Dr. M. Erbe,
Prof. Dr. B. Holzapfel*

Ryan Schork

Optimierung von REBCO-Dünnschichten auf LMO-gepuffertem IBAD-Band

Betreuer: Dr. M. Erbe,
Prof. Dr. B. Holzapfel*

MATERIAL

André Kurzeja

Konzeption und Aufbau der Station „Wetterextreme“ im KIT-Schülerlabor Energie

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

Lennart Leist

Gepulste Laserdeposition von DyBa₂Cu₃O₇-Dünnschichten

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

Fabienne Müller

Entwicklung des Moduls „Quantenobjekte und ihre mathematische Beschreibung“ für einen Seminarkurs am KIT-Schülerlabor Energie

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

Simone Severo

Thermal resistance between metallic surfaces in different configurations for high current HTS Cable-in-Conduit Conductor

Betreuer: Dr. N. Bagrets,
Prof. Dr. R. Dagan (INR)*

Simon Urban

Entwicklung einer Testanlage für mechanische Versuche in einer kryogenen Wasserstoffatmosphäre
Betreuer: Dr. K.-P. Weiss,
Prof. Dr. M. Stripf (MMT KA)*

Thomas Vetter

Gepulste Laserdeposition von Ba(Fe,Co)₂As₂ auf CeO₂-gepufferten Substraten
Betreuer: S. Tokatlidis,
Prof. Dr. B. Holzapfel*

RTSET**Anthony Oluwatos Adefolalu**

Optimization and Integration of Green Hydrogen in Energy Systems Planning: a Case Study Approach
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe,
Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Thomas Caruyer

Entwicklung eines Betriebskonzepts für das EnBW reallabor H₂-Wyhlen
Betreuer: N. Nemsow,
Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Emilien Kettler

Ammonia Cracking unit performance analysis, including efficiency and stability
Betreuer: Prof. Dr. V. Hagenmeyer (IAI),
Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Max Leuthaeuser

Implementation and Testing of a Voltage Based SoC-balanced and AC-coupled Control for DC Microgrids
Betreuer: Prof. Dr. V. Hagenmeyer (IAI),
Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Honeymol Mathew

Comparison of two dual active bridge-based reconfigurable converters for DC fast charging stations of electric vehicles
Betreuer: G. Arena, Prof. Dr.-Ing. De Carne*

Sarah Okumu

Stability Analysis of a multi-port Power Hardware in the Loop setup with impedance-based modeling approach
Betreuer: F. Ashrafidehkordi,
Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Kishore Perumbilly

Modeling and control of a DC fast charging station for electric vehicles
Betreuer: G. Arena,
Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Abgeschlossene Bachelorarbeiten

(* akademischer Betreuer)

ENERGIE

Patrick Deiters

Untersuchung des Kontaktverhaltens von hochtemperatur-supraleitenden Bandleitern

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

Marc Jahn

Numerical Calculation of AC Losses of High-temperature Superconductor Slabs: Influence of n-index and JC (B) Dependence

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. G. De Carne, Prof. Dr. F. Grilli*

Daniel Paluda

Optimierung des dynamischen Verhaltens von supraleitenden Schaltern

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

MATERIAL

Felix Kohler

Konstruktion und Aufbau eines Elektromotors in modularer Bauweise für das KIT-Schülerlabor ENERGIE

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

Tobias Kohler

Entwicklung eines Unterrichtskonzepts für die Station „Elektromobilität“ im KIT-Schülerlabor Energie

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

Paul Kruse

Entwurf der Automatisierung einer katalytischen Heliumreinigung

Betreuer: Steffen Bobien, Dr. G. Thimm (DHBW)*

Paul Walter

Entwicklung einer katalytischen Reinigungseinheit zur Entfernung von Wasserstoffverunreinigungen aus Heliumgas

Betreuer: Steffen Bobien, Prof. Dr. K. Schäfer (DHBW)*

RTSET

Daniel Knodel

Entwicklung und Implementierung der Ansteuerung der Ladeinfrastruktur in den Musterhäusern des Energy Lab 2.0

Betreuer: Prof. Dr. V. Hagemeyer (IAI), Prof. Dr.-Ing. G. De Carne*

Abgeschlossene Technikerarbeiten

(* akademischer Betreuer)

MAGNET

Marvin Schmid

Erstellen der Konstruktion und Fertigungszeichnungen einer supraleitenden/kapazitiven Füllstandssonde für LH2

Betreuer: Dr. R. Lietzow*

MATERIAL

Maximilian Häfele

Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für Extensometer

Betreuer: S. Eckerle, Dr. K. P. Weiss*

Lukas Kunz

Entwicklung einer Montagevorrichtung für Flachzugproben

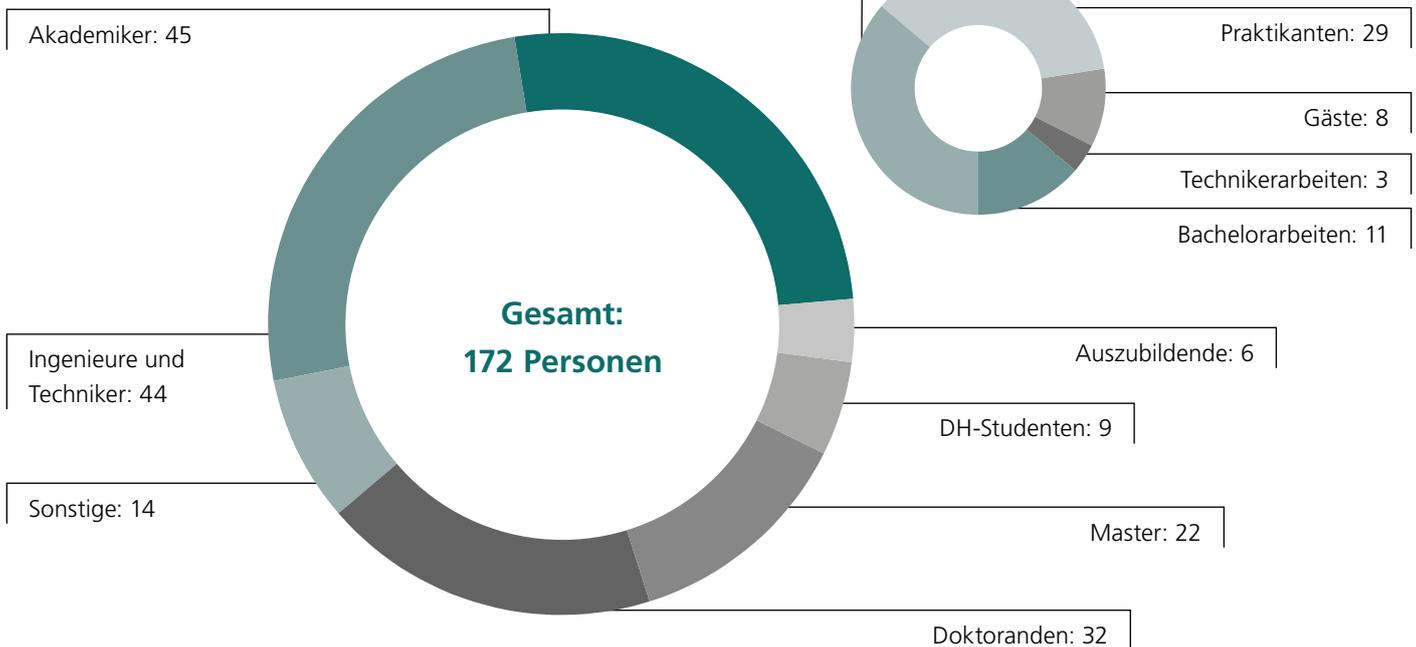
Betreuer: S. Eckerle, Dr. K.P. Weiss*

Zahlen, Fakten, Daten

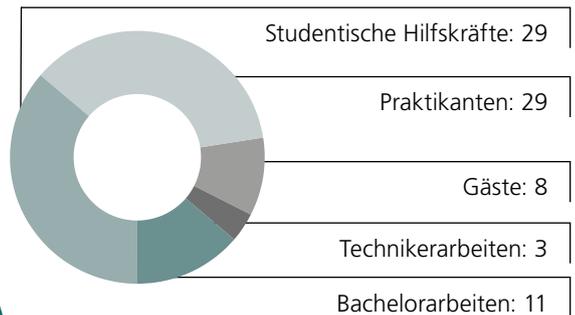
Forschungsfelder und -themen

Supraleiter- und Kryo-Materialien (Holzapfel)	Supraleitende Energietechnische Anwendungen (Noe)	Echtzeitsysteme für Energietechnologie (De Carne)	Supraleitende Magnettechnologie (Arndt)	Vakuum- und Fusionstechnologie (Giegerich)
Supraleitende Materialien (Hänisch)	Electro Energy Systems		Spulen- und Magnettechnologie (Hornung)	Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs (Giegerich)
Leiter- und Kabelkonzepte/-technologien (Holzapfel)	Netz- und Energiekomponenten (Noe)	Grid Modelling (De Sousa)	Hydrogen Integration Platform	
Struktur- und Funktionsmaterialien für Kryonanwendungen (Weiss)	Modellierung von Supraleitern und Komponenten (Grilli)	H2 in the Energy System (De Carne)	Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion (Wolf)	Vakuumtechnologie und Kryovakuumtechnik (Hanke)
		Dynamic Energy Storage Systems (De Carne)	Rotierende Maschinen (Arndt)	Brennstoffkreislauf Entwicklungsplattform und Industrie (Hauer)

Personalstand (m/w/d) (Stand 31.12.2024)



Zusätzlich, während 2024:



Gastwissenschaftler

Z. Huang

13.04.23–28.03.24

Southwest Jiaotong University, China

Ye Hong

13.04.23–28.03.24

Southwest Jiaotong University, China

M. Di Piertrantonio

18.09.23–18.03.24

University of Tuscia, Italien

X. Wang

01.01.24–07.07.24

Mc Gill University, Kanada

S. Okumura

11.04.24–23.07.24

University of Tokyo, Japan

F. Abusaif

14.11.22–31.12.26

Laboratorium für Applikationen der
Synchrotronstrahlung, KIT

F. Hattab

01.10.24–31.03.24

Sapienza University of Rome & Eni S.p.A.,
Italien

S. Banavath

01.11.24–31.12.24

Indian Institute of Technology, India

Mitgliedschaften

in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

Tabea Arndt

- 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
- Mitglied des Kuratoriums der „EnBW Stiftung“

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)
- Editor bei IEEE Transaction on Applied Superconductivity

Kai Bauer

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

Giovanni De Carne

- IEEE PELS AdCom Member at Large
- IEEE PELS eGrid Workshop series steering committee chair
- Vice-chair vom IEEE PELS Roadmap auf „High-Power Electronics for Decarbonizing Energy Grids -- ITRG“
- Konferenz Co-chair und Technical Program Chair vom IEEE PES gesponsert „IEEE PowerTech 2025“ Konferenz, Kiel, Juni 2025
- 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 Transactions on Power Delivery“
- 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 ICMA-B-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)
- Mitglied der DIN Normungsroadmap Wasserstoff
- Mitglied DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE Referat K184 „Supraleitung“

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
- Mitglied bei CIGRE

Sonja Schlachter

- Mitglied des „International Cryogenic Material Conference (ICMC) Board of Directors“
- Technischer Editor der Zeitschrift IEEE Transactions of Applied Superconductivity

Wescley T. B. de Sousa

- Vorstandsmitglied des „HTS Modelling Workgroup“.
- Vorstandsmitglied des COST ACTION CA19108 – „High-Temperature Super-Conductivity for Accelerating the Energy“
- Experte in der CIGRE Arbeitsgruppe B4/A3.86 - Strombegrenzungstechnologien für DC-Netze
- Vorsitzender des „Large Scale Track“ des Internationalen Wissenschaftlichen Programm Komitees für die EUCAS 2025.
- 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
- Experte im EUROfusion Scientific & Technical Advisory Committee (STAC)

Veröffentlichungen

Fusion

Zeitschriftenaufsatz

ASDEX Upgrade Team; Kallenbach, A.; Dux, R.; et al.
Divertor enrichment of recycling impurity species (He, N 2 , Ne, Ar, Kr) in ASDEX Upgrade H-modes
10.1088/1741-4326/ad3139
Nuclear Fusion

„ASDEX Upgrade Team; Ploeckl, B.; Lang, P. T.; et al.
Proposal of a control scheme for testing a centrifuge-based pellet injection system in DIPAK-PET
10.1016/j.fusengdes.2023.114142
Fusion Engineering and Design

Crisanti, F.; Ambrosino, R.; Falessi, M. V.; et al.
Physics basis for the divertor tokamak test facility
10.1088/1741-4326/ad6e06
Nuclear Fusion

EUROfusion Tokamak Exploitation Team; ASDEX Upgrade Team; Zohm, H.; et al.
Overview of ASDEX upgrade results in view of ITER and DEMO
10.1088/1741-4326/ad249d
Nuclear Fusion

Fry, Vincent; Zhukovsky, Alexander; Wolf, Michael J.; et al.
50 kA Capacity, Nitrogen-Cooled, Demountable Current Leads for the SPARC Toroidal Field Model Coil
10.1109/TASC.2024.3354237
IEEE Transactions on Applied Superconductivity

„Golfinopoulos, T.; Michael, P. C.; Ihloff, E.; et al.
Building the Runway: A New Superconducting Magnet Test Facility Made for the SPARC Toroidal Field Model Coil
10.1109/TASC.2024.3352395
IEEE transactions on applied superconductivity

Hartwig, Zachary S.; Vieira, Rui F.; Dunn, Darby; et al.
The SPARC Toroidal Field Model Coil Program
10.1109/TASC.2023.3332613
IEEE transactions on applied superconductivity

Kathage, Yannick; Hanke, Stefan; Giegerich, Thomas; et al.
Atomic hydrogen production in a cold plasma for application in a metal foil pump
10.1063/5.0190210
Physics of Plasmas

Kunze, Simon; Perrier, Pierre; Groll, Rodion; et al.
Rarefied gas flow in functionalized microchannels
10.1038/s41598-024-59027-1
Scientific Reports

Luo, Xueli; Kathage, Yannick; Teichmann, Tim; et al.
Assessment of Metal Foil Pump Configurations for EU-DEMO
10.3390/en17163889
Energies on behalf of DTT Contributors; Romanelli, Francesco; Abate, D.; et al.
Divertor Tokamak Test facility project: status of design and implementation
10.1088/1741-4326/ad5740
Nuclear Fusion

Shirai, Hiroshi; Takahashi, Koji; Pietro, Enrico Di
Recent Progress of JT-60SA Project toward Plasma Operation
10.1088/1741-4326/ad34e4
Nuclear Fusion

Tantos, C.; Teichmann, T.; Sarris, I.; et al.
Extensive analysis of the applicability range of the linear kinetic approaches in the case of the pressure driven gas mixture flows
10.1063/5.0180350
Physics of Fluids

Tantos, C.; Varoutis, S.; Hauer, V.; et al.
3D numerical study of neutral gas dynamics in the DTT particle exhaust using the DSMC method
10.1088/1741-4326/ad0c80
Nuclear Fusion

Teichmann, Tim; Giegerich, Thomas; Jäger, Martin; et al.
Experimental and Numerical Investigation of Expanding Mercury Vapor Jets
10.1109/TPS.2024.3394756
IEEE Transactions on Plasma Science

Teichmann, Tim; Luo, Xueli; Giegerich, Thomas; et al.
Study of the Effective Torus Exhaust High Vacuum Pumping System Performance in the Inner Tritium Plant Loop of EU-DEMO
10.1080/15361055.2023.2229679
Fusion Science and Technology

Vazquez Cortes, Alejandro; Day, Christian; Stihl, Christopher; et al.

Ab-initio simulations of atomic hydrogen interaction with Nb and V at clean and oxygen covered surfaces

10.1016/j.nme.2024.101600

Nuclear Materials and Energy

Haak, V.; Dhard, C. P.; Boeyaert, D.; et al.

First operation and validation of simulations for the divertor cryo-vacuum pump in Wendelstein 7-X

10.1016/j.fusengdes.2024.114671

Fusion Engineering and Design

W7-X Team; Varoutis, S.; Tantos, C.; et al.

Numerical simulation of neutral gas dynamics in the W7-X sub-divertor

10.1088/1741-4326/ad49b5

Nuclear Fusion

Vortrag

Pehlivan, Johanna; Beyreuther, Elke; Horst, Felix; et al.

Investigation of radical formation and oxygen depletion in flash and conventional radiotherapy using EPR Spin Trapping

4th Flash Radiotherapy and Particle

Therapy Conference (FRPT 2024), Rom,

Italien, 04.12.2024–06.12.2024

Poster

Pehlivan, Johanna; Beyreuther, Elke; Horst, Felix; et al.

Investigation of radical formation and oxygen depletion in flash and conventional radiotherapy using EPR Spin Trapping

4th Flash Radiotherapy and Particle The-

rapy Conference (FRPT 2024), Rom, Italien,

04.12.2024–06.12.2024

Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)

Zeitschriftenaufsatz

„Cengeri, P.; Kimoto, Y.; Janoska, M.; et al. Long term hydrogen storage properties of ZK60 Mg-alloy as processed by different methods of SPD
10.1007/s10853-024-09529-0
Journal of Materials Science

Chow, Calvin C. T.; Zhang, Min; Chau, K. T.; et al.
Modeling HTS Coils With Different Coupling Scenarios via Integral Method
10.1109/TASC.2024.3450991
IEEE transactions on applied superconductivity

Dadhich, A.; Grilli, F.; Denis, L.; et al.
Electromagnetic-thermal modeling of high-temperature superconducting coils with homogenized method and different formulations: a benchmark
10.1088/1361-6668/ad8315
Superconductor Science and Technology

de Oliveira, Roberto A. H.; Taalibi, Othman; Arndt, Tabea
Compact HTS Motor Designs Especially Useful to Be Cooled by Liquid Hydrogen
Zeitschriftenaufsatz
10.1109/TASC.2024.3392961
IEEE transactions on applied superconductivity

Duval, J. M.; Prouvé, T.; Collier-Wright, M. Drechsler, A.; et al.
Qualification and test of space compatible superconducting current leads (REBCO) designed for adiabatic demagnetization refrigerators
10.1088/1757-899X/1302/1/012014
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Elschner, Steffen; Kudymow, Andrej; Riva, Nicolo; et al.
The Garber Current Pattern: An Additional Contribution to AC Losses in Helical HTS Cables?
10.1109/TASC.2024.3356435
IEEE Transactions on Applied Superconductivity

Fink, S.; Noe, M.
High Voltage Calculations for a 380 kV Superconducting Fault Current Limiter
10.1109/TASC.2023.3349364
IEEE transactions on applied superconductivity

Ghabeli, Asef; Fuchs, Günter; Hänisch, Jens; et al.
3D modeling and measurement of HTS tape stacks in linear superconducting magnetic bearings
10.1088/1361-6668/ad3c9a
Superconductor Science and Technology

Hayasaka, Ryoichiro; Hänisch, Jens; Cayado, Pablo
DSDApp: An Open-Access Tool for Definitive Screening Design
10.5334/jors.462
Journal of Open Research Software

Iida, Kazumasa; Yamauchi, Yoshihiro; Hatanoto, Takafumi; et al.
Structural analysis and transport properties of [010]-tilt grain boundaries in Fe(Se,Te)
10.1080/14686996.2024.2384829
Science and Technology of Advanced Materials

Khonya, Ali; Noe, Mathias; Sousa, Wescley T. B. de; et al.
Modeling Superconducting Components of the Electric Aircraft
10.1109/TASC.2024.3350599
IEEE Transactions on Applied Superconductivity

Krasch, B.; Abusaif, F.; Arndt, T.; et al.
Measurement Setup and Magnetic Field Studies of a Compact Superconducting Undulator With Laser-Structured HTS Tapes
38.05.03 (POF IV, LK 01)
10.1109/TASC.2024.3355320
IEEE transactions on applied superconductivity

Lenoir, Gilles; Puthran, Kirtana; Barth, Christian; et al.
Effect of transverse compressive stress applied at room temperature on Nb₃Sn Rutherford cables
38.05.03 (POF IV, LK 01)
10.1088/1361-6668/ad1341
Superconductor Science and Technology

Macchiagodena, Antonio; Breschi, Marco; De Marzi, Gianluca; et al.
Analytical Formulae for Hysteresis Power Loss in Twisted Stacked HTS Cables
10.1109/TASC.2024.3369581
IEEE Transactions on Applied Superconductivity

- Miura, Masashi; Eley, Serena; Iida, Kazumasa; et al.
 Quadrupling the depairing current density in the iron-based superconductor $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{Hx}$
 10.1038/s41563-024-01952-7
 Nature Materials
- Popov, Ruslan; Hänisch, Jens; Holzapfel, Bernhard
 Oxygen Annealing of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Superconducting Thin Films: Influence of Annealing Time
 10.1109/TASC.2023.3345265
 IEEE transactions on applied superconductivity
- Reale, P.; Pinto, V.; Cayado, P.; et al.
 Evidence of Gd substitution for Y in YBCO films with Gd excess
 10.1016/j.jallcom.2024.173921
 Journal of Alloys and Compounds
- Sanchez-Manzano, David; Orfila, Gloria; Sander, Anke; et al.
 Size-Dependence and High Temperature Stability of Radial Vortex Magnetic Textures Imprinted by Superconductor Stray Fields
 10.1021/acsami.3c17671
 ACS Applied Materials & Interfaces
- Schlachter, S. I.; Drechsler, A.; Gehring, R. Eisele, M.; et al.
 Design, fabrication and test of high temperature superconducting magnet for heat flux and radio blackout mitigation experiments in plasma wind tunnels
 10.1088/1757-899X/1302/1/012021
 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
- Taylor, Owen; Gao, Yunxin; Lakrimi, M'Hamed; et al.
 Characterization of the Mechanical and Thermal Properties, Including Fracture Toughness, of Epoxy Resin System DGEBA, POPDA (D400)
 10.1109/TASC.2024.3358265
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity
- Walter, Kai; Erbe, Manuela; Welle, Alexander; et al.
 Precise determination of oxygen content in $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film samples using x-ray diffraction
 10.1088/1361-6668/ad4a30
 Superconductor Science and Technology
- Zhang, Jie; Luo, Yi; Hänisch, Jens; et al.
 Study of vortex glass-liquid transition and superconducting properties of single-crystalline boron-doped $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$
 10.1016/j.jallcom.2024.174908
 Journal of Alloys and Compounds
- Zhou, Pengbo; Zhang, Shuai; Wang, Ruichen; et al.
 Effect of local and global screening current on the current decay in closed-loop HTS coils
 10.1088/1361-6668/ad3f7f
 Superconductor Science and Technology
- „Bagrets, Nadezda; Weiss, Klaus-Peter
 Thermal and Electrical Resistance of HTS Tapes Stacks in Radial Direction
 10.1109/TASC.2023.3341891
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity
- Grothe, R.; Pohl, M.; Troschitz, J.; et al.
 Characterization of intrinsic interfaces between fibre-reinforced composites and additively manufactured metal for designing hybrid structures
 10.1016/j.jajp.2024.100209
 Journal of Advanced Joining Processes
- Weiss, Klaus-Peter; Bagrets, Nadezda; Schulz, Camelia
 Cryogenic thermo-physical properties of additive manufactured materials
 10.1088/1757-899X/1302/1/012005
 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
- Taylor, Owen; Gao, Yunxin; Lakrimi, M'Hamed; et al.
 Characterization of the Mechanical and Thermal Properties, Including Fracture Toughness, of Epoxy Resin System DGEBA, POPDA (D400)
 10.1109/TASC.2024.3358265
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity

Proceedingsbeitrag

- Fink, Stefan; Zwecker, Volker; Müller, Ralf; et al.
 High voltage testing of insulators for a medium voltage liquid nitrogen insulated line
 10.1109/ICHVE61955.2024.10676219
 International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE 2024), Berlin, Deutschland, 18.08.2024–22.08.2024
 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE 2024)
- Liu, Yingzhen; Li, Liyi; Lin, Jingbo; et al.
 An Inverse Study of Transient Response of a No-Insulation Coil with AC Currents Based on Simplified Equivalent Circuit Models
 10.1109/CIEEC60922.2024.10583399
 7th IEEE International Electrical and Energy Conference (2024), Harbin, China, 10.05.2024–12.05.2024
 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Harbin 10th-12th May 2024

Vortrag

Kauffmann, Alexander; Tirunilai, Aditya Srinivasan; Hanemann, Theresa; et al.

High Entropy Alloys and Compositionally Complex Alloys for Extreme Application Conditions

Seminar des Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel (2024), Kassel, Deutschland, 24.01.2024

Batista de Sousa; Wesley Tiago

Transient Simulations for HTS Cables – Development of a Lumped Thermal Model
9th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors (HTS 2024), Bad Zurzach, Schweiz, 10.06.2024 – 13.06.2024

De Sousa, Wesley; Noe, Mathias; Grohmann, Steffen; et al.

SuperLink – Deployment of Superconducting Power Cables for Power Grid Enhancement

Applied Superconductivity Conference (ASC 2024), Salt Lake City, UT, USA, 01.09.2024 – 06.09.2024

Hänisch, Jens

Iron-Based Superconducting Films: Status, Prospects and Challenges

SPIN Seminar Series (2024), Online, 14.11.2024

Noe, Mathias; Pham, Quoc Hung

Experiments with a superconducting full bridge inverter

Applied Superconductivity Conference (ASC 2024), Salt Lake City, UT, USA, 01.09.2024 – 06.09.2024

Palacios, Sebastian; Wehr, Mira; Wolf, Michael J.; et al.

AppLHy! und TransHyDE – Hybride Pipeline: Synergetische Energieübertragung mittels HTS und LH2

ZIEHL IX (2024), Berlin, Deutschland, 10.04.2024 – 11.04.2024

Schlachter, Sonja I.; Drechsler, Antje; Gehring, Rainer; et al.

1Lor1A-03 : Operation of an HTS magnet in heat flux and radio blackout mitigation experiments in plasma wind tunnels
Applied Superconductivity Conference (ASC 2024), Salt Lake City, UT, USA, 01.09.2024 – 06.09.2024

Schlachter, Sonja I.; Drechsler, Antje; Gehring, Rainer; et al.

Design and application of HTS magnet for magneto-hydro-dynamic plasma shielding in radio blackout and heat flux mitigation experiments

29th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC 2024), Genf, Schweiz, 22.07.2024 – 26.07.2024

„Sousa, Wesley T. B. de; Willén, Dag; Noe, Mathias; et al.

Development and Impacts of a Superconducting Power Cable in a 110kV Distribution Network

37th International Symposium on Superconductivity (ISS 2024), Kanazawa, Japan, 03.12.2024 – 05.12.2024

Wolf, Michael; Wehr, Mira; Palacios, Sebastian; et al.

Opportunities and Challenges of Using HTS REBCO in Liquid Hydrogen (LH2)

4th International Workshop on Cooling Systems for High-temperature Superconductor Applications (IWC-HTS 2024), Matsue, Japan, 23.10.2024 – 25.10.2024

Kauffmann, Alexander; Tirunilai, Aditya Srinivasan; Hanemann, Theresa; et al.

High Entropy Alloys and Compositionally Complex Alloys for Extreme Application Conditions

Seminar des Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel (2024), Kassel, Deutschland, 24.01.2024

Weiss, Klaus-Peter; Beisiegel, Micha; Schulz, Camelia; et al.

Impact of hydrogen embrittlement on cryogenic mechanical properties of 304 steel

29th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC 2024), Genf, Schweiz, 22.07.2024 – 26.07.2024

T. Arndt et al.

Hybrid Energy Pipeline & Use Cases of LH2 in mobility

German-Spanish workshop on Hydrogen Virtuell, n.a., 20.02.2024,

T. Arndt et al.

Forschungsfeld HTS
ZIEHL IX

Berlin, BBAW, D, 11.04.2024,

T. Arndt, M. Dam

Introduction to KIT & ITEP for the SHiP project

SHiP Coordination Panel
CERN, Geneva, CH, 16.04.2024

Magnus Dam, Frank Hornung and Tabea Arndt

Superconducting magnet for the SHiP muon shield

SHiP Collaboration Meeting
CERN, Geneva, CH, 17.04.2024

T. Arndt, M. Dam

Superconducting Muon Shield Magnet – Basic Aspects

SHiP Collaboration Meeting
CERN, Geneva, CH, 03.07.2024

Poster

Abbasi, Zahra; Weiss, Klaus-Peter; Schulz, Camelia

Mechanical and physical properties of AlMgSc-alloy developed for cryogenic temperature applications

29th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC 2024), Genf, Schweiz, 22.07.2024–26.07.2024

Abbasi, Zahra; Tschan, Valentin; Weiss, Klaus Peter

Microstructure and Anisotropy of Mechanical Properties of a Large-Scale Forged Nitronic 50 (XM-19) at Cryogenic Temperatures

20 International Conference on Textures of Materials (ICOTOM 2024), Metz, Frankreich

Bagrets, Nadezda; Holzapfel, Bernhard; Augieri, A.; et al.

Current transfer length and interface resistance of KC4 REBCO tapes

Applied Superconductivity Conference (ASC 2024), Salt Lake City, UT, USA, 01.09.2024–06.09.2024

Gaisina, Elvina; Schulz, Camelia; Bagrets, Nadezda; et al.

In-situ Mechanical Characterization of Hollow Specimens with Hydrogen and Helium Environments at Ambient and Cryogenic Temperatures

29th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC 2024), Genf, Schweiz, 22.07.2024–26.07.2024

Weiss, Klaus-Peter; Bagrets, Nadezda; Dam, Magnus

Compressive modulus characterization on stacks of high-temperature superconductor coated conductor tapes (pre-tests)

Applied Superconductivity Conference (ASC 2024), Salt Lake City, UT, USA, 01.09.2024–06.09.2024

Mathias Noe, Ali Khonya

System Modeling and Control Strategy of a Superconducting Powertrain for Electric Aircraft

ASC Conference, 1.-9. September 2024, Salt Lake City, USA

Energiesystemdesign (ESD)

Zeitschriftenaufsatz

Dong, Qihuan; Sousa, W. T. B. de
Realistic Evaluation of Resistive Superconducting Fault Current Limiters in Distribution Networks
10.1109/TASC.2024.3356425
IEEE Transactions on Applied Superconductivity

Arena, Gabriele; Chub, Andrii; Lukianov, Mykola; et al.
A Comprehensive Review on DC Fast Charging Stations for Electric Vehicles: Standards, Power Conversion Technologies, Architectures, Energy Management, and Cybersecurity
10.1109/OJPEL.2024.3466936
IEEE Open Journal of Power Electronics

Banavath, Satish Naik; Pogulaguntla, Aditya; De Carne, Giovanni; et al.
Transformative Role of Solid-State Circuit Breakers in Advancing DC Systems for a Sustainable World
10.1109/MPEL.2024.3494452
IEEE Power Electronics Magazine

Buticchi, Giampaolo; Pereira, Thiago; Yang, Jiajun; et al.
A Smart Transformer for the Electrical Power System of Green Airports: Smart Power Management
10.1109/MIE.2023.3304065
IEEE Industrial Electronics Magazine

Courcelle, Maëva; Tao, Qiucen; Geis-Schroer, Johanna; et al.
Perturbation-Based Load Sensitivity Identification for Solid-State Transformer-Based Load Control
10.1109/TPWRD.2024.3453270
IEEE Transactions on Power Delivery

De Carne, Giovanni; Maroufi, S. Masoome; Beiranvand, Hamzeh; et al.
The role of energy storage systems for a secure energy supply: A comprehensive review of system needs and technology solutions
10.1016/j.epr.2024.110963
Electric Power Systems Research

Dong, Qihuan; Wang, Haozong; Chen, Binshu; et al.
Enhancing grid protection: The crucial role of resistive-type superconducting fault current limiters in transmission line current differential relays
10.1016/j.ijepes.2023.109711
International Journal of Electrical Power & Energy Systems

Dong, Qihuan; Wang, Haozong; Chen, Binshu; et al.
Mitigating commutation failures in HVDC systems with SFCL deployment
10.1016/j.ijepes.2023.109712
International Journal of Electrical Power & Energy Systems

Fusco, Davide; Maroufi, Seyede Masoome; Porpora, Francesco; et al.
Performance Analysis of ASR-UKFs for Supercapacitor SoC Estimation in Hybrid Energy Storage Systems
10.1109/JESTPE.2024.3443276
IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics

Geis-Schroer, Johanna; Tao, Qiucen; Courcelle, Maëva; et al.
Power-to-Frequency Dependency of Residential Loads in a Wider Frequency Range: An Experimental Investigation
10.1109/TIA.2024.3439498
IEEE Transactions on Industry Applications

Reißner, Florian; Carne, Giovanni De
Virtual Synchronous Machine integration on a Commercial Flywheel for Frequency Grid Support
10.1109/TPPEL.2024.3369980
IEEE Transactions on Power Electronics

Sousa, Wesley T. B. de; Kottonau, Dustin; Murta-Pina, João; et al.
Thermal-electrical analogy for simulations of superconducting power cables
10.1088/1361-6668/ad637b
Superconductor Science and Technology

Tao, Qiucen; Courcelle, Maëva; Geis-Schroer, Johanna; et al.
Experimental Investigation of Power-to-Voltage Sensitivity Profiles of Residential Loads for Load Management Studies
10.1109/TPWRD.2024.3457578
IEEE Transactions on Power Delivery

Proceedingsbeitrag

Ashrafidehkordi, Fargah; Carne, Giovanni De
Investigating the Impact of Sensor Place-
ment on the Stability of Power Hardware-
in-the-Loop with a Grid-Following Inverter
as Hardware-of-Interest

10.1109/IPEMC-ECCEA-
sia60879.2024.10567418

10th International Power Electronics and
Motion Control Conference (IPEMC2024-
ECCE Asia 2024), Chengdu, China,
17.05.2024–20.05.2024

2024 IEEE 10th International Power Elect-
ronics and Motion Control Conference
(IPEMC2024-ECCE Asia), Chengdu, China,
17-20 May 2024

Bielski, Pawel; Eismont, Aleksandr; Bach,
Jakob; et al.

Knowledge-Guided Learning of Temporal
Dynamics and its Application to Gas Turbi-
nes

10.1145/3632775.3661967

15th ACM International Conference on Fu-
ture and Sustainable Energy Systems (e-
Energy 2024), Singapur, Singapur,
04.06.2024–07.06.2024

15th ACM International Conference on Fu-
ture and Sustainable Energy Systems, Sin-
gapur, 4th-7th June 2024

Courcelle, Maëva; Tao, Qiucen; De Carne,
Giovanni

Applications of Voltage-Based Power Con-
trol using Online Load Sensitivity Calcula-
tion

10.1109/PESGM51994.2024.10688776

IEEE Power & Energy Society General Mee-
ting (PESGM 2024), Seattle, WA, USA,
21.07.2024–25.07.2024

2024 IEEE Power & Energy Society General
Meeting (PESGM)

Lukianov, Mykola; Cadaval, Enrique Ro-
mero; Arena, Gabriele; et al.

Partially Isolated Multi-Active Bridge
DC-DC Converter with Bidirectional EV
Charging Ports

10.1109/CPE-POWE-
RENG60842.2024.10604312

18th International Conference on Compati-
bility, Power Electronics and Power Engi-
neering (CPE-POWERENG 2024), Gdynia,
Polen, 24.06.2024–26.06.2024

2024 IEEE 18th International Conference
on Compatibility, Power Electronics and
Power Engineering (CPE-POWERENG),
Gdynia, 24th-26th June 2024

Nemsow, Nils; Prabakar, Kumaraguru;
McGilton, Ben; et al.

Integration of Electrolysis Systems into iso-
lated microgrid systems at extreme cold cli-
mates

10.1109/eGRID62045.2024.10842911

9th IEEE Workshop on the Electronic Grid
(eGrid 2024), Santa Fe, NM, USA,
19.11.2024–21.11.2024

2024 9th IEEE Workshop on the Electronic
Grid (eGRID), Santa Fe, 19th-21st Novem-
ber 2024

Okumu, Sarah; Ashrafidehkordi, Fargah; De
Carne, Giovanni

Source Impact of a DC/AC Converter on
Impedance-based Stability Analysis for
Power Hardware-in-the-Loop Setups

10.1109/eGRID62045.2024.10842831

9th IEEE Workshop on the Electronic Grid
(eGrid 2024), Santa Fe, NM, USA,
19.11.2024–21.11.2024

2024 9th IEEE Workshop on the Electronic
Grid (eGRID), Santa Fe, 19th-21st Novem-
ber 2024

Vortrag

Tao, Qiucen; De Carne, Giovanni
Load Sensitivity-Based Demand Control:
Impact on Load Forecast Error Reduction
14th Annual Protection, Automation and
Control World Conference : PAC World
Conference (PACWC 2024), Athen, Grie-
chenland, 17.06.2024–21.06.2024

Poster

Tao, Qiucen; Courcelle, Maëva; De Carne,
Giovanni

Time-Varying Voltage Sensitivity of Resi-
dential Loads for Voltage-Led Power Con-
trol Applications

Power and Energy Society General Meeting
Student Poster Session (IEEE PES GM 2024),
Seattle, WA, USA, 21.07.2024–25.07.2024

Natural, Artificial and Cognitive Information Processing (NACIP)

Proceedingsbeitrag

Zilz, Alexander; Tantos, Christos; Day, Christian; et al.

Numerical cooling power predictions for a dilution refrigerator via kinetic modeling

Proceedingsbeitrag

10.1063/5.0187447

32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (2022), Seoul, Südkorea, 04.07.2022–08.07.2022

32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (2022), 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (2022), Seoul, Südkorea, 04.07.2022–08.07.2022

Matter and Material (MT)

Zeitschriftenaufsatz

Fatehi, S.; Bernhard, A.; Richter, S. C.; et al.
Fabrication and Powering Test of a High-Temperature Superconducting Periodic Quadrupole Driving a Short-Length Transport Line for Laser-Plasma Accelerators
Zeitschriftenaufsatz
10.1109/TASC.2024.3351958
IEEE Transactions on Applied Superconductivity

Proceedingsbeitrag

Abusaif, F.; Grau, A.; Müller, A.-S.; et al.
Optimization studies on accelerator sample components for energy management purposes
10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPS79
15th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2024), Nashville, TN, USA, 19.05.2024–24.05.2024
15th International Particle Accelerator Conference, Nashville, Tennessee : May 19-24, 2024, Nashville, Tennessee, USA : proceedings. Ed.: F. Pilat

Gethmann, Julian; Mueller, Anke-Susanne; Blomley, Edmund; et al.
First year of data taking with the electricity meter network for sustainable operation of the KIT accelerator facilities for the KITTEN project
10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPS78
15th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2024), Nashville, TN, USA, 19.05.2024–24.05.2024
15th International Particle Accelerator Conference, Nashville, Tennessee : May 19-24, 2024, Nashville, Tennessee, USA : proceedings. Ed.: F. Pilat

Krasch, Bennet; Abusaif, Falastine; Grau, Andreas; et al.

Design study of a compact superconducting undulator based on laser-structured HTS tapes
10.18429/JACoW-IPAC2024-THPS22
15th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2024), Nashville, TN, USA, 19.05.2024–24.05.2024
15th International Particle Accelerator Conference, Nashville, Tennessee : May 19-24, 2024, Nashville, Tennessee, USA : proceedings. Ed.: F. Pilat

Vortrag

Boehm, Friederike; Batista de Sousa, Wesley; Grohmann, Steffen
Optimization of cryogenic mixed-refrigerant cascades for intermediate cooling stations of the long-distance superconducting power cable SuperLink
29th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC 2024), Genf, Schweiz, 22.07.2024–26.07.2024

Poster

Abusaif, Falastine; Bründermann, Erik; De Carne, Giovanni; et al.
Optimization studies on accelerator sample components for energy management purposes
15th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2024), Nashville, TN, USA, 19.05.2024–24.05.2024

Gethmann, Julian; Mohammad Zadeh, Mahshid; Bründermann, Erik; et al.
First Year of Data Taking with the Electricity Meter Network for Sustainable Operation of the KIT Accelerator Facilities for the KITTEN Project
15th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2024), Nashville, TN, USA, 19.05.2024–24.05.2024

Krasch, Bennet; Abusaif, Falastine; Arndt, Tabea; et al.
HTS Undulator Design Study and First Results
Applied Superconductivity Conference (ASC 2024), Salt Lake City, UT, USA, 01.09.2024–06.09.2024

Krasch, Bennet; Abusaif, Falastine; Glammann, Nicole; et al.
Design Study of a Compact Superconducting Undulator Based on Laser-structured HTS Tapes
15th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2024), Nashville, TN, USA, 19.05.2024–24.05.2024

Eingeladene Vorträge

Tabea Arndt

- 18.04.2024, T. Arndt, "The circle of innovation", CERN70y, Gateway of Science, CERN, Geneva CH
- 07.10.2024, T. Arndt, Speedy_HTS – A promising approach to high-power density HTS wind power generators, University of Twente, Twente, NL
- 08.11.2024, T. Arndt, M. Noe, M. Wolf, R. Oliveira, S. Palacios, O. Taalibi, TransHyDE and AppLHy!: Transport & Applications of Liquid Hydrogen (LH2), Hydrogène sans frontières, sommet européen de l'hydrogène, Siège Région Grand Est, Strasbourg, F
- 02.12.2024, T. Arndt, M. Dam, Superconducting Muon Shield Magnet, CEA Saclay Paris-Saclay, F
- 05.12.2024, T. Arndt, Unique selling points of (high-temperature) superconducting magnets and novel trends., MPI Stuttgart, IMPRS-CPQM & MPI UBS & University of Tokyo Center, Winterschool Stuttgart, D

Mathias Noe

- Steffen Grohmann, Mathias Noe, HTS power applications and cooling system developments in Europe 4th IWC-HTS, 23-25 October 2024, Matsue, Japan
- Grohmann, Steffen; Noe, Mathias HTS power applications and cooling system developments in Europe 4th International Workshop on Cooling Systems for High-temperature Superconductor Applications (IWC-HTS 2024), Matsue, Japan, 23.10.2024–25.10.2024
- Mathias Noe, Quoc Hung Pham Experiments with a superconducting full-bridge inverter ASC Conference, 1.-9. September 2024, Salt Lake City, USA

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
EM15013 Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.
CH 3317903
CN 10814715
DE 3317903
DE 102015010676.7
FR 3317903
GB 3317903
IE 3317903
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; Hörstensmeyer, Yannik; Müller, Ralf; Peters, Benedikt
DE 3441129
GB 3441129
- Stromschienensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungstück 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 12191073
- 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
WO PCT/EP2024/066166
- Method for determining load parameters
Courcelle, Maeva; De Carne, Giovanni; Tao, Qiucen
EP 23195368.8
WO PCT/EP2024/074149
- Verfahren zum Betrieb eines elektrischen Energieversorgungsnetzes, Computerprogramm, Leistungselektronikeinrichtung
De Carne, Giovanni
DE 102016119422.0
EP 17783483.5
- Kühlsystem für einen Rotor, Rotor und elektrische Maschine
Arndt, Tabea; Eisele, Matthias
DE 102024212129.0

Kontakt

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

Telefon: +49 721/608-Durchwahl
E-Mail: vorname.nachname@kit.edu

www.itep.kit.edu

Leitung

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)
Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)
Prof. Dr. Tabea Arndt (-23515)
Prof. Dr. Giovanni De Carne (-25924)

Sekretariat

Dagmar Klimmek (-23501)

Supraleiter- und Kryo-Materialien

Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)

Supraleitende Energietechnische Anwendungen

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

Echtzeit Systemintegration

Prof. Dr. Giovanni De Carne (-25924)

Geschäftsführer

Kai Bauer (-23705)

Kryobetrieb

Dr. Holger Neumann (-22625)

Supraleitende Magnettechnologie

Prof. Dr. Tabea Arndt (-23515)

Vakuum- und Fusionstechnologie

Dr. Thomas Giegerich (-22591)

Kontakt

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

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

www.itep.kit.edu

Herausgeber

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

Mai 2025

www.kit.edu