

# ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung  
Jahresbericht 2022



## IMPRESSUM

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

Telefon +49 721/608-23501

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

### TEXTE:

Tabea Arndt, Giovanni De Carne,  
Christian Day, Stefan Fink,  
Thomas Giegerich, Francesco Grilli,  
Jens Hänisch, Bernhard Holzapfel,  
Frank Hornung, Andrej Kudymov,  
Ralpf Lieztow, Ingeborg Meyer,  
Mathias Noe, Stylianos Varoutis,  
Klaus-Peter Weiss, Michael Wolf

### FOTOS UND GRAFIKEN:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### TITELBILD:

International Workshop  
„HTS4fusion und MEM“  
(Mechanical and Electromagnetic Properties  
of Composite Superconductors)

### GESTALTUNG:

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

### DRUCK:

Systemedia GmbH, 75449 Wurmberg

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

Mai 2023



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001

# Inhalt



## **4-5** VORWORT

## **6-32** ERGEBNISSE AUS DEN FORSCHUNGSFELDERN

- 6** Supraleiter- und Kryomaterialien
- 12** Energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- 20** Supraleitende Magnettechnologie
- 28** Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

## **34** PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

## **35-39** ABGESCHLOSSENE DOKTORARBEITEN

## **40-44** LEHRE UND BILDUNG

## **45-48** ZAHLEN, FAKTEN, DATEN

## **49-60** VERÖFFENTLICHUNGEN

- 49** Fusion
- 53** Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)
- 56** Programm Energiesystemdesign (ESD)
- 58** Eingeladene Vorträge
- 59** Schutzrechtsbestände

## **61** KONTAKT

# Vorwort

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

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

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

Zur Bearbeitung seiner komplexen und meist multidisziplinären Aufgaben verfügt das ITEP über einzigartige große Versuchseinrichtungen, Labore und die entsprechende technische Infrastruktur, die ständig an die sich verändernden Anforderungen angepasst wird.

Dazu gehören:

- Labor zur Entwicklung supraleitender Komponenten für die Energietechnik
- Technikum zur Entwicklung supraleitender Materialien
- Magnetlabor zur Entwicklung von spezifischen supraleitenden Wicklungen und Magneten
- Kryogenes Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe

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

2022 konnte das Institut durch die erfolgreiche Berufung von Prof. Giovanni de Carne auf eine Tenure-Track-Professur für Echtzeitsysteme in der Energietechnik ein wichtiger Schritt in der strategischen Verankerung der Energy Lab Arbeiten in unserem Institut vollzogen werden. Die wissenschaftlichen Arbeiten des Instituts waren 2022 leider weiterhin erschwert durch Corona-bedingte Einschränkungen und vor allem auch durch die starken Auswirkungen des russischen Angriffskriegs in der Ukraine. Trotzdem konnten unsere neuen und laufenden Forschungsprojekte sehr erfolgreich bearbeitet und eine Reihe außergewöhnlicher Fortschritte in unseren Forschungsgebieten erzielt werden:

Im Forschungsfeld **Supraleiter- und Kryomaterialien** liegt ein wichtiger Schwerpunkt auf der Erforschung neuer Supraleiter, der Entwicklung von HTSL-Bandleitern und der Charakterisierung von Funktionsmaterialien bei kryogenen Temperaturen. Wesentliche Fortschritte konnten bei der Entwicklung von komplexen High-Entropy-Oxid-supraleitern, bei der Bearbeitung des ESA-HTS-Harness-Projektes sowie bei der Charakterisierung von Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL)-Nanokompositschichten in starken Magnetfeldern, die in Kooperation mit dem Hochfeldlabor in Tohoku (Japan) erfolgten, erzielt werden. Der umfassende Aufbau der HTSL-Bandleiterbeschichtungs-

anlagen im Rahmen der CERN-Kollaboration wurde 2022 in wesentlichen Teilen abgeschlossen, sodass 2023 die finale Inbetriebnahme der Beschichtungsanlage erfolgen kann.

Schlussendlich war 2022 die Organisation des kombinierten Workshops „HTS4fusion und MEM (Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors) ein für das gesamte Institut herausragendes Ereignis. Im Rahmen dieses internationalen Workshops mit mehr als 70 Teilnehmenden aus Asien, Europa und USA konnten nach zwei Jahren Corona-Abstinenz endlich wieder wissenschaftliche Diskussionen in Präsenz erfolgen.

Im Forschungsfeld **Energietechnische Anwendungen der Supraleitung** wurden im Rahmen des BMWI-Verbundprojektes ROWAMAG wesentliche Komponenten für einen robusten und wartungsarmen Magnetheizer auf HTS-Basis aufgebaut und für Funktionstests vorbereitet und wesentliche Grundlagen des supraleitenden Schaltens mithilfe des dynamischen Widerstandes von HTS-Bandleitern untersucht. Der Aufbau eines neuen kalorimetrisch basierten AC-Verlustmesstandes verbessert deutlich die experimentellen Möglichkeiten zur Untersuchung der AC-Verluste von HTS-Komponenten. Die Modellierung von komplexen 3D-Spulenstrukturen konnte ebenso erfolgreich realisiert werden. Im Bereich der Echtzeitsimulation von Energiekomponenten konnte der PHIL-Aufbau mit doppelter Leistung aufgebaut und ein thermischer Emulator erfolgreich getestet werden.

Die **Supraleitende Magnettechnologie** stand 2022 stark unter dem Einfluss der neuen Forschungsarbeiten zum Flüssigwasserstoff und zur Supraleitung. Das koordinierte Verbundprojekt „AppLHy!“ hat erste Ergebnisse erarbeitet und mit den Partnern eine erste Version eines Whitepapers finalisiert. Eine generelle Stärke des Instituts liegt in der besonderen Expertise, den Flüssigwasserstoff mit elektrotechnischen Anwendungen neuartig und effizient zu kombinieren. So wurde auch das Forschungsthema der Rotierenden Maschinen durch die neuen Kühlmöglichkeiten beeinflusst, und neue Maschinentopologien wurden attraktiv. Das Forschungsthema der supraleitenden Magneten mit der robotischen Wickeltechnik konnte erstmals einem Projekt mit der Fertigung von Spulen erfolgreich zuarbeiten. Da auch in der Magnettechnik ein Trend zu Einsatztemperaturen von 20 bis 30 K zu verzeichnen ist (z. B. im Sonderforschungsbereich Hyperion mit kompakten NMR-Magneten), sind hier die Forschungsthemen gleich fokussiert.

Im Forschungsfeld **Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs** entwickelt das ITEP neue Prozesse und Verfahren für den inneren Brennstoffkreislauf eines Demonstrationsfusionskraftwerks (DEMO).

Die Arbeiten für DEMO konzentrieren sich auf die systematische Technologieentwicklung im Bereich kontinuierliches Vakuumpumpen und Isotopenseparation. Für die Metallfolienpumpe wurde Niob als alternatives Folienmaterial bestätigt, womit die Designphase beginnen kann. Für die Quecksilber-Diffusionspumpe konnten die

Düsenexperimente im HgLab abgeschlossen werden, sodass auch hier das Design beginnen kann.

Die Herstellung der Kryopumpen für die Fusionsanlage JT-60SA konnte wesentlich vorangetrieben werden, sodass die Pumpen **2023** nach Japan geliefert werden können. Simulationen der Teilchenabfuhr aus dem Divertor der Fusionsanlage DTT in Italien zeigten, dass die Kryopumpen die Anforderungen erfüllen. Für den Stellarator W7-X wurden komplexe 3D-Rechnungen erstellt, um zu verstehen, welchen Einfluss die dort verwendeten Kryopumpen auf die Einschusszeit des Plasmas haben können. Das am ITEP vorhandene Know-how im Bereich der Kryovakuumtechnik wurde auch in einem neuen Projekt eingesetzt: dem Einstein-Teleskop. Hier wurde in einer ersten Studie gezeigt, dass die sehr anspruchsvollen Vakuumanforderungen mit Kryopumpen gemeistert werden können.

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ist ein ganz wesentlicher Bestandteil unserer wissenschaftlichen Arbeiten, und 2022 konnten wir neben 38 Promotionen auch 23 Bachelor- und Masterarbeiten in den Fakultäten Physik, Elektrotechnik und Informationstechnik, Maschinenbau sowie Chemie- und Verfahrenstechnik betreuen.

Im ITEP-Schülerlabor konnten wir 2022 neue Schülerversuche zu den Themen Wasserstoffmobilität und Windenergie aufbauen und trotz Corona bereits wieder fünf Schülergruppen und 13 Praktikanten bei uns begrüßen.

Insgesamt war auch 2022 wieder ein sehr herausforderndes Jahr, und wir danken insbesondere allen unseren Mitarbeitenden herzlich für ihr tagtägliches Engagement bei der Bewältigung aller Institutsaufgaben in Forschung, Lehre und Innovation sowie allen Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie für ihr Vertrauen und dafür, dass sie Verständnis für die vorhandenen Einschränkungen aufgebracht haben. Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit, ein wissenschaftlich ebenso erfolgreiches Jahr 2023 und wünschen Ihnen alles Gute!

Herzlich

Ihre Institutsleitung

  
Mathias Noe

  
Bernhard Holzapfel

  
Tabea Arndt

# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Aufbau der Laserdepositionsanlagen für  
KC<sup>4</sup> – die KIT-CERN Cooperation on  
Coated Conductors

# 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 Kryonanwendung

## SUPRALEITENDE MATERIALIEN

Auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleiter wurden die Untersuchungen zur Sauerstoffbeladung mittels Röntgenbeugung (XRD) intensiviert und die Studien zur Mischung der Seltenen Erde *RE* in  $REBa_2Cu_3O_7$ -Verbindungen (REBCO) weitergeführt.

Derzeit wird XRD hauptsächlich auf einer grundlegenden Ebene während der Materialcharakterisierung und des Optimierungsprozesses eingesetzt, um die Phasenreinheit und gute Kristallinität der REBCO-Dünnschichten sicherzustellen. Es lässt sich damit jedoch weit mehr über die Mikrostruktur der dünnen Schichten herausfinden. Ziel ist, die XRD durch vollständige Mikrostrukturanalyse auf höherer Ebene in den Charakterisierungsprozess zu integrieren. Diese Mikrostrukturanalyse umfasst nicht nur die Gitterparameter und die Sauerstoffanreicherung, sondern auch die Defektstruktur der Dünnschichten. Auf diese Weise kann eine Verbindung zwischen den mikrostrukturellen Parametern und den supraleitenden Eigenschaften hergestellt werden, die es ermöglicht, die supraleitenden Eigenschaften mithilfe von Defekten wie Versetzungen, Stapelfehlern und/oder Ausscheidungen zu beeinflussen. Um diese Defekte zu quantifizieren, werden verschiedene Analyseroutinen und -methoden erstellt oder aus der Literatur an Testproben weiterentwickelt.

Der Sauerstoffgehalt, der eng mit den Gitterparametern verknüpft ist, ist eine der wichtigsten mikrostrukturellen Eigenschaften

von REBCO-Supraleitern, da er die kritische Temperatur stark beeinflusst. Daher werden derzeit Diffusionsexperimente durchgeführt, um die Abhängigkeit der genannten Gitterparameter vom Sauerstoffgehalt der Dünnschichtproben zu untersuchen. Gestützt auf die Literatur, kann die Abhängigkeit der Gitterparameter vom Sauerstoffgehalt mit dem Vegardschen Gesetz beschrieben werden. Das bedeutet, dass sich der Gitterparameter *c* in der orthorhombischen und tetragonalen Phase linear ändert. Am Übergangspunkt von der orthorhombischen zur tetragonalen Phase gleichen sich die Gitterparameter *a* und *b* an, und *c* nimmt rasch zu. Dies führt zu der in **Abbildung 1** dargestellten Abhängigkeit der Gitterparameter, hier für  $SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Der Gitterparameter *c* wird durch eine Änderung von  $\delta$  am stärksten beeinflusst und kann schnell und schlüssig bestimmt werden. Anhand der gezeigten Daten sollte es also möglich sein, den Sauerstoffgehalt zu bestimmen und *a* und *b* durch einen einfachen  $\theta/2\theta$ -Scan abzuschätzen.

Oft werden REBCO-Schichten mit nur einem Element auf dem *RE*-Gitterplatz hergestellt, allerdings kann sich auch eine Kombination mehrerer Seltenerdelemente

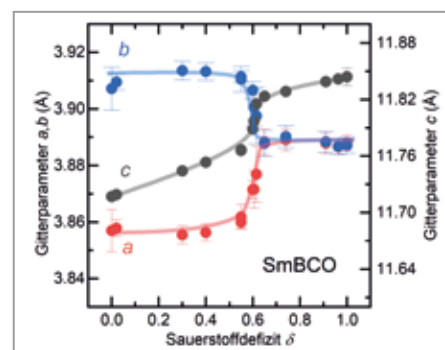
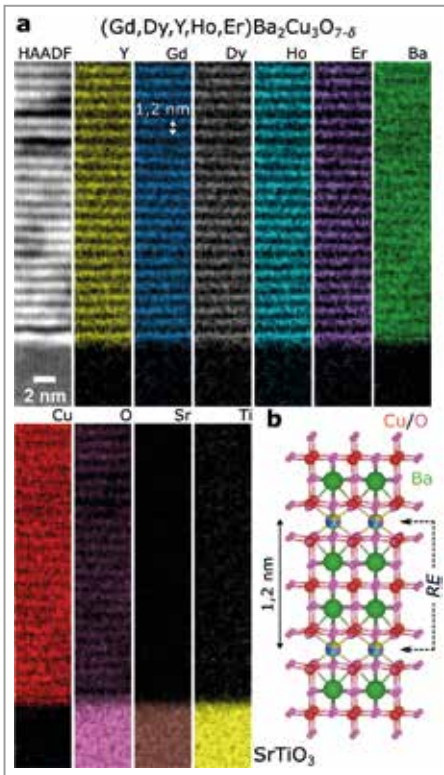


Abb. 1: Abhängigkeit der Gitterparameter von  $SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  vom Sauerstoffdefizit  $\delta$ .

auf dem *RE*-Gitterplatz positiv auf die supraleitenden Eigenschaften auswirken. Die Hauptschwierigkeit bei der Herstellung solcher Schichten ist die Optimierung der Herstellungsparameter, z. B. Kristallisationstemperatur und Sauerstoffpartialdruck, da sich diese für jedes Seltenerdelement unterscheiden. In einer Publikation 2022 konnten am ITEP hochqualitative REBCO-Schichten mit drei bzw. fünf Seltenerdelementen mithilfe der chemischen Lösungsabscheidung vorgestellt werden [1].

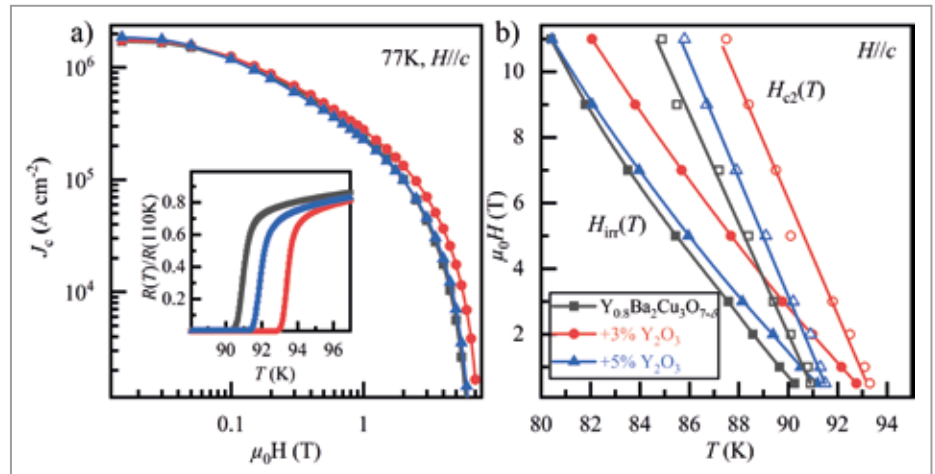
**Abbildung 2 (a)** zeigt eine chemische Analyse eines Probenquerschnitts einer (Gd,Dy,Y,Ho,Er)BCO-Schicht nahe dem Übergang zum  $SrTiO_3$ -Substrat. Die Proben wurden mithilfe der Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM) in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDXS) am Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) analysiert, wodurch chemische Informationen mit hoher Ortsauflösung ( $< 1$  nm) gewonnen wurden. Die verschiedenfarbigen Elementverteilungskarten der *REs* zeigen eine horizontal gestreifte Struktur mit einem vertikalen Streifenabstand von ca. 1,2 nm. Dieser Abstand entspricht gerade der Gitterkonstanten von REBCO in der vertikalen *c*-Richtung (siehe Schema der Kristallstruktur in **Abbildung 2 (b)**). Auf den Elementverteilungskarten sind also direkt die atomaren Ebenen der *REs* erkennbar. Der homogene Intensitätsverlauf der *RE*-Signale in den Elementverteilungskarten lässt auf die gewünschte homogene Verteilung der *REs* in der REBCO-Schicht ohne Entstehung lokaler *RE*-Anreicherungen rückschließen. Die gleichzeitig aufgenommenen Hochwinkelring-Dunkelfeld-STEM-Signale (HAADF) zeigen direkt die atomare Struktur, da bei HAADF-STEM die Bildintensität mit der



**Abb. 2:** (a) STEM-EDXS-Elementverteilungskarten und STEM-HAADF-Signal einer Querschnittsprobe aus einer (Gd,Dy,Y,Ho,Er)BCO-Schicht, gewachsen auf SrTiO<sub>3</sub>. (b) Modell der atomaren Struktur. Die RE-Ebenen haben einen vertikalen Abstand von ca. 1,2 nm und sind in (a) sichtbar.

mittleren Ordnungszahl korreliert und so schwerere Elemente (hier vor allem REs) heller erscheinen. Mehr Informationen zu diesen Ergebnissen finden sich auch in der Doktorarbeit von Lukas Grünewald [2]. Die fluorfreie metallorganische Deposition (FF-MOD) als ein Zweig der CSD-Routen wurde im Rahmen eines einjährigen Gastaufenthaltes (Jiangtao Shi) weitergehend untersucht, da es nicht nur ein umweltfreundlicher Prozess ist, sondern auch den Vorzug einer sehr hohen Wachstumsrate von rund 100 nm/s hat.

In dieser Studie [3] wurden die Auswirkungen verschiedener Y-Gehalte in YBCO auf die Übersättigung, die Kristallinität und die Supraleitfähigkeit der Schichten im Schnell-sinterverfahren mit der FF-MOD-Methode



**Abb. 3:** (a) kritische Stromdichte, (b) Phasendiagramm für YBCO-Schichten unterschiedlichen Y-Gehalts. Inset: resistiver Übergang.

untersucht. Mit steigendem Y-Gehalt nimmt der Grad der Übersättigung an der Grenzflächenkeimbildung zu. Die Y<sub>0.8</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>+5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schichten mit höherer Übersättigung neigen zur Bildung von a-Achsen-orientierten Kristallen, die die Supraleitung der Schichten beeinträchtigen. Eine geringere Zugabe von Y, also Y<sub>0.8</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>+3%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, wirkt sich positiv auf die Kristallinität der Schichten aus und verbessert die stromtragenden Eigenschaften (Abbildung 3).

### FE-BASIERTE SUPRALEITER

Auf dem Gebiet der Fe-basierten Supraleiter wurde sich im Rahmen eines DFG-Projekts vorwiegend mit der Herstellungsoptimierung von Fe(Se,Te)-Volumenproben und -Dünnschichten beschäftigt. Für die Laserdeposition wurden Substrattemperatur, Laserwiederholrate, Laserenergie und Pulsanzahl variiert, und insbesondere eine Temperatur von 625 °C hat sich als Optimum erwiesen. In diesem Optimierungsprozess konnten verschiedene apparative Verbesserungen an der PLD-Anlage vorgenommen werden, die für eine folgende Herstellung hochqualitativer Schichten unerlässlich sind. Auch hier erfolgte eine Unterstützung durch eine Gastwissenschaftlerin, Jie Zhang.

In Zusammenarbeit mit dem Institute of Physics, Chinese Academy of Science, konnte an (Li,Fe)OHFeSe-Dünnschichten eine neuartige exotische Vortexphase bestimmt und schließlich publiziert werden [4]. Diese Phase an der Grenze zwischen Vortexglas und Vortexflüssigkeit erinnert an die Vortex-Slush-Phase, tritt im Gegensatz dazu jedoch nur in extrem reinen Proben auf.

Ebenfalls abgeschlossen werden konnte eine Studie zur Anisotropie von wasserstoffdotierten NdFeAsO-Schichten der Universität Nagoya, für die elektrische Transportdaten geliefert wurden. Für dieses System wurde eine starke Abhängigkeit der elektronischen Anisotropie von der Ladungsträgerdichte sowie im Phasenübergang – möglicherweise mit dem quantenkritischen Punkt – bei einer Elektronendichte von rund 4,2 · 10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup> gefunden [5].

[1] P. Cayado et al., RSC Advances 12, 28831 (2022)

[2] L. Grünewald (2022) Electron Microscopic Investigation of Superconducting Fe- and Cu-based Thin Films.

[3] J. Shi et al., Applied Surface Science 612, 155820 (2023)

[4] D. Li et al., Supercond. Sci. Technol. 35 064007 (2022)



[5] M.Y. Chen et al., Phys. Rev. Mat. 6, 054802 (2022)

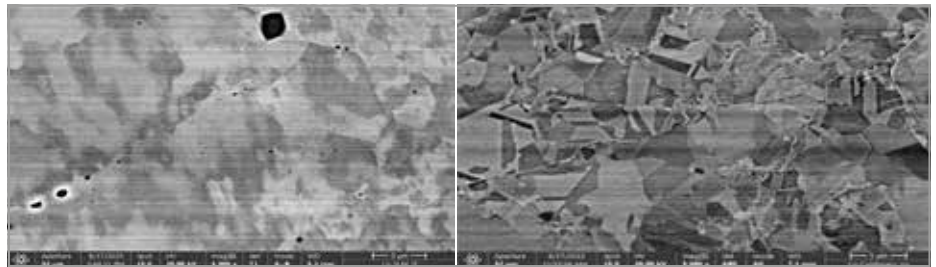
Kontakt: jens.haenisch@kit.edu

## LEITER- UND KABEL-TECHNOLOGIEN

Dieses Forschungsthema konzentriert sich auf die Entwicklung neuer HTS-Leiter- und Kabelarchitekturen für spezifische Anwendungsszenarien, sowie auf deren Umsetzung in relevante Leiter-/Kabellängen.

### KC<sup>4</sup>: R&D-PILOTLINIE FÜR HTS-BANDLEITER

Nachdem Ende 2021 der Abschluss des KIT-CERN Kollaborationsvertrages KC<sup>4</sup> erfolgte, konnte 2022 der Aufbau der dazu benötigten Beschichtungsanlagen in den dafür bereitgestellten Laborflächen abgeschlossen werden und die Inbetriebnahme der einzelnen Anlagen beginnen. Im Rahmen des Projektes KC<sup>4</sup> werden HTS Bandleiterbeschichtungsanlagen, die bei einem industriellen Supraleiterhersteller in den letzten Jahren mit großem Erfolg entwickelt wurden, an das KIT transferiert. Damit wird es zukünftig möglich am ITEP komplette HTS Bandleiterarchitekturen für spezielle Anwendungsszenarien zu entwickeln und in einer Bandlänge von bis zu mehreren hundert Metern zu produzieren, so dass z. B. neue Spulenkonzepte getestet werden können. Mit dieser Erweiterung wird es ab 2024 in Europa erstmals an einem Forschungsinstitut möglich sein aktuelle Kurzprobenmaterialentwicklungen mit den HTS Bandlängenanforderungen von Anwendungsdemonstratoren direkt zu verbinden. Im Rahmen von KC<sup>4</sup> werden in den kommenden Jahren spezielle HTS Bandleiterarchitekturen, die industriell nicht verfügbar sind, für die Entwicklung von HTS basierten Beschleunigermagneten und deren spezielles Anforderungsprofil entwickelt werden. Ebenso werden in KC<sup>4</sup> breite HTS Bandleiter



a) **Abb. 4: Vergleich zwischen Mikrostruktur Cu-SLM (a) bzw. Cu-Cold-Spray (b).**

hergestellt werden, die aktuell industriell nicht produziert werden und für die Entwicklung neuartiger Spulentopologien genutzt werden können. Dabei stützt sich KC<sup>4</sup> bei der HTS Bandleitersynthese auf der etablierten Kombination von ionenstrahltexturierten Metallsubstraten und deren Beschichtung mittels gepulster Laserdeposition (PLD) und Aufdampfverfahren. Da KC<sup>4</sup> ein industriunabhängiges Projekt ist wird es mittelfristig auch möglich werden interessierten Forschungseinrichtungen und Firmen eine offen zugängliche Entwicklungsplattform für spezielle HTS Bandleiterentwicklungen zur Verfügung zu stellen. 2022 konnte am ITEP über 500 m<sup>2</sup> vorhandene Laborfläche für KC<sup>4</sup> umgewidmet und für die Nutzung der HTS Beschichtungsanlagen vorbereitet werden. Nach erfolgter Lieferung und Installation aller geplanten KC<sup>4</sup> Anlagen sind diese aktuell in der Inbetriebnahmephase. Trotz großer Herausforderungen bei der Beschaffung der für die gepulste Laserdeposition benötigten Lasergerätschaften aufgrund kriegsbedingter internationaler Lieferschwierigkeiten konnte in dem für die Supraleiterbeschichtung zentralen Excimerlaser eine neue Laserröhre installiert und die Betriebsfähigkeit des Excimerlasers und der zugehörigen Beschichtungsanlagen hergestellt werden, so dass nach Finalisierung der optischen Laserführung in Q1 2023 die ersten Beschichtungsexperimente supraleitender Bandleiter realisiert werden können.

Kontakt: bernhard.holzapfel@kit.edu

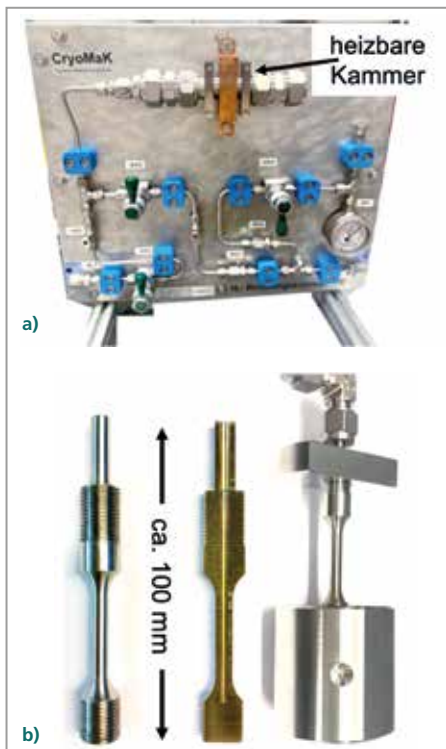
## STRUKTUR- UND FUNKTIONSMATERIALIEN FÜR KRYOANWENDUNGEN

### PROJEKT ADHYBAU

Im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschland wird in dem vom BMWK geförderten Projekt Additive-Hybrid-Bauweisen (AdHyBau) die Grundlage zum Bau eines wasserstoffbetriebenen elektrischen Flugzeugmotors geschaffen. Zusammen mit den Partnern Siemens, MT Aerospace, Fraunhofer IWM und TU Dresden führt das ITEP grundlegende kryogene Materialcharakterisierungen an additiven gefertigten metallischen Materialien durch. Dies ermöglicht ein tiefgehendes Verständnis der kryogenen Materialeigenschaften bei der Herstellungsmethode, z. B. Selected-Laser-Melting (SLM), Direct-Energy-Deposition (DED), oder Cold-Spray (CS). So zeigen sich bei diesen additiven Methoden typische Poren. Bedingt durch die Cold-Spray-Methode, zeigt sich bei Kupfer ein gestörteres Bild in der Mikrostruktur im Vergleich zum homogeneren SLM (Abbildung 4). In diesem Zusammenhang stellt für den Einsatz von Kupfer als elektrischen Leiter das Restwiderstandsverhältnis einen Parameter dar, der zu kontrollieren ist, um die Auslegung zu optimieren.

### PROJEKT APPLHY!

Der Transport und die Anwendung von flüssigem Wasserstoff LH2 werden zusammen mit Projektpartnern über die Techno-



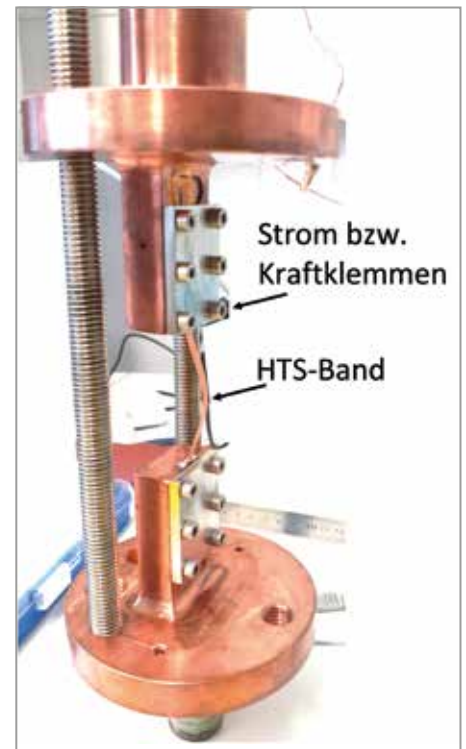
**Abb. 5:** H<sub>2</sub>-Beladungskammer (a) bzw. H<sub>2</sub>-Hohlzugproben (b).

logieplattform „TransHyDE“ im BMBF-Leitprojekt „AppLHy!“ betrachtet. Am ITEP und IAM-WK wird dabei das Verhalten von Struktur- und Funktionsmaterialien unter kryogenen Wasserstoffbedingungen untersucht. Zunächst wurden Materialbedingungen definiert und die Materialauswahl eingegrenzt. Durch die Anforderungsmatrix wurde eine

Prüfmatrix abgeleitet. Der Fokus liegt zurzeit auf LH<sub>2</sub>-Trailerbehältern und auf supraleitenden Kabeldesigns des ITEPs mit direkter und indirekter Wasserstoffkühlung. Zur Erweiterung der Materialanalysen bei der Wasserstoffexposition wurde eine Beladungskammer konzipiert, bei der bis 200 °C und 200 bar Probenmaterial mit Wasserstoffgas beaufschlagt werden kann, um den Einfluss auf mechanische und thermophysikalische Eigenschaften zu untersuchen (Abbildung 5a). Spezielle Hohlzugproben werden von innen mit Wasserstoffgas beaufschlagt und bei tiefen Temperaturen mechanisch bei statischer oder dynamischer Last untersucht (Abbildung 5b).

#### NORMEN DER HTS-CHARAKTERISIERUNG

Nach dem erfolgreichen Round-Robin-Test für Zugversuche an HTS-Drähten bei kryogenen Temperaturen, der vom ITEP koordiniert wurde, konnte ein Normenvorschlag für solche Zugversuche an HTS-Bändern bei kryogenen Temperaturen der IEC zur Kommentierung vorgelegt werden. Im Weiteren nimmt das ITEP am internationalen Round-Robin-Test zur Messung des kritischen Stroms unter Zugspannung bei 77 K an einem HTS-Draht teil. Vier verschiedene kommerziell erhältliche HTS-Drähte werden charakterisiert. Um die erarbeitete Richtlinie für diese Art der Messung zu prüfen, wurde eine Testeinrichtung



**Abb. 6:** Messvorrichtung kritischer Strom unter mechanischer Spannung.

für die Ermittlung des kritischen Stromes in Abhängigkeit der mechanischen Spannung angepasst (Abbildung 6). Nach erfolgreichen Vortests laufen derzeit Routinemessungen. Dies erweitert die Testmöglichkeiten des ITEP um eine wesentliche HTS-Drahtcharakterisierung.

Kontakt: klaus.weiss@kit.edu

# Highlight

## Entwicklung und Test von supraleitenden Stromzuführungen für ESA-Satelliten

Im Rahmen eines Entwicklungsauftrags der Europäischen Weltraumbehörde wurde in Zusammenarbeit mit CEA Grenoble und Neutron Star Systems UG, Köln, ein Ingenieurmodell eines HTS-Kabelbaums für zukünftige ESA-Missionen entwickelt, gebaut und erfolgreich getestet.

Im Rahmen der Programme „Cosmic Vision“ und „Voyage 2050“ der Europäischen Weltraumbehörde (ESA) werden in einer Reihe von Satellitenmissionen zur Erforschung des Universums extrem empfindliche Röntgen- oder Infrarotdetektoren eingesetzt, die auf Temperaturen weit unter 1 K gekühlt werden müssen. Um die niedrigsten Temperaturen im Bereich von 50 bis 100 mK zu erreichen, werden Adiabatische Entmagnetisierungskühler (ADR) in komplexen kryogenen Kühlketten eingesetzt. Die supraleitenden ADR-Magnete werden auf Satelliten aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit elektrischer Energie in der Regel mit Gleichströmen von nur wenigen Ampère betrieben. Normalleitende Stromzuführungen (SZF) vom Warmen ins Kalte würden aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit guter elektrischer Leiter mit einer zu hohen Wärmelast im Kalten führen. Durch den Einsatz supraleitender SZF kann die Wärmelast erheblich reduziert werden.

Im Rahmen eines Entwicklungsauftrags der Europäischen Weltraumbehörde (Contract No. 4000133578/21/NL/FE, 'High Temperature Superconductor Harness for use in Cryogenic Applications') wurde am ITEP ein Ingenieurmodell einer HTS-Stromzuführung für zukünftige ESA-Missionen entwickelt, gebaut und verschiedenen Tests unterzogen.

Die SZF mit Hin- und Rückleiter (Abbildung 7) ist für einen Nominalstrom von 2 A ausgelegt, soll jedoch auch einen Maximalstrom von 5 A bei einer Temperatur von 85 K am warmen Ende transportieren können.

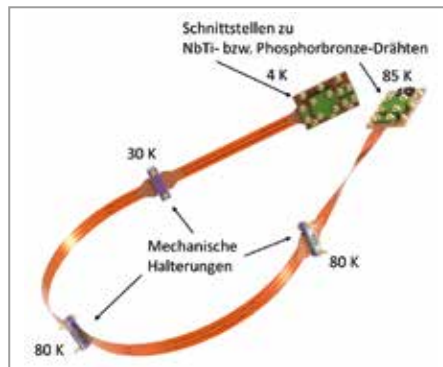


Abbildung 7: CAD-Modell der ESA-HTS-Stromzuführung.

Die Anforderungen der ESA an das 1 m lange Kabel umfassen ein flexibles Design, das minimale Biegeradien von 50 mm in allen Raumrichtungen erlaubt und gleichzeitig die starken Vibrationen während des Raketenstarts aushält. Hierfür musste ein mechanisch stabiler Kabelmantel mit geringer thermischer Leitfähigkeit entwickelt werden, der gleichzeitig zur elektrischen Isolation und zum Schutz vor Feuchtigkeit dient. Die Vorgabe für die maximale Wärmelast am kalten Ende mit mechanischen Halterungen bei 80 K und 30 K beträgt 1 mW für den Nennstrom von 2 A.

Für den Hin- und Rückleiter wurden mithilfe eines Pikosekundenlasers zunächst 1 mm breite und 1,25 m lange Bänder aus einem 12 mm breiten REBCO-Band geschnitten. Zur Verbesserung der Lötbarkeit wurden die Enden auf einer Länge von 125 mm mit Cu beschichtet. Die nicht verkupfert Bereiche wurden zum Schutz gegen Feuchtigkeit und zur elektrischen Isolation mit Parylene C beschichtet. Anschließend wurden Hin- und Rückleiter parallel zwischen zwei 14 mm breite Kaptonbänder la-

minierte, die einen flexiblen, aber mechanisch stabilen Mantel bilden. Nach Montage der 4-K- und 85-K-Schnittstellen und der mechanischen Halterungen wurden am ITEP Biegetests mit 1000 Biegungen bis zu einem Radius von 5 cm durchgeführt sowie Messungen des Isolationswiderstandes. Stromtests bis 20 A in LN<sub>2</sub> (Abbildung 8), die direkt nach der Montage und den Biege- und Widerstandstests durchgeführt wurden, zeigten keinerlei Degradation.

In Grenoble wurden die HTS-Stromzuführungen anschließend einem von der ESA vorgegebenen Shaker-Testprogramm mit quasistatischen, sinusförmigen, zufälligen und Schockanregungen unterzogen. Auch hier wurde keinerlei Degradation beobachtet. Bis Ende 2022 sind thermische Tests in Grenoble geplant. Anschließend wird die HTS-SZF für eine finale Testreihe an das ITEP zurückgesendet.

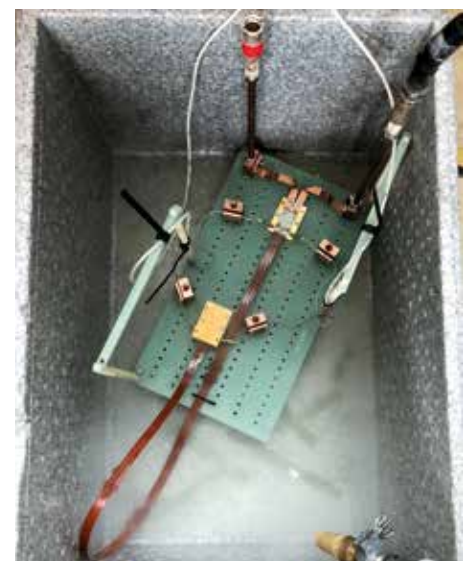


Abbildung 8: Test der ESA-HTS-Stromzuführung in LN<sub>2</sub>

# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



# Energetechnische Anwendungen der Supraleitung

Koordination: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe

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

- Supraleitende Netz- und Energie-komponenten
- Modellierung von Supraleitern und Komponenten
- Echtzeit-Systemintegration

Die Schwerpunkte des Themas „Energetechnische Anwendungen der Supraleitung“ liegen auf der Entwicklung neuartiger Betriebsmittel für Elektroenergiesysteme sowie auf der Entwicklung von ressourcen- und energieeffizienten Anwendungen für die Energetechnik. 2022 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

## SUPRALEITENDE NETZ- UND ENERGIEKOMPONENTEN

### RESISTIVE STROMBEGRENZER:

Hochtemperatur supraleitende Strombegrenzer (HTSL SSB) wurden in Deutschland schon erfolgreich im Mittelspannungsnetz eingesetzt. In Zusammenarbeit mit der TH Köln wurde das ITEP von Tennet beauftragt, die Möglichkeit eines resistiven HTSL SSB für 380 kV, 5 kA zu prüfen.

Ein wichtiger Bestandteil der Studie ist die hochspannungstechnische Auslegung. Zunächst erfolgte die Festlegung der Testspannungen für verschiedene Anregungen, basierend auf Normen für vergleichbare konventionelle Betriebsmittel. Im nächsten Schritt erfolgte die Spezifikation von maximalen elektrischen Feldstärken für die zu erwartenden Materialien. Für Flüssigstickstoff sind hierbei zwar experimentell abgeleitete Werte und Eigenschaften bekannt wie die ausgeprägte Abhängigkeit der Durchschlagsspannung vom belasteten Hochfeldvolumen. Für die festgelegten Testspannungen und Größe der Anordnung sind allerdings keine experimentellen Werte vorhanden. Hierbei ist auch zu beachten, dass für verschiedene Spannungs-

formen unterschiedliche maximale Feldstärkewerte abzuleiten sind. Als Hochspannungswert für Feldberechnungen wurden 1570 kV entsprechend der abgeschnittenen Blitzstoßspannung für Transformatoren der 380-kV-Netzebene und eine maximale Feldstärke für blasenfreien Flüssigstickstoff bei 5 bar Betriebsdruck (Absolutwert) von 3,8 kV/mm gewählt. Für Grenzflächen zu anderen Materialien (Hochspannungsdurchführung, Stützisolatoren) und bei kleinen Hochfeldvolumina gelten andere Maximalfeldstärken. Die Dimensionierung der kryogenen 380-kV-Durchführungen erfolgte durch den Vergleich von am ITEP vorhandenen kryogen erprobten 230-kV-Testdurchführungen (passend zur 110-kV-Netzebene) mit konventionellen 380-kV-Öl-Freiluftdurchführungen. **Abbildung 1** zeigt den prinzipiellen Aufbau des supraleitenden Strombegrenzers (SSB). Der Kryostat ist ein Zylinder mit horizontaler Achse und Klöpperböden als Abschluss.

Die Durchführungen werden auf Domen oberhalb des Zylinders montiert. Unterhalb des Domdeckels befindet sich gasförmiger Stickstoff, sodass konventionelle Befestigungssysteme für die Stromzuführungen benutzt werden können. Die supraleiten-

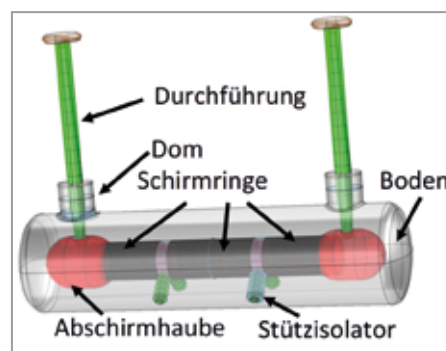


Abb. 1: Skizze eines 380-kV-supraleitenden Strombegrenzers für elektrostatische Feldberechnungen.

den Bänder sind in Form bifilarer Spulen gewickelt. Abhängig vom Bandtyp ergeben sich unterschiedliche Konfigurationen, z. B. 95 in Serie geschaltete Spulen, die zylinderförmig nebeneinander angeordnet werden. Am Ende des Zylinders sind im Bereich „Abschirmhaube“ spezielle Schirmanordnungen (Halbkugel + Zylinder + Halbkugel) angebracht. Eine Reduktion der Bauhöhe wird dadurch erreicht, dass sich das kryogene Ende der Durchführung in einer Bohrung der Abschirmhaubenanordnung befindet. Ebenso sind einige Spulen in jeder Abschirmhaube integriert. Die Mehrzahl der Spulen ist außerhalb der Abschirmhaube jeweils auf einer GFK-Platte untergebracht und von einem Abschirmring umgeben. Für unterschiedliche transiente Spannungsverteilungen zwischen den Abschirmringen ergeben sich unterschiedlich optimale Formen und Abstände der Schirmringe bei fest gewählter Gesamtlänge der Anordnung für alle Spulen. Die Stützisolatoren sind in Form von Zweibeinen ausgeführt. Gerippte Isolatoren zeigen experimentell höhere Überschlagnspannungen als glatte Isolatoren. In geringen Volumina (wenige Milliliter) um den oberen Bereich der Stützisolatoren wurden in 3D-Modellen Überschreitungen der anvisierten maximalen Feldstärkewerte entlang von Grenzschichten berechnet. Maximale Feldstärke und Volumina der Überschreitung des 3,8-kV/mm-Zielwertes sind dabei abhängig von der relativen Dielektrizitätszahl des Isolierstoffes. Zur Überprüfung der berechneten Ergebnisse empfiehlt das ITEP eine experimentelle Überprüfung.

Kontakt: stefan.fink2@kit.edu

### HTS SCHALTEN

Eine vielversprechende Anwendung für REBCO-Bandleiter ist das supraleitende

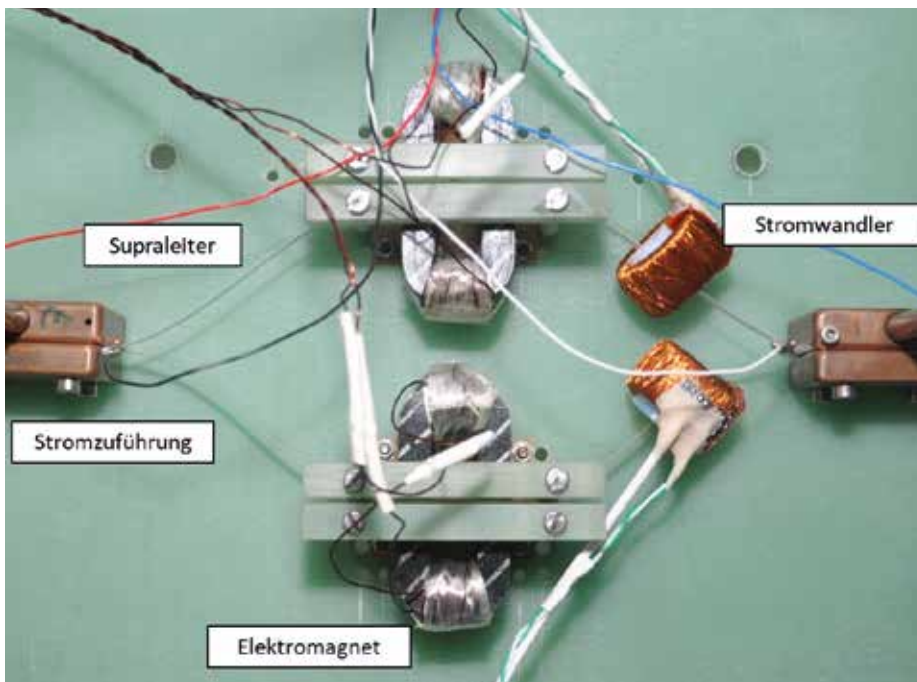


Abb. 2: HTS-Schaltungsaufbau zur Charakterisierung.

Schalten. Dabei wird der dynamische Widerstand genutzt, der auftritt, wenn sich der Supraleiter in einem magnetischen Wechselfeld befindet. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden mehrere Schalter aufgebaut und grundlegend charakterisiert (Abbildung 2). Zur Erhöhung des resultierenden Widerstands wurden u. a. verschiedene normaleitende Materialien des Bandleiters entfernt und auf elektrische Stabilität und Verträglichkeit mit flüssigem Stickstoff getestet. Der nächste Schritt ist das Aufbauen einer Schaltung mit mehreren supraleitenden Schaltern.

#### BMWK-PROJEKT HIGHAMP

Im Rahmen des Projekts HighAmp werden am ITEP Teilkomponenten für einen 20-kV-Kabeldemonstrator ausgelegt und getestet. Ziel des Projektes ist der Ersatz bestehender Kabel in innerstädtischen Energieverteilungsnetzen durch Systeme mit höherer Leistungsübertragung. Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) kommen zum Einsatz, um die Stromtragfähigkeit zu verbessern. Eine Erhöhung der Hochspan-

nungsfestigkeit und Kühlung soll durch unterkühlten flüssigen Stickstoff erreicht werden. Im Rahmen des Projektes soll ein Demonstrator für ein dreiphasiges HTS-Kabel aufgebaut werden. Nach Projektbeginn am 1. September 2022 wurde zunächst eine Anforderungsliste für das Kabel erstellt. Für zwei alternative HTS-Leiterkonzepte (CORC und CroCo) wurden Stromtragfähigkeit und Wechselstromverluste berechnet. Anhand der Daten wurde die Spezifikation für den gewünschten HTS-Leiter (CORC) erstellt. Ein erstes Konzept für die Kühlung von 1 km Kabellänge wurde auf Basis der berechneten Verluste erstellt.

Parallel wurde mit dem Aufbau eines prüfungsspezifischen Teststands im Hochspannungslabor begonnen.

#### BMWK-PROJEKT DEMO200

Im Projekt DEMO200 wird ein supraleitendes Hochstromsystem für einen Gleichstrom von 200 kA entwickelt. Nach den erfolgreichen Tests von 20 kA-Teilleitern 2021 wurden in Zusammenarbeit mit den

Projektpartnern Vision Electric Superconductors und Messer Vorbereitungen für den Test einer druckdichten Durchführung und zweier 20-kA-Stromzuführungen in gepumptem Stickstoff getroffen. Hierfür wurde ein Kryobehälter aufgebaut, eine DC-Stromversorgung für einen Strom von 21 kA aufgerüstet und erste Kühlvorgänge mit einem Dummy anstatt Prüfling durchgeführt. Ziel des für 2023 geplanten Kombitests ist die Überprüfung der Funktionalität der einzelnen Komponenten und der Nachweis der Temperaturschichtbildung im unterkühlten Stickstoff.

Kontakt: andrej.kudymow@kit.edu

#### BMWK-PROJEKT ROWAMAG

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



Abb. 3: In das Kühlschild eingebaute Spule und Stromzuführung.

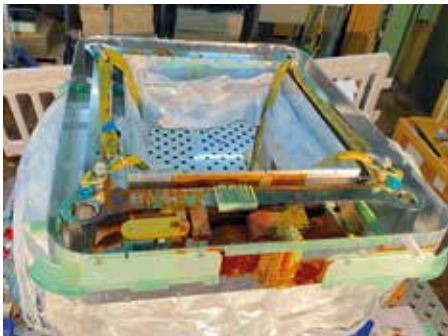


Abb. 4: Mit MLI isoliertes Kühlschild.

Bültmann und Beck Maschinenfabrik integrierte das ITEP 2022 die supraleitende Spule in das Gehäuse. Die Spule, die Stromzuführungen und der Kaltbus wurden in das Kühlschild eingebaut (Abbildung 3) und danach mit MLI (Multi-Lagen-Isolation, Abbildung 4) gegen Wärmestrahlung isoliert. Der Zusammenbau wird 2022 abgeschlossen und der Magnet 2023 erstmals mit dem Kleinkühler auf die Betriebstemperatur von 20 K abgekühlt.

Kontakt: ralph.lietzow@kit.edu

## MODELLIERUNG VON SUPRALEITERN UND KOMPONENTEN

### AC-VERLUSTE

Zum Vergleich mit Modellvorhersagen wurde ein neuer Versuchsaufbau zur Messung der Wechselstromverluste von Hochtemperatur-Supraleiterspulen (HTS) entwickelt (Abbildung 5). Die Methode basiert auf der Messung der Durchflussmenge des aufgrund der Verluste verdampften Stickstoffs. Dabei wird der Stickstoff mithilfe eines 3D-gedruckten Blasensammlers erfasst und in einen Strömungssensor geleitet. Zur Minimierung des in die Messkammer einfallenden Wärmestroms wird ein „Box-inside-a-Box“-Ansatz verwendet, bei dem die mit  $\text{LN}_2$  gefüllte Messkammer in eine kryogene Umgebung eingebettet wird. Die von der Umgebung einströmende Wärme wird in den Raum zwischen äußere

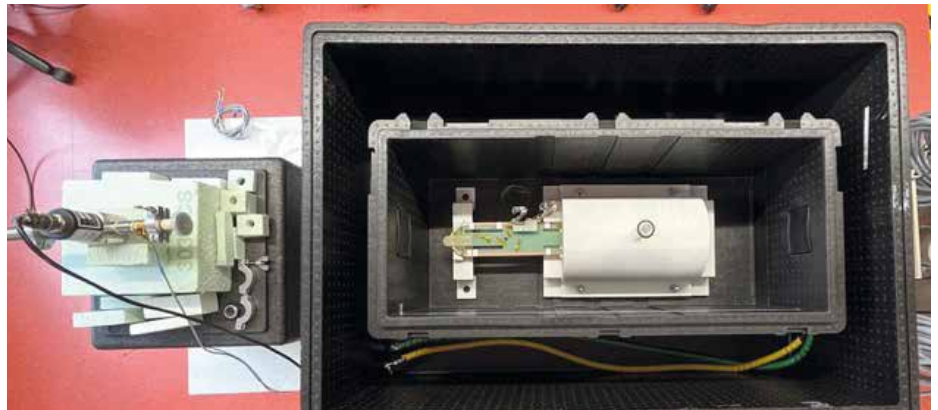


Abb. 5: Draufsicht auf den Versuchsaufbau zur Messung der Wechselstromverluste mit kalorimetrischer Technik. Die eine Hälfte der HTS-Racetrack-Spule ist in der Mitte des Bildes zu sehen. Die andere Hälfte ist durch den weißen Behälter abgedeckt, der den verdampften Flüssigstickstoff auffängt.

rer und innerer Box geleitet, wodurch das Rauschen und die Wärmeübertragung im inneren Teil des Aufbaus reduziert werden.

Eine statistische Analyse der Ergebnisse, basierend auf dem Standardlastzyklus, der Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung, ermöglicht die Bewertung der Variabilität der Messungen und die Angabe der Ergebnisse als Mittelwert und Unsicherheitsbereich. Die Kalibrierung und die Reproduzierbarkeit der Messungen

wurden über mehrere Wochen mit einer Reihe von Widerständen unter verschiedenen Bedingungen überprüft. Die AC-Transportverluste einer Rennbahnschule für eine elektrische Maschinenanwendung wurden gemessen und mit 3D-Simulationsergebnissen auf der Grundlage eines neu entwickelten numerischen Modells verglichen, das auf der T-A-Formulierung der Maxwell-Gleichungen basiert (Abbildung 6). Zur Vorhersage des elektromagnetischen Verhaltens großer Spulen wurde ein auf der

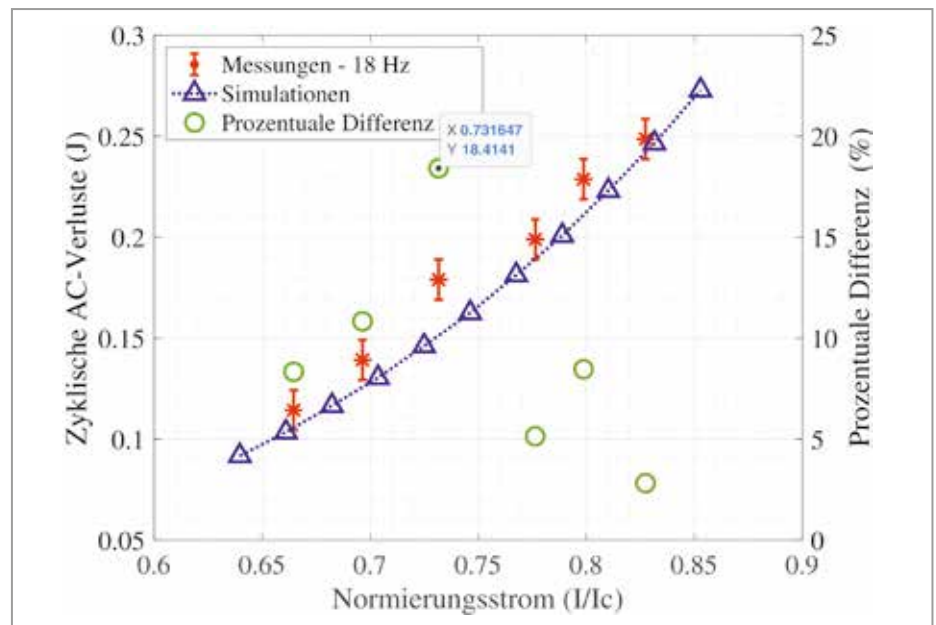


Abb. 6: AC-Transportverluste einer HTS-Racetrack-Spule: Vergleich von Simulation und Messungen.

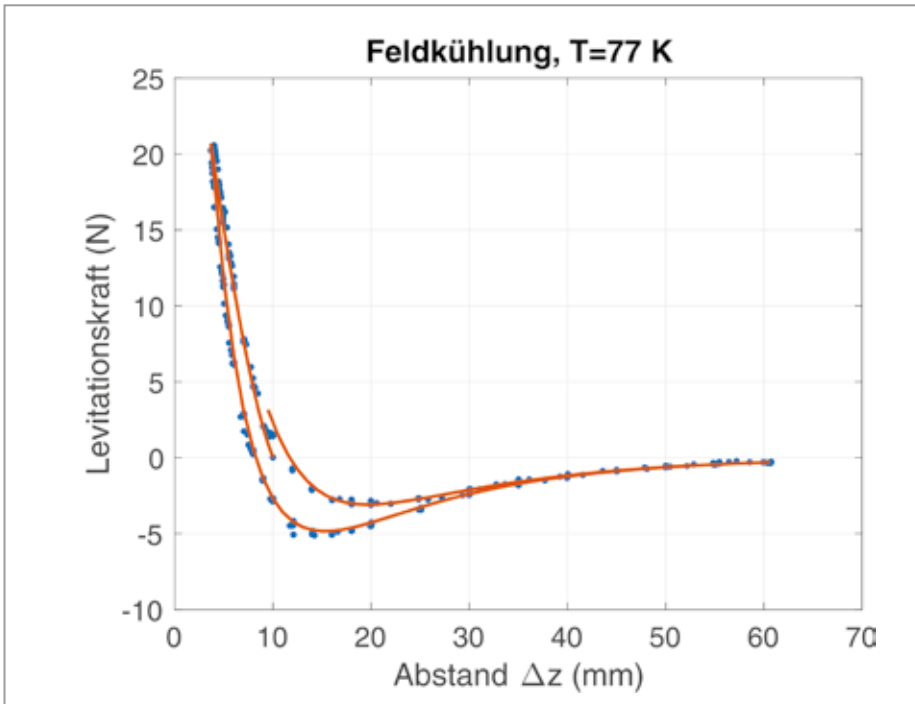


Abb. 7: Vergleich von Messungen der Levitationskraft zwischen einem Permanentmagneten und einem Stapel von HTS-Bändern mit Simulationen.

Finite-Elemente-Methode basierendes Modell vorgeschlagen, das die T-A-Formel mit einer elektrischen Schaltung verbindet: Das Modell stellt die supraleitende Komponente als globalen Spannungsparameter in der elektrischen Schaltung dar. Dies ermöglicht die Bewertung des Gesamtverhaltens komplexer HTS-Systeme, die mehrere Leistungselemente umfassen, während gleichzeitig ein hohes Maß an Präzision bei der Darstellung lokaler Effekte erhalten bleibt.

Dreidimensionale numerische Simulationen auf der Grundlage der MEMEP-Methode

(Minimum Electro-Magnetic Entropy Production) wurden verwendet, um die Schwebkraft zwischen einem Permanentmagneten und einem Doppelstapel von HTS-Bändern vorherzusagen. Die MEMEP-Methode ist wesentlich effizienter als herkömmliche, auf kommerzieller Software basierende Ansätze. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für die berechnete und die von evico GmbH gemessene Levitationskraft als Funktion des Abstands zwischen dem Permanentmagneten und dem HTS-Doppelstapel. Das Modell berücksichtigt die Abhängigkeit von  $J_c$  vom Magnetfeld und auch dessen räumliche Un-

gleichmäßigkeit entlang der Breite des Bandes. In dem dargestellten Beispiel liegt die Differenz zwischen Simulationen und Messungen unter 0,5 %.

Kontakt: francesco.grilli@kit.edu

### ECHTZEIT-SYSTEMINTEGRATION

Die Gruppe Echtzeit-Systemintegration befasst sich mit der Modellierung, Steuerung und experimentellen Validierung von Hochenergietechnologien. Der Schwerpunkt liegt insbesondere auf der Entwicklung neuer effizienter Echtzeitmodelle dieser Energietechnologien, die experimentell validiert sind und das Hardwareverhalten mit höchster Detailgenauigkeit wiedergeben können.

Um die experimentellen Testkapazitäten zu erhöhen, wurde, wie in der Helmholtz-Nachwuchsgruppe „Hybrid Networks“ geplant, eine erste Hardware-in-the-Loop Evaluierung des asynchronen Netzkonzepts mit doppelter Leistung realisiert. Die asynchrone Verbindung zweier Verteilnetze erfordert eine realistische Leistungsbewertung sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite der leistungselektronischen Umrichter. Wie in Abbildung 8 zu

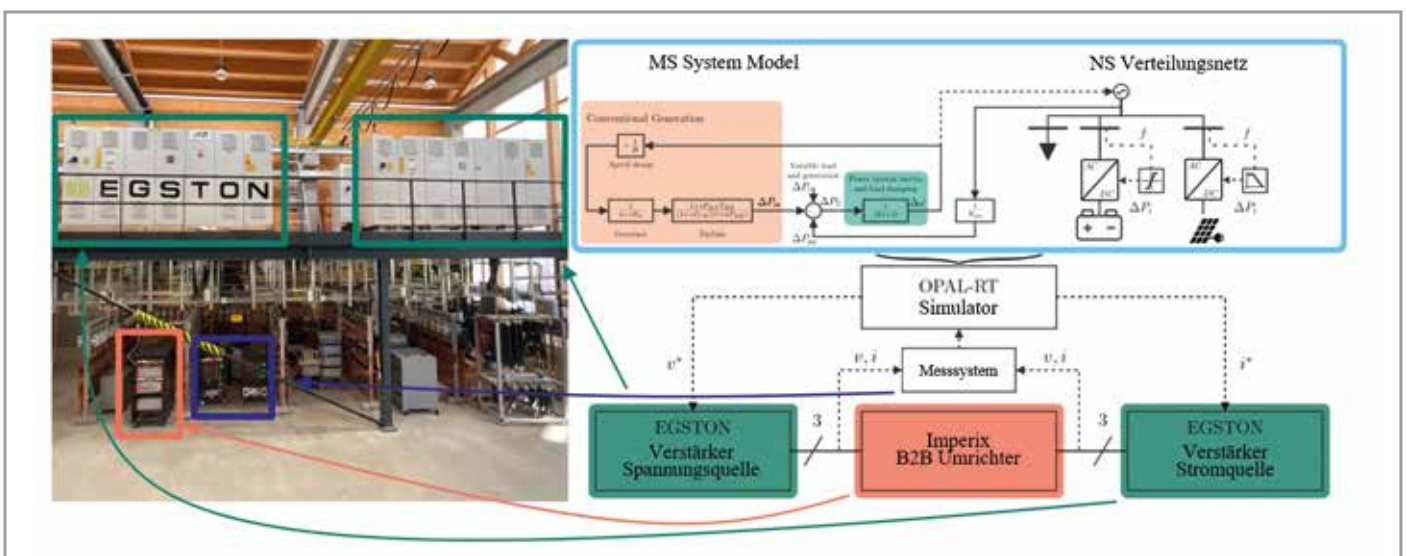


Abb. 8: Double-Power-Hardware-in-the-Loop Einrichtung für asynchronen Netze.



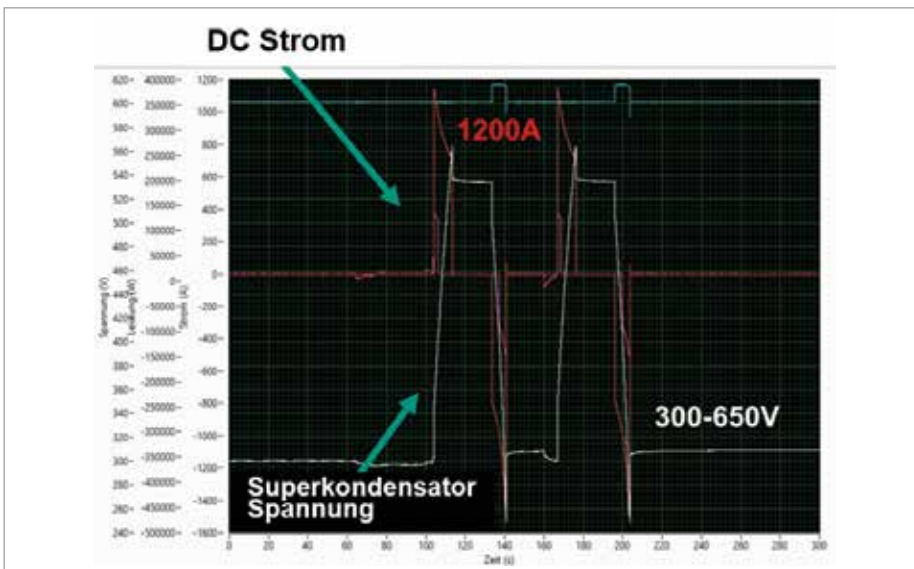


Abb. 9: Gleichspannung (weiße Linie) und Gleichstrom (rote Linie) des Superkondensator-Energiespeichersystems während des PHIL-Tests.

sehen ist, wurden zwei Leistungsverstärkergruppen eingesetzt, um die Primär- und Sekundärseite des Netzes zu emulieren (in Echtzeit in einem OPAL-RT-Simulator emuliert), und mit einem Back-to-Back-Konverter von Imperix verbunden. Dieser Aufbau ermöglicht es, neue Regelungsstrategien für asynchrone Netze mit hoher Genauigkeit und Wiederholbarkeit zu testen. In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung konnte ein klassisches Verteilernetz in einen aktiven Prosumer umgewandelt werden, der in der Lage ist, die verbrauchte Leistung durch kontrollierte Frequenzvariation aktiv zu verändern. Dies ermöglicht eine direkte Laststeuerung, ohne dass eine erweiterte Kommunikationsinfrastruktur erforderlich ist.

Im Dezember 2022 wurde das im Rahmen des BMWi-Projekts „Flygrid“ geplante Superkondensator-Energiespeichersystem mit 500 kW und 1,6 kWh in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um ein gemeinsames Projekt von ITEP und ETI, das das Potenzial von Superkondensatoren bei der Bereitstellung von Hilfsdiensten für das Verteilernetz wie Spannungs- und Frequenzregelung demonstrieren soll. Es wurden erste Tests durchgeführt, bei denen das Superkondensatorsystem für eine PHIL-Bewertung in den Kreislauf eingeschlossen wurde. Wie in [Abbildung 9](#) zu sehen ist, hat der Superkondensator eine schnelle Reaktionszeit (weniger als 50 ms) bei der Aufnahme und Einspeisung von Strom (bis zu 1200 A) und eine Gesamtenergieverfüg-

barkeit bei voller Leistung von etwa 40 Sekunden. Diese Art von Leistungs-/Energieverhältnis ist besonders geeignet für die Bereitstellung von Stromqualitätsdiensten, z. B. die Kompensation von Niederspannungssituationen im Netz, die bis zu Hunderten von Millisekunden dauern können.

Ein wichtiger Schritt in die multimodale Richtung ist die Entwicklung und Erprobung eines thermischen Emulators, der eine wichtige Rolle in dem im Projekt „Hybrid Network“ geplanten multimodalen Hardware-in-the-Loop Konzept spielen wird. Der thermische Emulator ([Abbildung 10a](#)) ist in der Lage, die externe Temperatur, den Druck und den Massenstrom mittels Kühl- und Heizsystemen zu steuern. Es wurden erste Tests durchgeführt, um die beste Regelungsstrategie zu ermitteln ([Abbildung 10b](#)). Es wurden zwei Strategien zur Steuerung des Massendurchflusses vorgeschlagen: die Regelung einer externen Pumpe oder die Änderung der Ventilöffnung. Aufgrund der mechanischen Beschränkungen zeigen die ersten Tests, dass die Pumpe eine schnellere und granularere Steuerung durchführt (siehe gestrichelter grüner Bereich in [Abbildung 10b](#)) als die Steuerung über das Ventil.

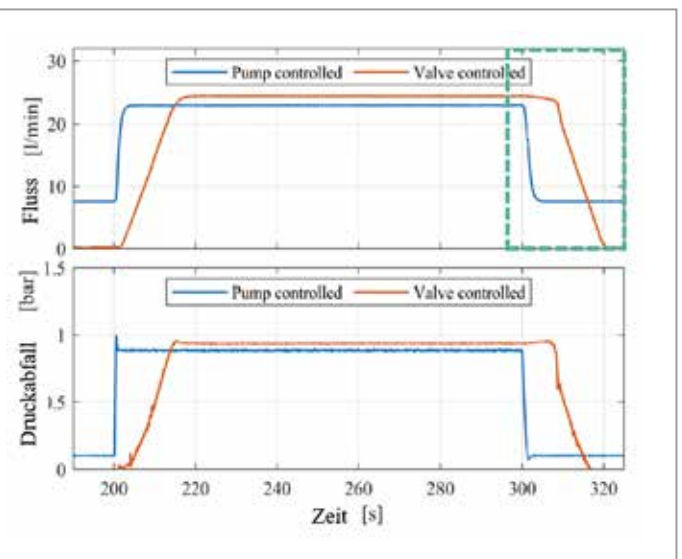


Abb. 10: Thermal-Hardware-in-the-Loop: (a) Versuchseinrichtung (links), (b) Steuerungsoptionen für den Massendurchfluss (rechts).

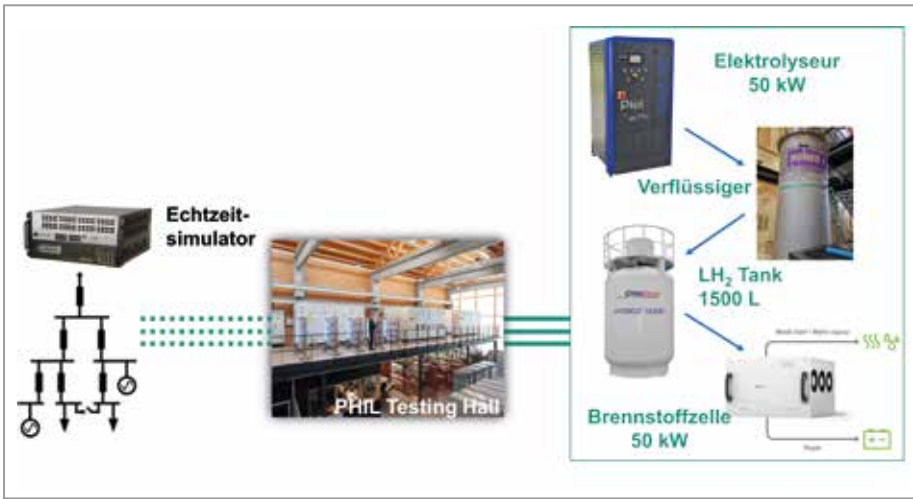


Abb. 11: Grundschemata des H<sub>2</sub>-in-Loop Labors (von links nach rechts): digitaler Echtzeitsimulator, PHIL-System, Elektrolyseur, Wasserstoffverflüssiger, Flüssigwasserstoffspeicher und Brennstoffzellen.

Der thermische Emulator wird 2023 in den Stromversorgungsaufbau integriert, was den ersten Schritt zur experimentellen Bewertung der multimodalen Hardware im Kreislauf ermöglicht.

Ein innovativer Hardware-in-the-Loop Aufbau für die Stromversorgung wird derzeit im Energy Lab 2.0 aufgebaut, in dem wasserstoffbasierte Technologien unter realistischen Netzbedingungen getestet werden können (Abbildung 11). Das H<sub>2</sub>-in-Loop Labor besteht aus einem alkalischen Elektrolyseur, einem Verflüssigungssystem, einem Flüssigwasserstoffspeicher und Brennstoffzellen. Im Gegensatz zu klassischen Wasserstoffversuchsanlagen wird das H<sub>2</sub>-in-Loop Labor mit dem 1MVA-PHIL-System verbunden, um experimentell die realen Netzbedingungen zu reproduzieren, unter denen die zukünftigen Wasserstoffenergieanlagen arbeiten werden. Das H<sub>2</sub>-in-Loop Labor wird sich insbesondere auf die Validierung ihrer Leistung bei der Bereitstellung von Hilfsdiensten für das Stromnetz konzentrieren, vor allem auf die Unterstützung der Frequenzregelung bei großen Störungen.

Im Projekt SuperLink wird ein 12 km langes Supraleiterkabel ein Kraftwerk am südlichen Stadtteil in München mit einem Umspannwerk im Norden verbinden, das an das

deutsche Hochspannungsübertragungsnetz angeschlossen ist (Abbildung 12).

Der Einfluss des Kabels im Münchener 110-kV-Verteilnetz wurde vom ITEP untersucht. Dazu wurden vier verschiedene Einspeiseszenarien betrachtet und drei Lastszenarien analysiert. Auch der Ausfall der beiden vorhandenen Verbindungen zum Übertragungsnetz wurde berücksichtigt.

Insgesamt wurden 66 Netzwerkszenarien untersucht. Generell wurde festgestellt, dass das SuperLink-Kabel zur Entlastung

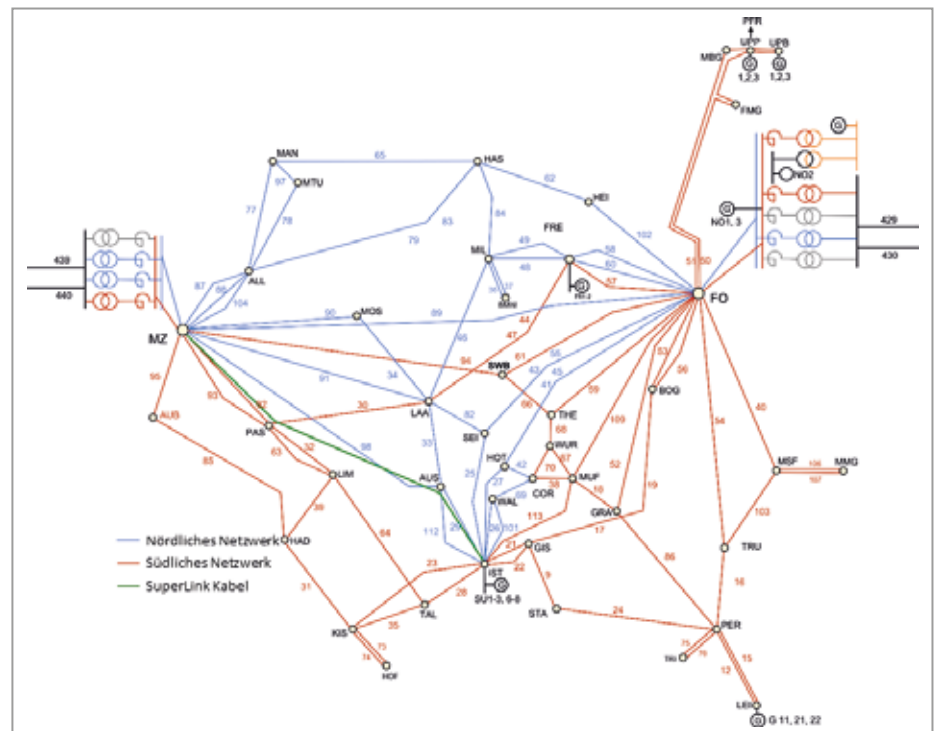


Abb. 12: Elektrisches Verteilungsnetz der Stadt München mit Anbindung an die Fernübertragung und geplanter Trassenführung der HTS-Kabel (grün).



# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Blick vom Computerkontrollplatz (Monitor mit Kamerasystem in der unteren Bildhälfte) in die Roboterzelle während des Wickelprozesses von HTS-Spulen großer Präzision für das MEEEST-Projekt (mehrere Forschungsfelder- und -themen beteiligt) unter Mitwirkung aller drei Roboter (Teilprozess). Das robotische Wickeln erlaubt ein einfaches Nachjustieren durch Experten, um Materialunzulänglichkeiten kontrolliert auszugleichen.

# Supraleitende Magnettechnologie

Koordination: Prof. Dr. Tabea Arndt

2022 wurde in diesem Forschungsfeld geprägt durch eine besondere Zusammenarbeit über die einzelnen Forschungsthemen hinweg. So konnten die spezifischen Expertisen der Forschungsthemen koordiniert in Projekten und zum Wissensaustausch genutzt werden.

Die drei Forschungsthemen

- „Spulen- und Magnettechnologie“,
- „Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion“ und
- „Rotierende Maschinen“

haben 2022 u. a. in den Aktivitäten von SupraGenSys-Projekt, MEESS-Projekt AppLHy!-Projekt und institutsübergreifenden Arbeiten (Bachelorarbeit zu HTS-Gyrotron-Magneten, PhD-Arbeit zu Beschleunigermagneten) zusammengewirkt.

Als besonderen Erfolg, der durch Mitwirkung vieler KIT-Institute und externer Partner ermöglicht wurde, ist die Gewinnung des Sonderforschungsbereichs „Hyperion“ zur Entwicklung von miniaturisierten HTS-Magneten für Spezialanwendungen der NMR-Technologie. In Hyperion arbeiten die Forschungsfelder Supraleiter- und Kryomaterialien und Supraleitende Magnettechnologie insbesondere im Projekt A01 zusammen. Das folgende Logo repräsentiert den Sonderforschungsbereich.



## SPULEN- UND MAGNETTECHNOLOGIE

### ROBOTISCHE WICKELTECHNIK

Anwendungen mit supraleitenden Spulen erfordern zunehmend komplexe, echt dreidimensionale Wickelgeometrien. Diese können nicht mehr ohne Weiteres per Hand und die üblichen Drehmaschinen gefertigt werden. Um diesen Bedarf zu bedienen, wurde 2020 und 2021 eine selbstkonzipierte Anlage zum robotischen Wickeln aufgebaut. Der Spulenkörper wird

von einem dreh- und schwenkbaren Werkstückpositionierer gehalten und orientiert. Zwei nicht kollaborative Roboter verwickeln den Supraleiterdraht. Die Drahtführung erfolgt durch eine sogenannte Wickelhand, die die Vorratsspule aufnimmt und über einen Servomotor und Zugkraftsensor die Drahtspannung auf dem Sollwert hält. Für eine maximale Flexibilität der Drahtführung können sich die beiden Roboter die Wickelhand gegenseitig übergeben und abwechselnd führen. Die Wickeltrajektorie – d. h. der eigentliche Wickelvorgang – wird mit einem digitalen Zwilling der Roboterzelle zuvor programmiert und simuliert.

2022 wurden u. a. nachfolgende Details in der Roboterzelle verfeinert:

- 1) Für eine perfekte Wicklung ist es essenziell, dass die Zelle exakt vermessen ist, d. h., dass die relativen Positionen der Roboter, des Positioniertisches sowie sonstiger Werkzeuge und Ablagen exakt bekannt sind. Um dies zu gewährleisten, wurde die Zelle mit einem Laser-Triangulationssystem auf ca.  $\pm 0,2$  mm Genauigkeit kalibriert. Mit diesem System kann die Zelle – z. B. bei Modifikationen – jederzeit neu kalibriert werden.
- 2) Die Zugkraftsteuerung erfolgt über eine spezifisch programmierte PID-Regelung. Um Spitzen in der Zugkraft zu vermindern, wurden die Parameter optimiert. Dabei zeigt sich, dass die beim Abwickeln der Vorratsspule geänderte Geometrie (Wickelradius bzw. Hebelarm) und Masse des Supraleitervorrats (ca. Faktor 3) die PID-Parameter deutlich beeinflussen.
- 3) Beim Wickeln im Automatikmodus dürfen sich keine Personen in der Wickelzelle befinden. Um trotzdem das Wickelbild des Drahtes zu kontrollieren, wurde ein entsprechendes Kamerasystem installiert.

Mit der so optimierten Zelle wurde eine erste scheibenförmige Pancake-Wicklung mit 40 Windungen aus HTS-Supraleiterdraht gefertigt. Dabei umkreiste einer der Roboter mit der Wickelhand den ortsfest auf dem Werkstückpositionierer montierten Spulenkörper und wickelte den bandförmigen Draht lagenweise auf. Die so gefertigte Spule wurde anschließend in der Vakuum-Druck-Imprägnierungsanlage (VPI) mit Epoxidharz vergossen (siehe nachfolgenden Abschnitt und [Abbildung 1](#)).



Abb. 1: Vergossene HTS Pancake-Wicklung (rechts) mit Vergussform (links).

### KÜHLKONZEPT: THERMOSIPHON MIT EINEM KRYOKÜHLER

Aufgrund der relativ hohen kritischen Temperatur der HTS ist bei energietechnischen Anwendungen eine Kühlung mit flüssigem Helium, dessen Bereitstellung äußerst kostenintensiv ist, nicht erforderlich. Stattdessen bietet sich eine trockene Kühlung mit Kryokühlern an. Üblicherweise werden diese mit massivem Kupfer an das zu kühlende Objekt angekoppelt und über Wärmeleitung dessen thermische Energie abgeführt. Weitaus innovativer und mit höherer Wärmeübertragung kann dies mittels Thermosiphons (Heatpipes) erfolgen. Ein Thermosiphon besteht prinzipiell aus einem Rohr, einem Verdampfer und einem Kondensator und enthält eine geringe Menge eines Kryogens; in diesem Fall Neon. Das zu



Abb. 2: Einsatz (links) und Schaltschrank (im Aufbau, rechts) des Heatpipe-Teststandes.

kühlende Objekt und der Kaltkopf des Kryokühlers sind über den Thermosiphon miteinander verbunden. Das verflüssigte Kryogen verdampft am Objekt und strömt zum Kondensator, wo es wieder verflüssigt. Durch den Stoffstrom und die Phasenübergänge erfolgt eine äußerst effektive Wärmeabfuhr. Der Aufbau eines Versuchsstandes zur grundlegenden Untersuchung dieser Kühltechnik wurde 2022 weiter vorangetrieben. Nachdem 2021 die Konstruktion und Fertigung der mechanischen Teile erfolgte, wurde nun mit der elektrischen Versorgung der Anlage begonnen. Ein umfangreicher Schaltschrank mit Komponenten zur Steuerung der Pumpen, Heizungen etc. und Erfassung von Messgrößen – z. B. Temperaturen und Drücke – befindet sich derzeit im Aufbau (Abbildung 2). Die Inbetriebnahme der Anlage und erste Versuche sind für 2023 geplant.

### 30-K-TESTSTAND

Mit dem zunehmenden Bedarf an supraleitenden Komponenten geht die Notwendigkeit einher, diese zu testen. Zu diesem Zweck wurde 2022 mit dem Aufbau eines entsprechenden Teststandes begonnen. Mit dem Testbed wird es möglich sein, größere (ca. 1,5 m x 1 m) strombeaufschlagte supraleitende Komponenten ohne Hintergrundfeld bei Temperaturen von 30 K und höher mit Strömen bis 3000 A zu untersuchen. Die Kühlung erfolgt kryogenfrei mittels dreier Kryokühler; zwei für die Stromzuführungen und einen für die zu testende Komponente.



Abb. 3: Stand des Aufbaus des 30-K-Teststandes Ende 2022.

2022 wurde der Kryostat der Anlage in der Grube installiert und mit dem Aufbau der notwendigen Infrastruktur begonnen. Es wurde die elektrische Versorgung des Laborplatzes installiert, ebenso die Versorgung mit Kühlwasser. 2023 soll der Aufbau des Teststandes komplettiert und dessen Betriebsbereitschaft hergestellt werden. **Abbildung 3** zeigt den Stand des Aufbaus Ende 2022.

### MEESSST-PROJEKT

Im Rahmen des EU-Projektes MEESSST („Magnetohydrodynamic Enhanced Entry System for Space Transportation“) wurde am ITEP ein Magnet konzipiert und gefertigt, der für Experimente in den Plasmakanälen des Instituts für Raumfahrtssysteme der Uni Stuttgart und des Von Karmann Instituts in Brüssel eingesetzt werden soll. Der MEESSST-Magnet besteht aus fünf einzelnen, nicht isolierten Pancake-Spulen (PCS, **Abbildung 4**), die über Leitungskühlung auf eine Temperatur von 30 K gekühlt werden.

Aufgrund der begrenzten Länge der von Theva gelieferten Leiter mussten verschiedene Arten von Kontakten entwickelt und qualifiziert werden:

- Verbindung zweier Leiter innerhalb einer Pancake-Wicklung
- Verbindung zweier Pancake-Wicklungen, innen
- Verbindung zweier Pancake-Wicklungen, außen
- Verbindungen der Stromzuführungen mit den beiden äußeren Pancake-Wicklungen

Die an Kurzproben in LN<sub>2</sub> gemessenen Kontaktwiderstände für Brückenverbindungen der 4 mm breiten REBCO-Bandleiter

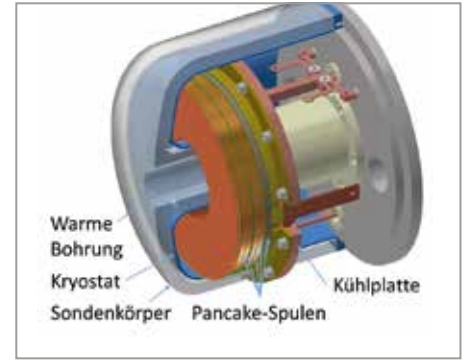


Abb. 4: MEESSST-HTS-Magnet mit Kryostat und Sondenkörper.

lagen im Bereich von 90 bis 175 nΩ, sodass die im Magnet zu erwartenden Verluste bei einem Strom von 100 A etwa in der Größenordnung von 1 bis 2 mW pro Brückenkontakt liegen. Im Monat 11/2022 wurde der MEESSST-Magnet mithilfe der am ITEP installierten Roboter gewickelt (**Abbildung 5**).



Abb. 5: Robotisches Wickeln des HTS-Magneten für das MEESSST-Projekt.

Die räumliche Verteilung des maximalen, bei  $I \approx I_c$  zu erwartenden Magnetfeldes wurde mithilfe von winkelabhängigen  $I_c(B,T)$ -Daten berechnet und ist in **Abbildung 6** dargestellt. An den inneren Wicklungen des Magneten wird ein Feld von etwa 5,5 T erreicht. Auf der Oberfläche des Sondenkörpers erreicht das Magnetfeld beim Maximalstrom einen Wert von etwa 2 T.

Parallel zur Herstellung des Magneten wurde ein Datenerfassungssystem aufgebaut und die Steuerung des Magneten programmiert. Magnettests in der

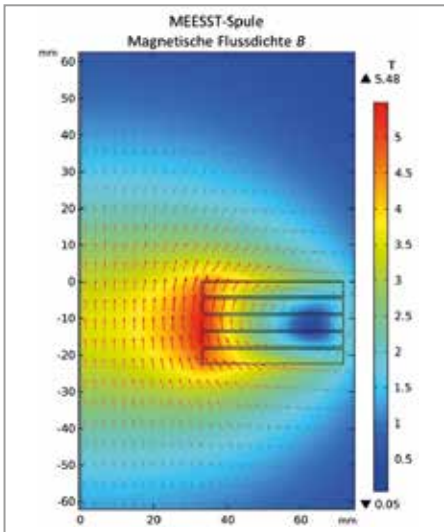


Abb. 6: Berechnete magnetische Flussdichte  $|B|$  des MEESST-Magneten bei  $I=I_c$  ( $T=30$  „K“).

VATESTA-Anlage sind geplant. Im Anschluss an die Magnettests wird der Magnet an den Projektpartner Absolute Systems (Grenoble) geliefert, wo dieser in den Kryostaten und den Sondenkörper eingebaut wird. Erste Plasmaexperimente sind ab dem 2. Quartal 2023 geplant.

Kontakt: frank.hornung@kit.edu

## HOCHSTROMKOMPONENTEN FÜR WASSERSTOFF UND FUSION

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

## QUENCH-UNTERSUCHUNGEN AN HTS-HOCHSTROMLEITERN FÜR FUSIONSMAGNETE

2022 wurde die Fertigung einer hochtemperatursupraleitenden (HTS) Hochstromprobe zur Untersuchung des Quenchs sowie vieler dafür benötigter und neu zu entwickelnder Komponenten vorangetrieben. Die untersuchte Leitergeometrie besteht aus drei verseilten supraleitenden Elementen in einem Stahlgehäuse. Durch Kühlkanäle im Inneren der Probe wird diese mit überkritischem Helium durchströmt und so gekühlt. Im geplanten Experiment müssen orts- und zeitaufgelöst Temperaturen der einzelnen Elemente (Supraleiter, Helium, Stahlgehäuse)

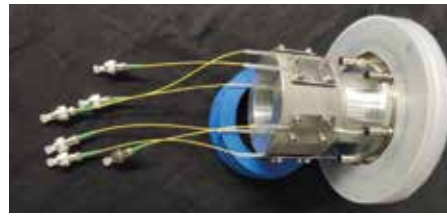


Abb. 7: Vakuumdurchführung für optische Temperatursensoren.

und elektrische Spannungen entlang der Probe gemessen werden. Im Folgenden wird eine Übersicht über einige 2022 abgeschlossene Teilarbeiten aufgezeigt.

## VAKUUMDURCHFÜHRUNG FÜR OPTISCHE TEMPERATURSENSOREN

Zur Messung von Temperaturen im Inneren der Hochstrom-HTS-Quench-Probe sind optische Temperatursensoren vorgesehen, für die eine vakuumdichte Durchführung für den Einsatz am Testobjekt selbst sowie zur Kalibrierung der Faser benötigt wird.

Die realisierte Durchführung ist in [Abbildung 7](#) dargestellt und besteht aus sechs Einzelfaserdurchführungen in einem DN 100 ISO-K-Flansch. Jede Faser verläuft innerhalb eines mit Harz ausgegossenen Edelstahlröhrchens, das dicht mit dem Flansch verbunden ist.

## AUFBAU VON MESSELEKTRONIK FÜR DEN ABNAHMETEST

Für den finalen Abnahmetest der Probe wurde ein neues Messsystem benötigt, das die hohe Kanaldichte der SULTAN-Probe aufzeichnen sowie die unterschiedlichen eingesetzten Sensortypen verarbeiten kann. Hierzu wurde ein mobiles Messsystem in einem 19-Zoll-Rack konzipiert und aufgebaut ([Abbildung 8](#)).

Das Rack beinhaltet einen Messrechner mit Datenerfassungsmodul für die Spannungsmessung an den Widerstandstemperatursensoren und dem supraleitenden Kabel selbst. Der Speisestrom für die Temperatursensoren wird durch zwei Präzisionsstromquellen bereitgestellt. Ein dezidiertes Messsystem für die optischen Temperatursensoren kommuniziert per LAN-Verbindung mit dem Messrechner, der alle Messdaten aufzeichnet. Für Abnahmetests und die Messkampagne selbst wurde eine Patchbox mit



Abb. 8: Mobiles Messrack für den Abnahmetest der Quench-Probe.

D-Sub-Steckkontakten aufgebaut, die auch später für andere Messungen mit hoher Kanaldichte verwendet werden kann. Bei der Kalibrierung der optischen Temperatursensoren von 0 bis 125 °C für die Schweißarbeiten am Probengehäuse sowie zur Temperaturüberwachung beim Schweißen wurde die neue Messelektronik bereits erfolgreich eingesetzt.

## GEHÄUSESCHWEISSUNG

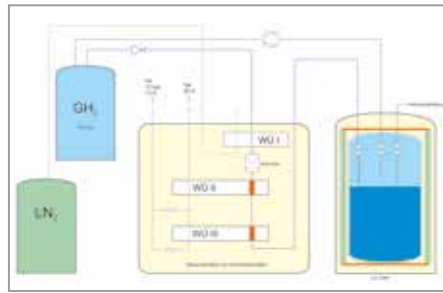
Ende 2022 wurden die Schweißarbeiten am Probengehäuse abgeschlossen. Nachdem die Supraleiter in die Gehäusehalbschalen eingelegt und die zweite Halbschale aufgepresst und angeheftet wurden, wurden die optischen Fasern zur Temperaturmessung eingefädelt und damit die Temperatur während des Schweißens überwacht. Beide Probenbeine wurden simultan geschweißt, sodass immer ein Bein abkühlen und die Temperatur somit effektiv begrenzt werden konnte. Zur Fertigstellung der Probe werden Anfang 2023 die elektrischen Anschlüsse verschlossen, die Sensorik angebracht und die Probe in ihrer Halteklammer montiert.

## APPLHY! – TRANSPORT UND ANWENDUNG VON FLÜSSIGEM WASSERSTOFF

Die Arbeiten zu flüssigem Wasserstoff sind im Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE des BMBF angesiedelt. Hier koordiniert das ITEP die Arbeiten des Verbundes ApplHY! zum Transport und zur Anwendung von flüssigem Wasserstoff und ist selbst an allen Arbeitspaketen des Verbundvorha-

bens beteiligt. Im Verbund wurde 2022 gemeinsam ein Whitepaper-Flüssigwasserstoff erstellt, das Anfang 2023 veröffentlicht wird.

Im Projekt wird am KIT eine Wasserstoffverflüssigungsanlage realisiert. In dieser wird gasförmiger Wasserstoff ( $\text{GH}_2$ ) aus einem Tank entnommen und in mehreren Schritten in Wärmeübertragern auf Kondensationstemperatur abgekühlt. Für die Abkühlung des Wasserstoffs von Raumtemperatur (300 K) auf 80 K wird flüssiger Stickstoff ( $\text{LN}_2$ ) verwendet; für die weitere Abkühlung des Wasserstoffes von 80 K auf ca. 17 K steht eine He-Tiefen-temperaturanlage zur Verfügung. Im Anschluss wird der tiefkalte Wasserstoffmassenstrom in einem Flüssigwasserstofftank mit einem Joule-Thompson-Ventil entspannt und verflüssigt. Von dort kann er in mobile Flüssigwasserstofftransportbehälter umgefüllt und zu Experimenten transportiert werden. Neben der Wasserstoffverflüssigung und Abfüllung in Transportkannen soll auch der Transport des flüssigen Wasserstoffs durch eine Demonstrationspipeline mit einem supraleitenden Kabel untersucht werden. Hierzu kann der aus dem Vakuumbehälter mit Wärmeübertragern abgekühlte Wasserstoffmassenstrom alternativ in einen Pumpenkryostaten entspannt werden und von dort aus die Pipe-



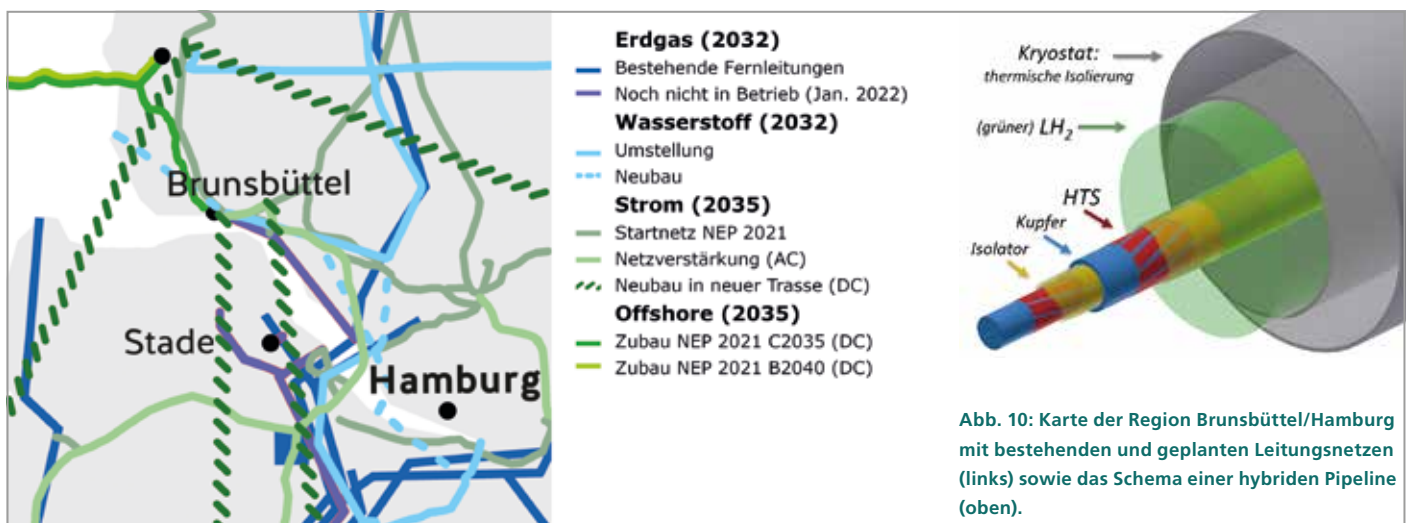
**Abb. 9: Stark vereinfachtes Prozessschema der Wasserstoffverflüssigungsanlage.**

line mit Flüssigwasserstoff versorgen. **Abbildung 9** zeigt ein stark vereinfachtes Prozessschema der Wasserstoffverflüssigungsanlage.

Es wurde 2022 ein detailliertes Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema erstellt und die Hauptkomponenten dimensioniert. Darauf basierend, konnte ein Aufstellungsplanungsentwurf erstellt werden, der derzeit abgestimmt wird.

Zwei 2022 begonnene Doktorarbeiten thematisieren den kombinierten Flüssigwasserstoff- und elektrischen Energietransport in einer gemeinsamen hybriden Pipeline. In einer ersten Arbeit wurden verschiedene Regionen Deutschlands und Europas hinsichtlich vorhandener und geplanter Gas- und Stromnetze sowie Energieflüsse verglichen und die Region Brunsbüttel/Hamburg als attraktives Umfeld für eine detaillierte Studie identifiziert.

**Abbildung 10** zeigt eine Karte der Region Brunsbüttel/Hamburg mit bestehenden und geplanten Leitungsnetzen sowie das Schema einer hybriden Pipeline.



Im Hinblick auf die geplante experimentelle Demonstration des Konzeptes wurden in einer zweiten Arbeit verschiedene Leiteranordnungen und -geometrien vergleichend betrachtet. Um zu bewerten, ob sich die elektrische Leitung im direkten Kontakt mit dem strömenden Wasserstoff befinden muss oder ob eine getrennte Anordnung – und damit verbunden eine schwächere, indirekte Kühlung – ausreichend ist, wurden experimentelle Untersuchungen in Flüssigstickstoff zur thermischen Ankopplung der elektrischen Leitung durchgeführt.

**Abbildung 11** zeigt ein Schema und Foto des experimentellen Aufbaus mit einem Kabelstück, das durch Abstandshalter von den Behälterwänden getrennt ist. Der Zwischenraum wurde mit Heliumgas unterschiedlichen Drucks gefüllt und die stationären Temperaturen des Kabels bei variablen Heizleistungen ermittelt. Die Ergebnisse (**Abbildung 11, unten**) stimmen für nicht zu kleine Helium-Drücke über den gesamten untersuchten Heizleistungsbereich mit empirischen Erwartungen überein und fließen nun in eine detaillierte Kabelauslegung und eine Entscheidungsfindung der im Demonstrator zu testenden Leitungsanordnungen ein.

Weitere Ergebnisse zu Forschungsarbeiten aus dem Projekt AppLHy! finden Sie auch



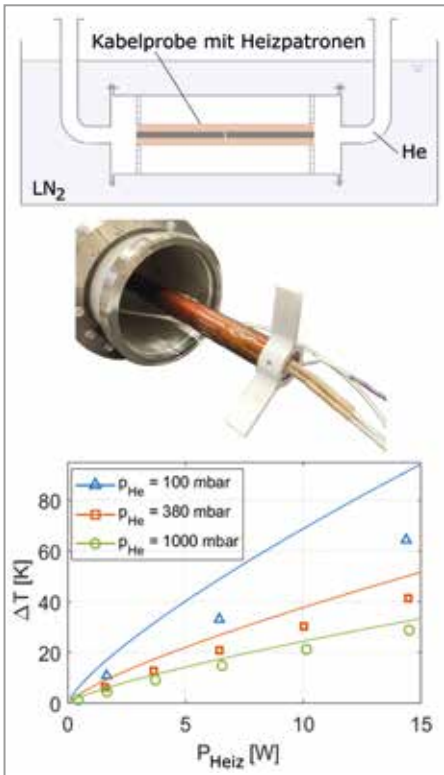


Abb. 11: Schema (oben) und Foto (Mitte) des experimentellen Aufbaus zur Untersuchung der indirekten thermischen Ankopplung der elektrischen Leitung und experimentelle Ergebnisse (unten).

in den Forschungsthemen Struktur- und Funktionsmaterialien für Kryoanwendungen sowie Rotierende Maschinen.

Kontakt: michael.wolf@kit.edu

## ROTIERENDE MASCHINEN

### TESTSTÄNDE FÜR HTS-ROTOREN

Der Aufbau des Teststandes wurde im Projekt „HTS-Geno Testrig“ als strategische Aufbauinvestition der HGF weitergeführt. Ziel ist es, eine Testumgebung zur Entwicklung rotierender supraleitender Motoren und Generatoren bereitzustellen (Abbildung 12).



Abb. 12: Aufbauskitze HTS-Geno Testrig.

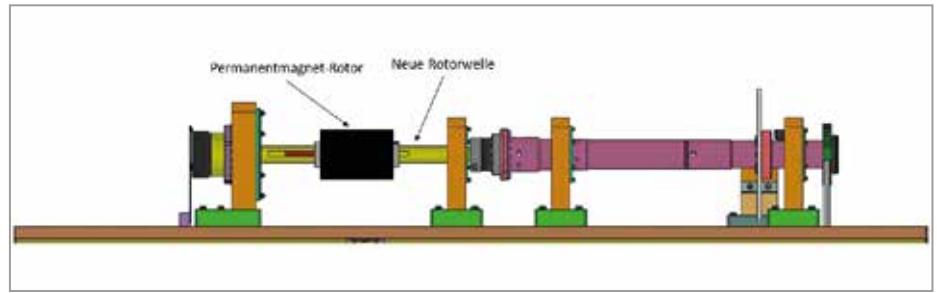


Abb. 13: Zeichnung des Rotationsteststandes samt neuer Welle und Rotor.

Dabei sollen die HTS-Spulen mithilfe eines Thermosiphonkreislaufs mit Neon auf eine Temperatur von 30 K abgekühlt, mit einem Erregerstrom von bis zu 3 kA und mit Rotationsgeschwindigkeiten bis zu 1000 Umdrehungen pro Minute betrieben werden. Das Team führte 2022 die Arbeiten zur Anpassung der Infrastruktur (Anforderungen zur Elektroversorgung, Kälteanlage und Beleuchtung) fort. Die Kryokühler sind eingetroffen, und das Schienensystem ist verlegt. Eine umfangreiche Spezifikation des Vakuumbehälters wurde erstellt. Die Arbeiten zu einem neuen Design des Rotorballens und zu verschiedenen physikalischen Messtechniken sind erfolgt. Durch die enormen Preissteigerungen von Grundmaterialien um bis zu 300 %, die verschlechterte Verfügbarkeit von Komponenten und die sehr langen Lieferzeiten ergeben sich unvorhergesehene äußere Einflüsse und Schwierigkeiten, die ggf. zu Anpassungsmaßnahmen 2023 führen.

Des Weiteren befindet sich am ITEP ein Rotationsteststand zur Charakterisierung nicht planarer supraleitender Spulen im Aufbau. Die Basis des Rotationsteststandes bildet das Gerüst, das dem Institut im Rahmen einer Kooperation mit Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG überlassen wurde. Weitere Komponenten dieses Rotationsteststandes wurden 2022 für den Einbau und den Antrieb des Rotors vorbereitet. Basis für den drehzahlvariablen Antrieb des Rotors bildet eine über einen Frequenzumrichter geregelte Asynchronmaschine mit einer Nennleistung von 4 kW, die den Rotor auf Drehzahlen bis 1000 U/min beschleunigen kann. Der elektrische Aufbau und die Verdrahtung des Antriebs sind bereits erfolgt und warten auf den Einbau des neuen Rotors samt Welle (Abbildung 13).

Kontakt: tabea.arndt@kit.edu;  
mathias.noe@kit.edu

## SUPRALEITENDE GENERATOREN FÜR DIE WINDKRAFT

Für das BMWi-Projekt SupraGenSys wurde ein konzeptionelles Design für ein kryogenes Kältesystem eines vollsupraleitenden 10-MW-Generators für Windkraftanlagen erarbeitet. In einem ersten Schritt wurden verschiedene Ausführungsformen bilanziell miteinander verglichen. Dabei wurde sich für ein Design entschieden, bei dem sowohl Stator als auch Rotor eine Betriebstemperatur von 30 K aufweisen und gänzlich auf ein zwischengekühltes thermisches Schild verzichten. Die Rotorspulen werden mittels rotierender Kleinkühler und einer leitungsgekühlten Anbindung auf Temperatur gehalten. Aufgrund des erhöhten Wärmeeintrags durch die AC-Verluste der Statorspulen wurde hier ein Kühl-Design mit einer forcierten Heliumgaskühlung untersucht. Die Finite-Elemente-Berechnungen zeigen, dass bei Heliumeinlasstemperatur von 28 K, einem statischen Heliumdruck von 20 bar und Massenstromraten oberhalb von 6,3 g/s die Temperaturmarge von 30 K eingehalten werden kann.

Abbildung 14 zeigt das Temperaturprofil im Querschnitt des Spulenkörpers und des Heliumgaskanals mit einem Durchmesser von 10 mm.

Um die Wechselstromverluste in der supraleitenden Wicklung eines Generators für eine Windkraftanlage zu verringern, wurde eine neue Anordnung der Statorspulen vor-

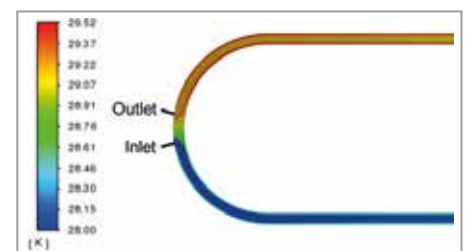


Abb. 14: Temperaturprofil im Querschnitt des Spulenkörpers und Heliumgaskanals.

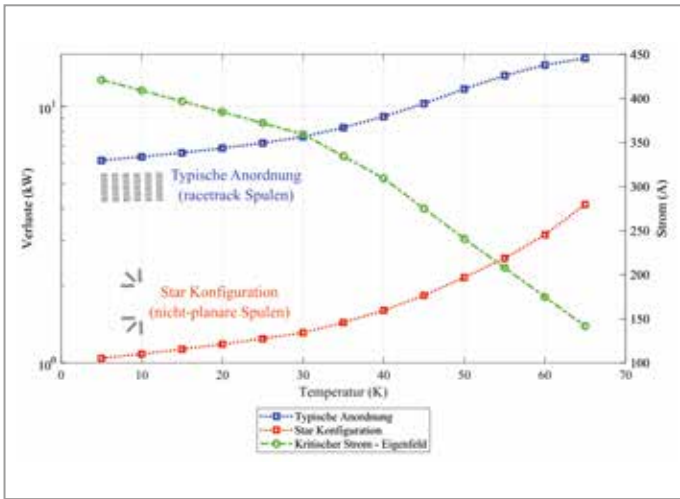


Abb. 15: Vergleich der Wechselstromverluste in der supraleitenden Statorwicklung eines Generators.

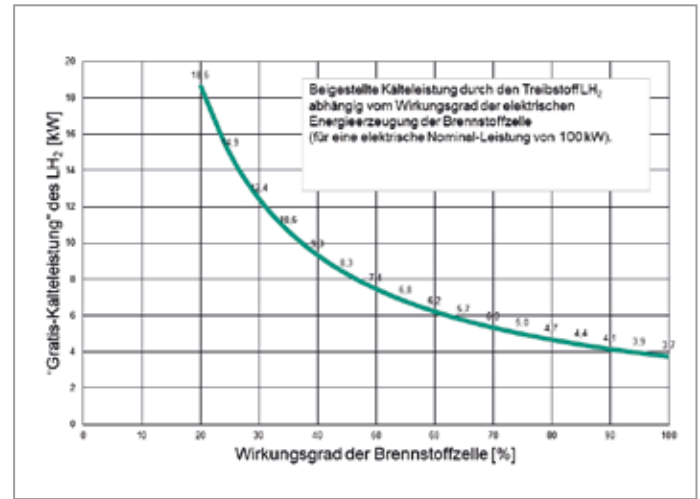


Abb. 17: „Kälteleistung“ des Flüssigwasserstoffs entsprechend dem Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle.

geschlagen. Der Ansatz basiert auf der Ausrichtung der Spulen auf die Magnetfeldorientierung und erreicht eine Reduzierung der Wechselstromverluste in den Statorspulen um 73 %. Abbildung 15 zeigt einen Vergleich der Verluste in der Statorwicklung eines supraleitenden Generators unter Berücksichtigung der typischen Konfiguration (Racetrack-Spulen) und der vorgeschlagenen Anordnung (Sternkonfiguration, nicht planare Spulen).

Diese Abbildung zeigt auch das Verhalten des kritischen Stroms des Bandes im Eigenfeld bei Temperaturabsenkung. Die mit der Sternkonfiguration bei 65 K erzielte Verlustreduzierung kann mit den herkömmlichen Racetrack-Spulen nicht erreicht werden, selbst wenn der kritische Strom des Bandes verdoppelt oder die Betriebstemperatur der Spulen in der typischen Anordnung auf 5 K gesenkt wird.

Es wurde ein Aufbau zur Messung der Wechselstromtransportverluste in supraleitenden Spulen für Windturbinenanwendungen entworfen und gebaut. Zwei Rennbahnschienen wurden bereits gemessen, und die Ergebnisse stimmen mit einem neuen Modellierungsansatz überein, der zur Untersuchung von Spulen mit komplexen Geometrien entwickelt wurde und auf der Homogenisierung der T-A-Formulierung in 3D beruht. Diese Ergebnisse unterstützen und fördern die Entwicklung nicht planarer Spulen für Anwendungen in elektrischen Maschinen, die eine erhebliche Reduzierung der Wechselstromverluste ermöglichen.

### ANTRIEBSSTRÄNGE IN VERBINDUNG MIT FLÜSSIGWASSERSTOFF (LH<sub>2</sub>)

In Verbindung mit dem Forschungsthema „Hochstromkomponenten für Wasserstoff und Fusion“ wurden neue Topologien für vollsupraleitende Motoren (Rotor- und Statorwicklungen mit HTS) untersucht. Insbesondere für kompakte, leistungsstarke Maschinen bietet das DUDA-Konzept mit Luftspaltwicklung (Eisen nur zur Führung des externen Magnetflusses) neue Optionen. Die Nutzung der beigestellten Kälte des LH<sub>2</sub> erlaubt einen besonders vorteilhaften Einsatz des DUDA-Konzeptes mit der hohen Anzahl (resistiver) Kontakte, deren Wärmeeintrag dann leicht abgeführt werden kann. Die Antriebsstränge verschiedener Fahrzeugtypen, beruhend auf LH<sub>2</sub> als Treibstoff und einer Brennstoffzelle zur elektrischen Energieerzeugung, wurden analysiert.

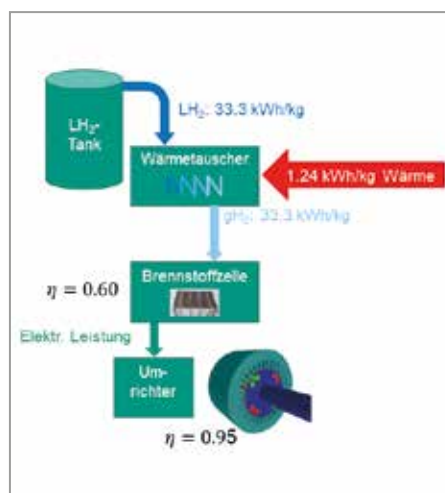


Abb. 16: Brennstoffzellen-elektrischer Antriebsstrang mit dem Treibstoff Flüssigwasserstoff.

Abbildung 16 zeigt die den grundsätzlichen Aufbau eines solchen Antriebsstranges. Aus Abbildung 17 wird deutlich, dass die Höhe der beigestellten „Gratis-Kälteleistung“ abhängig vom Wirkungsgrad der Brennstoffzelle ist: Je niedriger die Effizienz der elektrischen Energieerzeugung in der Brennstoffzelle, desto mehr (zunächst kalter) Treibstoff LH<sub>2</sub> muss zugeführt werden.

Im Gesamtsystem wird deutlich, dass sich bis zu ca. 6 Prozentpunkte an Effizienzgewinn realisieren lassen (Tabelle 1) 6,53 kW „Kälteleistung“ bei einer Nennleistung von 100 kW).

Mechan. Wellenleistung	100,00 kW
Wirkungsgrad Motorantrieb	0,95 n.a.
Elektr. Eingangsleistung	105,26 kW
Ausgang Brennstoffzelle	105,26 kW
Wirkungsgrad Brennstoffzelle	0,60 n.a.
Eingang Brennstoffzelle (H2)	175,44 kW
Energiedichte H2	33,30 kWh/kg
Massenstrom H2	5,27 kg/h
Energiedichte LH2-gH2	1,24 kWh/kg
Kälteleistung aus Massenstrom H2	6,53 kW

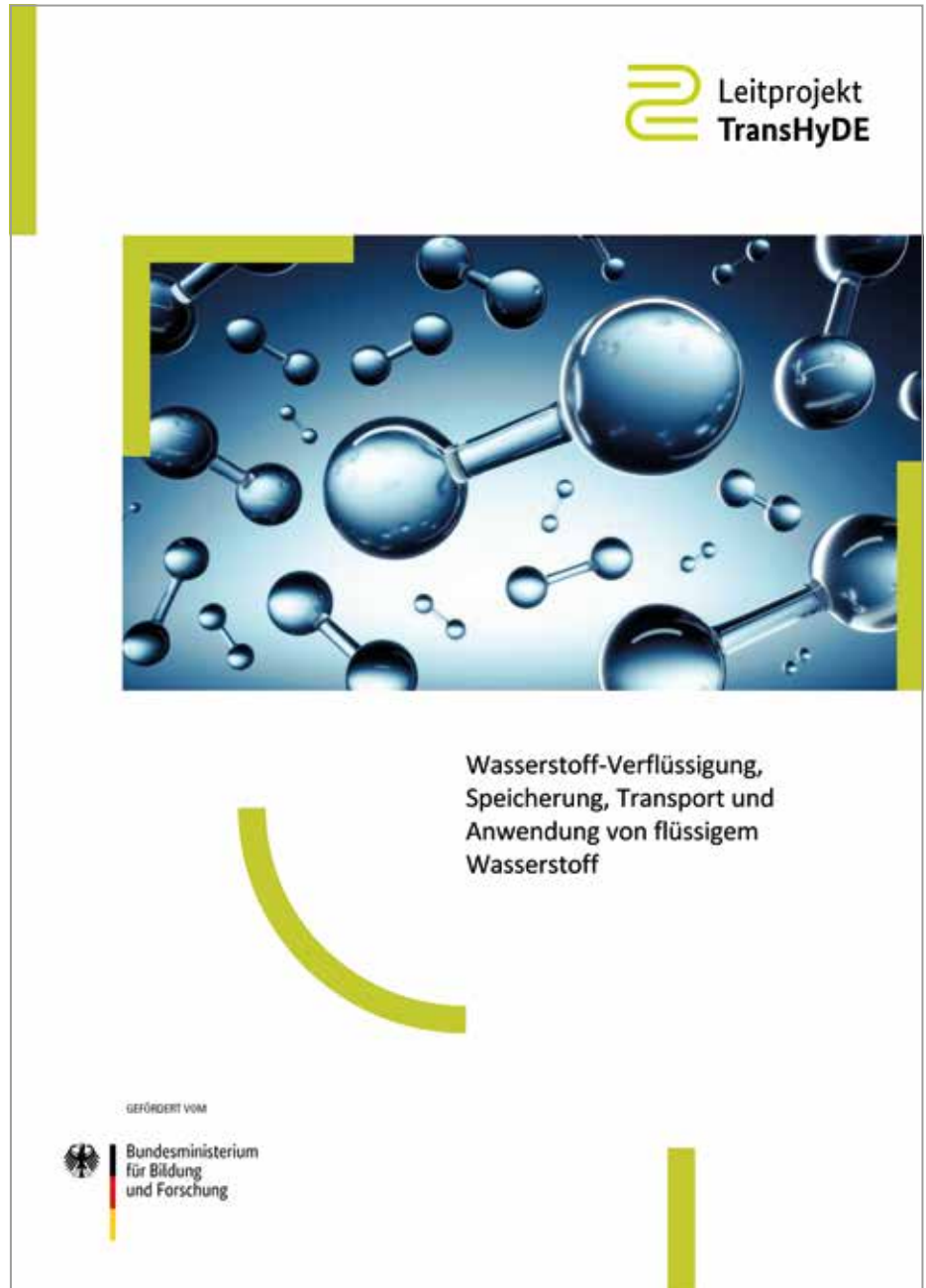
Tab. 1: Leistungsflüsse in einem Brennstoffzellen-elektrischen Antriebsstrang und „Kälteleistung“ des Flüssigwasserstoffs für eine mechanische Leistung von 100 kW.

# Highlight

## Whitepaper zu Flüssigwasserstoff

Als besonderen Erfolg nach ca. zwölf Monaten inhaltlicher und koordinierender Arbeit ist es gelungen, das Whitepaper zu finalisieren. Dieses wichtige Dokument wird Anfang 2023 über das BMBF veröffentlicht werden.

In dem Dokument adressieren die Autoren aller beteiligten 13 Projektpartner die Anwendungsfelder im Energiesystem, die Eigenschaften von Flüssigwasserstoff, Sicherheit und Materialien, Verflüssigung und Speicherung, die Transportoptionen, die Nutzung in stationären und mobilen Anwendungen und natürlich die Kombination von Flüssigwasserstoff und Supraleitung. Da auf vielerlei Gebieten (z. B. Verflüssigung, Speicherung und Sicherheit) noch viele Vorbehalte und veraltete Informationen kursieren, ist dieses Dokument ein wichtiger Schritt zu einer zeitgemäßen Bewertung des Potenzials von Flüssigwasserstoff. Weiterhin sind im weiteren Fortschritt der Arbeiten detaillierte Aktualisierungen zu erwarten.



The image shows the cover of a whitepaper. At the top right, the logo for 'Leitprojekt TransHyDE' is displayed, consisting of a stylized green 'E' shape followed by the text 'Leitprojekt TransHyDE'. Below the logo is a large, detailed illustration of blue and silver molecular structures, representing hydrogen molecules and their liquid state. The text 'Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff' is centered on the right side of the cover. At the bottom left, there is a logo for the 'Bundesministerium für Bildung und Forschung' (BMBF), with the text 'GEFÖRDERT VOM' above it. The cover is framed by a thin black border and features decorative green vertical bars on the left and right sides.

Leitprojekt  
TransHyDE

Wasserstoff-Verflüssigung,  
Speicherung, Transport und  
Anwendung von flüssigem  
Wasserstoff

GEFÖRDERT VOM  
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Ergebnisse aus den Forschungsfeldern



Zurückgehaltener Quecksilbertau während  
des aktiven Experimentierbetriebs mit dem  
Versuchsaufbau NEMESIS im HgLab Karlsruhe.

# Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

Koordination: Dr.-Ing. Christian Day

Im Forschungsfeld „Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs“ entwickelt das ITEP neuartige Technologien, um den Brennstoffkreislauf und die damit verbundenen Nachbarsysteme eines zukünftigen Fusionskraftwerks effizienter zu machen und dadurch sicherzustellen, dass der in situ erzeugte Brennstoff Tritium optimal ausgenutzt wird. Das Forschungsfeld deckt alle drei Schlüsseltechnologien des Brennstoffkreislaufs ab: Materieinjektion, Vakuumtechnik und Tritiumtechnologie.

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

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

Die Arbeiten sind fest im Europäischen Fusionsprogramm EUROfusion verankert, das bis 2027 ein Konzeptdesign des Demonstrationsfusionskraftwerks DEMO erarbeiten wird.

## VAKUUMTECHNOLOGIE UND PROZESSINTEGRATION

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

Der Bereich Vakuumtechnik des ITEP arbeitet seit vielen Jahren mit dem Team des Tokamak JT-60SA in Japan zusammen, der nach einer verlängerten Inbetriebnahmephase 2023 in Betrieb gehen wird. Nach einer ersten Experimentierkampagne wird die Maschine dann wieder geöffnet und mit weiteren Einbauten komplettiert. Dazu gehört ein leistungsfähiges Kryopumpensystem (neun baugleiche Kryopumpen), das



Abb. 1: Bauteile der JT-60SA-Kryopumpen.

direkt in den Divertoring integriert wird. Das ITEP wurde beauftragt, dafür das komplette Design zu entwickeln, die Herstellung in der Industrie zu begleiten und die qualitätskonforme Ausführung sicherzustellen. Die Herstellung der Pumpen ging im Berichtszeitraum sehr gut voran, sodass in der ersten Hälfte 2023 mit einer Auslieferung nach Japan gerechnet werden kann.

Das Design der Kryopumpe folgt dem am Institut entwickelten bewährten Kryosorptionspumpenkonzept. In [Abbildung 1](#) sind einige gefertigte Bauteile aus den verschiedenen Herstellungsphasen zu sehen: Die obere Abbildung zeigt hydrogeformte

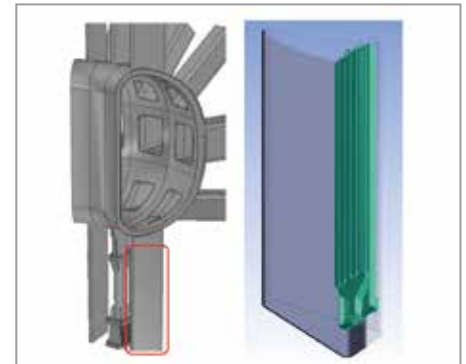


Abb. 2: Das DTT-Vakuumgefäß mit den potenziellen Anschlusskanälen (rot) zur Unterbringung der Vakuumsysteme (grün).

Strukturen beim Drucktest. Die mittlere Abbildung zeigt ein 4-K-Panel, zuerst unbehandelt, danach mit Aktivkohle beschichtet, versehen mit Widerstandsheizern und Temperatursensoren. Die untere Abbildung zeigt die geschwärtzten Chevron-Baffles beim Maßhaltigkeitstest.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten 2022 war die Entwicklung der Vakuumsysteme von DTT, einer neuen Fusionsmaschine in Italien. DTT soll die Divertorlösung von DEMO entwickeln und demonstrieren; der Betrieb erfolgt ohne Tritium. Basierend auf den durchgeführten Studien 2021, hat man sich dafür entschieden, auch für DTT maßgeschneiderte Kryosorptionskryopumpen einzusetzen. 2022 wurde daher ein Pumpendesign für die unteren vertikalen Stützen entwickelt ([Abbildung 2](#)). Der Platz ist sehr limitiert, was eine besondere Herausforderung darstellt. Es wurde schließlich entschieden, die Kryopumpe an der breiten Seite des trapezförmigen Querschnitts über eine Länge von etwa 2 m aufzuhängen, was hinsichtlich Pumpwahr-

scheinlichkeit und Wärmelast einen optimierten Designpunkt darstellt.

Der Institutsbereich Vakuumtechnik ist auch am Einstein-Teleskop (ET) beteiligt. Das ET ist ein Designkonzept für einen europäischen Gravitationswellendetektor der dritten Generation, der rund 10-mal empfindlicher als die heutigen Instrumente (LIGO, Virgo) sein wird. Das ET wird aus drei ineinander verschachtelten Detektoren bestehen, von denen jeder aus zwei Michelson-Interferometern mit 10 km langen Armen und einer Rohrweite in der Größenordnung 1 m besteht. Eines dieser Interferometer wird Gravitationswellen niedriger Frequenz (2–40 Hz) messen, während das andere auf Gravitationswellen höherer Frequenz abgestimmt ist. Das ET wird eines der größten Ultrahochvakuumsysteme der Welt sein.

Die sich für ET erhoffte Verbesserung in der Sensitivität gegenüber Gravitationswellen ist darauf zurückzuführen, dass der Druck in den Strahlrohren deutlich geringer sein soll als in bisherigen Anlagen ( $10^{-10}$  mbar Totaldruck mit Partialdrücken für Wasser unterhalb  $10^{-12}$  mbar und für schwere Komponenten unterhalb  $10^{-14}$  mbar).

Eine weitere Verbesserung im Niederfrequenzbereich ist im Wesentlichen auf einen kryogen gekühlten Detektorspiegel zurückzuführen. Im Berichtszeitraum wur-

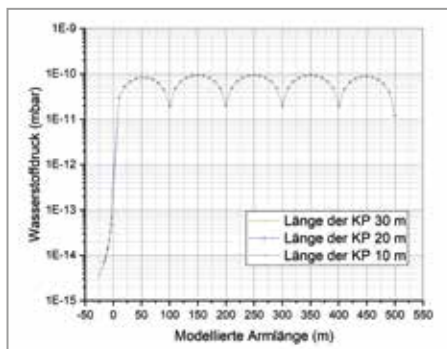


Abb. 3: Berechnetes Druckprofil im Übergang vom Strahlrohr zum Spiegel.

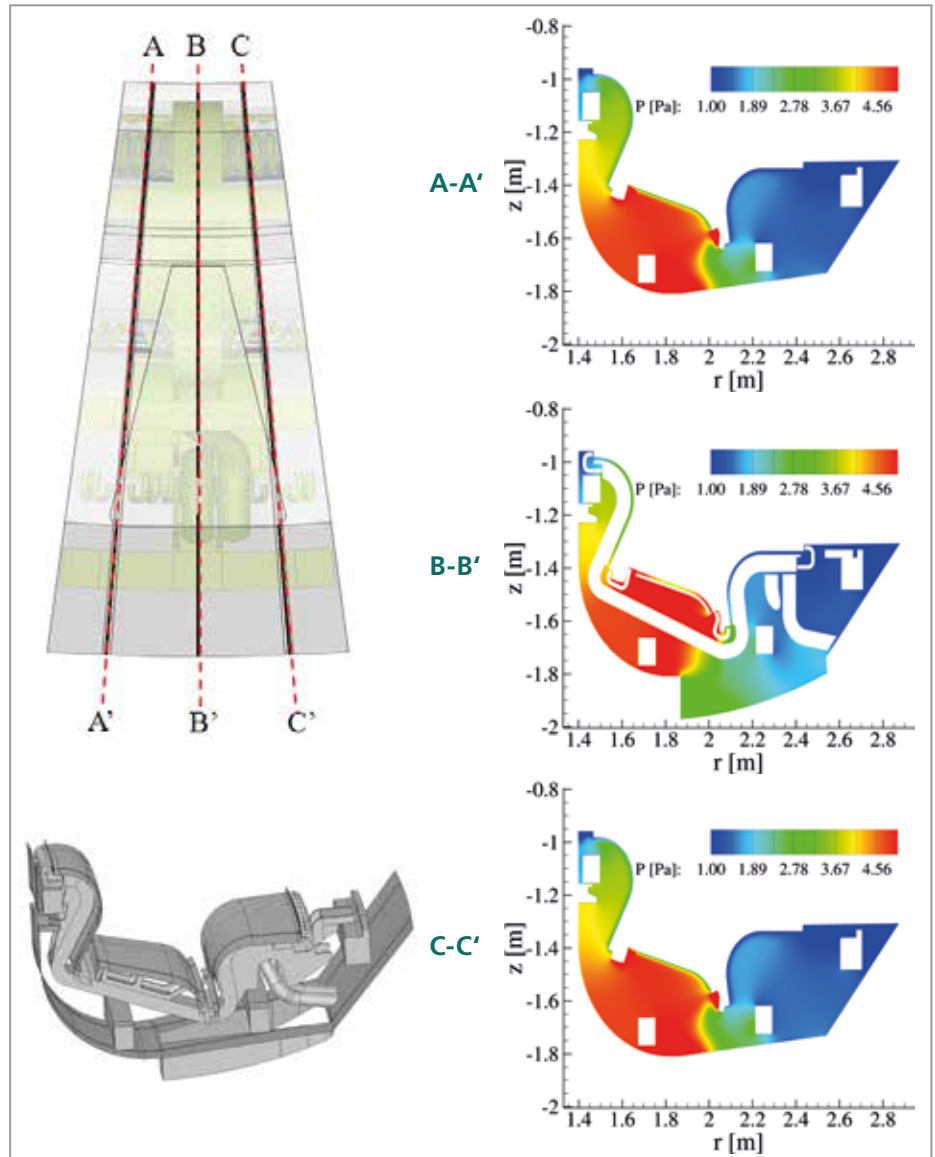


Abb. 4: Darstellung der Druckprofile in verschiedenen Schnitten des DTT-Divertors.

den für dieses Spektrometer die wesentlichen Vakuumanforderungen zusammengetragen und ein erstes Konzept erstellt, das zeigt, wo Kryopumpen bei tiefer Temperatur eingebaut werden müssen (je nach gewählter Technologie zwischen 3,5 und 10 K, um Wasserstoff zu pumpen) und wo Kryopumpen bei 80 K ausreichen (um im Wesentlichen Wasser zu pumpen). Die am kryogenen Spiegel auftreffenden Gasteilchen müssen weitestgehend eliminiert werden, da sie den Hintergrund erhöhen. Auch kondensierbare Spezies wie Wasser müssen effektiv abgepumpt werden, um die optischen Eigenschaften des Spiegels nicht negativ zu beeinflussen. Mit dem erarbeiteten Konzept werden Messzeiten von der Größenordnung ein Jahr ermöglicht.

Abbildung 3 zeigt einen typischen Druckverlauf längs des Strahlrohrs. In diesem Bei-

spiel sind alle 100 m Vakuumpumpstationen angebracht. An der Position 0 endet die Kryopumpe, der kryogene Spiegel befindet sich bei -30 m. Vor dem Spiegel ist eine Kryopumpe angenommen, deren Länge hier variiert wurde. Es zeigt sich, dass die Länge keinen wesentlichen Einfluss auf das Wasserstoffprofil hat. Daraus kann man schließen, dass es ausreichend ist, die Kryopumpe bei 80 K und damit ohne Saugvermögen für Wasserstoff zu betreiben.

Kontakt: christian.day@kit.edu

## STRÖMUNG VERDÜNNTER GASE

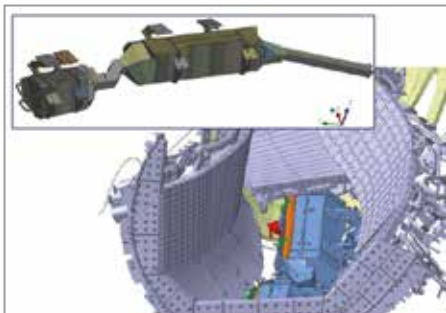
Zur korrekten Auslegung von komplexen Vakuumssystemen wie im Fusionsbrenn-

stoffkreislauf ist es unerlässlich, verdünnte Gasströmungen quantitativ zu berechnen. Dies geschieht exakt durch Lösen der Boltzmann-Gleichung, welche die Strömung im gesamten Bereich der Verdünnung beschreibt. Allerdings ist die Lösung dieser Gleichung für realistische Anwendungen (komplexe Geometrien, Gasmischungen) ausgesprochen aufwendig. Der Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP verfolgt dazu zwei verschiedene Ansätze: zum einen mit dem DSMC-Algorithmus, der stochastische Methoden anwendet, und zum anderen mit dem deterministischen Verfahren (DVM), welche die Gleichung unmittelbar lösen.

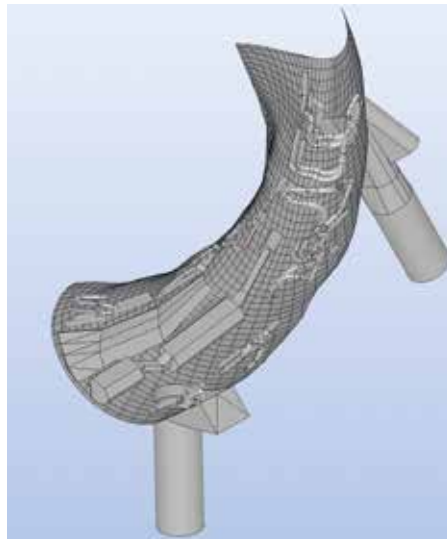
2021 konnte ein großer Durchbruch in der Beschleunigung des am Institut entwickelten DIVGAS-Codes erzielt werden. Damit war es 2022 möglich, zum ersten Mal komplizierte aufwendige Divertorgeometrien in 3D zu rechnen. Dies wurde für die beiden Maschinen DTT und den Stellarator W7-X demonstriert.

Für DTT konnten die zu pumpenden Teilchenflüsse und Druckprofile für die Geometrie des ersten Testdivertors quantifiziert werden. **Abbildung 4** zeigt beispielhaft die Druckverteilung im Bereich unterhalb des Divertors, wenn er von Kryopumpen gepumpt wird.

Bei der Analyse zeigte sich außerdem, dass die poloidalen Spalte zwischen den einzel-



**Abb. 5: Ansicht der neuen W7-X-Kryopumpen unterhalb der Divertortargets.**



**Abb. 6: Finales 3D-Modell des Subdivertors mit Pumpen und Verrohrung.**

nen Divertorkassetten (10 mm nominal) eine Verschlechterung des Pumpverhaltens von etwa 10 % hervorrufen, während die toroidalen Spalten zwischen Divertorkassette und Gefäßwand das effektive Saugvermögen um bis zu 60 % verschlechtern können. Während man mechanisch keine Spielräume hat, um die poloidalen Toleranzen zu reduzieren, wird nun überlegt, die Toroidalspalte zumindest teilweise zu schließen.

Auch der Divertor von W7-X wurde analysiert. Dies geschieht im Hinblick darauf, dass das bisherige Pumpsystem mit Turbomolekularpumpen durch Kryopumpen ersetzt wird (**Abbildung 5**). Das finale Modell ist in **Abbildung 6** dargestellt.

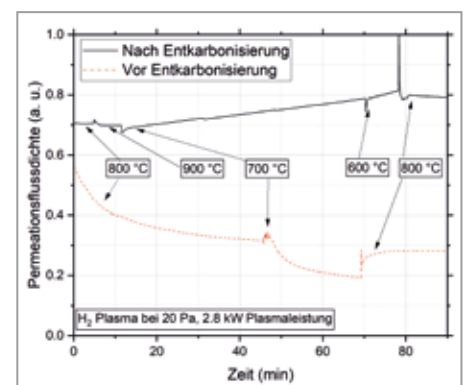
Kontakt: [stylianos.varoutis@kit.edu](mailto:stylianos.varoutis@kit.edu)

## VAKUUMHYDRAULIK UND WASSERSTOFFSEPARATION

Das Forschungsthema „Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation“ umfasst sämtliche Arbeiten, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, vor allem Flüssigmetallen, in Maschinen und Prozessen

unter Vakuum beschäftigen. Dementsprechend arbeitet der Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP auch an Prozessen für den Umgang mit diesen Arbeitsmitteln wie Aufreinigung und Prozessierung von Quecksilber sowie an der Entwicklung zugehöriger analytischer Verfahren. Das Referenzkonzept für das Torusvakuumssystem des europäischen Demonstrationsfusionskraftwerks DEMO sieht drei verschiedene Pumptypen vor: Zum einen ist dies die Metallfolienpumpe, die das Gas nicht nur komprimiert, sondern auch den Großteil des unverbrannten Brennstoffs im Abgas separiert. Stromabwärts schließt sich dann eine Kombination aus quecksilberbasierten Hoch- bzw. Grobvakuumpumpen an.

In der Metallfolienpumpenentwicklung wurden im Berichtszeitraum erste Messungen an Vanadium als Folienmaterial gemacht. Im Vergleich mit Niob, dem bisher verwendeten Material, waren die Pumpergebnisse nur unwesentlich schlechter. Auch konnte kein Isotopeneffekt nachgewiesen werden, was sehr gewünscht ist. **Abbildung 7** zeigt die durch Plasma getriebene Permeationsflussdichte durch die Vanadiumfolie für die zwei Fälle vor und nach der Entkarbonisierung der Folie. Während dieser Behandlung geht nahe der Oberfläche liegender Kohlenstoff als CO in die Gasphase über, was die Diffusivität des Sauerstoffs im Material verbessert. Dies ist



**Abb. 7: Einfluss der Entkarbonisierung zur Aufrechterhaltung konstanter Permeationsflussdichten.**



**Abb. 8:** Versuchsaufbau NEMESIS zur Charakterisierung von Düsengeometrien für Quecksilberdiffusionspumpen.

ein erwünschter Effekt, um die Stabilität der Oberflächenkondition und damit des Permeationsprozesses aufrechtzuerhalten. Man erkennt, dass vor der Entkarbonisierung eine höhere Folientemperatur den Nachtransport von Sauerstoff an die Oberfläche und damit die Stabilität des Permeationsflusses zwar verbessern kann, aber dass dieser trotzdem mit der Dauer der Plasmaexposition abfällt. Erst mit der Entfernung des Kohlenstoffs ist auch unter Einwirkung energetischer Teilchen des Plasmas die Kondition der Folienoberfläche für Superpermeation nachhaltig. Um die Langzeitstabilität des Prozesses gegenüber energetischen Plasmateilchen weiter zu verbessern, wird in einer weiteren Testreihe die direkte Sichtlinie von Plasma und Folie mit einem momentan in Fertigung befindlichen Schirm versehen.

Stromabwärts der Metallfolienpumpe sollen lineare Quecksilberdiffusionspumpen verwendet werden, eventuell im Zusammenspiel mit Ejektorpumpen. Das Arbeitsprinzip von Diffusionspumpen beruht auf der Impulsübertragung von Quecksilberdampf, der in Düsen auf Überschall beschleunigt wird, an die zu pumpenden Gasteilchen. Zum besseren Verständnis der Strömungsvorgänge in der Düse wurden 2022 Experimente an dem neuen Versuchsaufbau NEMESIS realisiert (Abbildung 8).



**Abb. 9:** Mehrkanalige Gasmisch- und Gasanalyseanlage für die Versorgung der Experimente in DIPAK.

Die gemessenen Drücke können dazu verwendet werden, den entwickelten Strömungscode zu validieren.

Die in diesem Forschungsthema laufenden Entwicklungsarbeiten qualifizieren im Rahmen einer systematischen Technologieentwicklung neue und innovative Verfahren zur Anwendung im Brennstoffkreislauf von DEMO. In den nächsten etwa drei Jahren werden alle am Institut geleiteten Neuentwicklungen (Metallfolienpumpe, Quecksilberhochvakuum, Temperaturwechselprozess zur Wasserstoffseparation) zur Prototypenreife führen.

Der nächste logische Schritt ist der Bau und der Test der einzelnen Prototypen in ihrem Zusammenspiel im Brennstoffkreislauf. Um die Dynamik des Gesamtprozesses korrekt abzubilden, ist es dann nötig, die beiden ersten der drei Brennstoffkreislauf-Loops komplett zu realisieren, also inklusive der Materiezufuhr über Pelletinjektion. Dies erfordert eine eigene Testumgebung. Nach einer mehrjährigen Planungs- und Beantragungsphase wurde 2021 dazu das Projekt DIPAK (Direct Internal Recycling Integrated Development Platform Karlsruhe) von allen Seiten (Präsidium, Senat und Aufsichtsrat KIT, EUROfusion, Helmholtz-Programm Energie) genehmigt. Als Folge der derzeitigen wirtschaftlichen Weltlage mit Problemen bei Lieferketten



**Abb. 10:** Kontrollboxen zum Anschluss der Flanschheizungen und der Temperatursensoren des DIPAK-Testbehälters.

und der Beschaffbarkeit von Rohmaterialien haben sich inzwischen allerdings größere Kostensteigerungen eingestellt, die jetzt neu eingeplant werden müssen. Dies gilt sowohl für den Bau als auch für die Herstellung des großen Testbehälters, der den Torus eines zukünftigen Fusionskraftwerks simulieren wird.

In Vorbereitung auf DIPAK wurde bereits begonnen, die wissenschaftliche Infrastruktur aufzubauen. Abbildung 9 zeigt eine neue Gasmisch- und -analyseanlage. Sie wird es ermöglichen, die für die Versuche kontinuierlich benötigten Gasmischungen vollautomatisch und genau herzustellen.

Für den Testbehälter, der auf 200 °C ausheizbar sein muss, wurde die behälternahe Infrastruktur vorbereitet und in das Prozessleitsystem (Siemens PCS7) eingebunden. Dies beinhaltet neben den Verteilern und Messstellen für das thermoölbasierte Heizsystem auch die vier Kontrollboxen zum Anschluss der ca. 200 Temperatursensoren und Flanschheizungen (Abbildung 10).

Kontakt: thomas.giegerich@kit.edu





# Preise und Auszeichnungen

Im Jahr 2022 erhielten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP einige Auszeichnungen und Preise für Arbeiten und Projekte in verschiedenen Bereichen.



Giovanni De Carne wurde zum 7.11.2022 auf eine Tenure-Track Professur für „Echtzeitsysteme in der Energietechnik“ an die KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnologie berufen.

Er leitet am ITEP seit 2020 die Helmholtz-Nachwuchsgruppe „Echtzeitsysteme in der Energietechnik“

Jonas Schwenzer, Doktorand im Institutsbereich VAKUUM, wurde bei der Fusions-Konferenz (TOFE) der American Nuclear Society im Juni 2022 für die Vorstellung seiner Arbeiten über die Tritiumrückge-

winnung aus dem Kühlkreislauf des heliumgekühlten Blanket mit dem 2. Präsentationspreis ausgezeichnet. Mit seinen transienten Modellierungen konnte er den Prozess wesentlich optimieren.



## Van Duzer Prize Award

HOME / IEEE CSC AWARDS & RECOGNITION PROGRAM

To recognize the best-contributed paper published in the IEEE Transactions on Applied Superconductivity during one volume year. The award is named in honor of Professor Ted Van Duzer, first Editor-in-Chief of IEEE Transactions on Applied Superconductivity.

### Topology Comparison of Superconducting AC Machines for Hybrid Electric Aircraft

Matthias Corduan, Martin Boll, Roman Bause, Marijn P. Oomen, Mykhaylo Filipenko, and Mathias Noe  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8947911>

Wir freuen uns außerordentlich über die Anerkennung der exzellenten Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und danken Ihnen herzlich für ihre Ideen und ihr Engagement.

## Dr. Cristian Gleason González

Modelling and validation of neutral particle flow by means of stochastic algorithms using the example of a fusion divertor

Die Partikelabfuhr ist ein Schlüsselprozess, der die Plasmakerndichte und das Abpumpen der Heliumasche steuert, die aus den Kernreaktionen resultiert. In Fusionsanlagen wie dem Tokamak in seiner Divertorkonfiguration steht die Partikelströmung im Divertor und in der Subdivertorregion im Zusammenhang mit dem Druck und dem Gas, das durch das Toruspumpensystem abgepumpt wird. Deshalb ist die vorausschauende Modellierung der Neutralpartikelabfuhr von entscheidender Bedeutung für das Verständnis sowie für die Optimierung des Betriebs von Vakuumsystemen in Fusionsanlagen.

Das Hauptziel der hier vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung eines numerischen Tools, das auf der Direct-Simulation-Monte-Carlo (DSMC) -Methode basiert. Es soll die Neutralgasströmung in Fusionsanwendungen beschreiben. Der im Funktionsumfang der Open-Source C++ Toolbox für Computational Fluid Dynamik, Open-FOAM, enthaltene DSMC-Solver *dsmcFoam* wird erstmals im Rahmen der Kernfusion zur Modellierung, Simulation und Validierung von Neutralgasströmungen im Divertorbereich angewendet.

Ein erforderlicher erster Schritt für die Anwendung des *dsmcFoam* in der Divertorregion ist es sicherzustellen, dass der Solver die Gasströmungen in einer einfachen Geometrie vorhersagen kann. Hierzu wird *dsmcFoam* mit theoretischen Vorhersagen verifiziert und mit unabhängigen numerischen Berechnungen abgeglichen. Die Sensitivitätsanalyse der Modellierungsparameter zeigt die Auswirkungen auf das Strömungsfeld in Abhängigkeit von Zeitschritt, Zellgrößenabhängigkeit und Anzahl der modellierten Partikel. Im zweiten Schritt

werden die Solver-Funktionalitäten weiterentwickelt, um die Gasabsorption an Oberflächen über die Sticking-Koeffizienten (Haftwahrscheinlichkeit) zu modellieren.

Mit dieser neuen Funktionalität des *dsmcFoam*-Solvers wird die Analyse der Partikelabfuhr im Subdivertor des Tokamaks JT-60SA durchgeführt. Die Analyse umfasst die Studie der Gasströmung mit und ohne Wechselwirkungen von Neutralteilchen.

Die Studie bestätigt, dass die Berücksichtigung von Kollisionen zwischen Teilchen eine wesentliche Rolle in der Beschreibung des Neutralgasstransports und der Gasströmungsentwicklung in Tokamak-Subdivertoren spielt. Dies zeigt sich in den Druckwerten des DSMC-Kollisionsmodells, die im Vergleich zu den Druckwerten vom kollisionslosen DSMC-Modell um etwa 25 % bzw. 40 % ansteigen. Dieser Vergleich ist der erste seiner Art im Anwendungskontext der Kernfusion.

Die zweite Anwendung des *dsmcFoam* besteht in der Analyse der Gasströmung in einem Divertor-Hochdruckszenario im Tokamak-ITER. Die Neutralgasströmung wird für einen 10-Pa-Divertordruck in der ITER-2009-Designgeometrie untersucht. Dabei wird gezeigt, dass die Gaszirkulationseffekte durch den Divertor in direkter Abhängigkeit zum Druck am Pumpenauslass stehen. Der Zusammenhang zwischen dem Gas, das zur Plasmahauptkammer strömt, und dem Druck am Pumpenauslass wird festgestellt.

Die Simulationen haben ergeben, dass der Druckanstieg am Pumpenauslass die Gasströmung auf der Niederfeldseite (LFS) ver-

stärkt, während auf der Hochfeldseite (HFS) kein Effekt zu beobachten ist. Die Studie zeigt, dass sich die Erhöhung der Gasströmung auf der Niederfeldseite durch eine Rückströmung am Pumpenausfluss ergibt.

Durch die Kombination von Experimentaldaten mit der DSMC-Modellierung wird die Berechnung der Gasströmung im gesamten Subdivertor des Tokamaks-ASDEX-Upgrade (AUG) ermöglicht. Mit dem installierten Divertor III in AUG wurden Experimente, die mit Fokus auf die Partikelabfuhr im Betrieb des Tokamaks bei voller Leistung der kryogenen Pumpen durchgeführt wurden, mit DSMC modelliert. Die Modellierung zeigt, dass die Partikelflüsse unterhalb der Divertordome-Region und am LFS mit den experimentellen Messungen vergleichbar sind. Zwischen den kalkulierten Gasströmungen in der Modellierung und den Messungen an den HFS-Manometern wurde hinter dem Divertortarget eine Diskrepanz festgestellt. Die Sensitivitäten zur AUG-Modellierung haben die Abhängigkeiten zwischen den Subdivertor-Parametern aufgezeigt, die für den Divertorbetrieb von Bedeutung sind.

# Dr. Yannick Hörstensmeyer

## Holistische Modellierung des Brennstoffkreislaufs eines zukünftigen Fusionsreaktors

Der Brennstoffkreislauf eines Fusionskraftwerks ist eine komplexe chemische Anlage, die im Wesentlichen die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium zur Fusion bereitstellt. Da ein Großteil dieses Gasgemischs den Fusionsreaktor vorzeitig verlässt, ohne zu fusionieren, stellt der Kreislauf dabei sicher, dass der Wasserstoff mit hohem Wirkungsgrad aus dem entstehenden Abgasstrom wiedergewonnen werden kann. Dafür muss das Prozessgas erst mittels Vakuumpumpen aus dem Reaktor transferiert werden. Anschließend wird der Wasserstoff über verschiedene Trennprozesse aus dem Abgasgemisch gefiltert. Schließlich wird das Wasserstoffgemisch dem Reaktor wieder zugeführt.

Im Detail werden in dieser Arbeit zuerst die Funktion und der Aufbau des inneren Brennstoffkreislaufes für das Demonstrationsfusionskraftwerk DEMO aus dessen Randbedingungen hergeleitet. Danach werden die relevanten physikalischen Zusammenhänge der verwendeten Technologien beschrieben und als eigenständige Modelle in das Simulationsprogramm integriert. Der besondere Fokus liegt dabei auf den physikalischen Wechselwirkungen von Wasserstoff (getrennt für alle sechs Isotopologe) mit sich selbst, Flüssigkeiten wie Wasser (in allen Formen der Tritiiierung) sowie verschiedenen Metallen, die die Grundlage der verwendeten Trennprozesse bilden.

Zur Einbindung aller Subsysteme bildet das Simulationsprogramm den kompletten Kreislauf transient in der kommerziellen Software ASPEN® Custom Modeler ab. So kann das Verhalten am Betriebspunkt während des Anfahrprozesses und für veränderliche Randbedingungen abgebildet werden.

Das Modell für den Brennstoffkreislauf beschreibt alle drei Kreisläufe in selbstkonsistenter Weise. In der Arbeit wird dadurch eine erste Dimensionierung der verwendeten Technologien erarbeitet.

Im innersten Kreislauf wurden die Durchsätze im Wesentlichen über Scale-ups von aktuellen experimentellen Ergebnissen gewonnen. Der angenommene Gesamtdurchsatz von 450 Pa m<sup>3</sup>/s wird dabei von 26 Metallfolienpumpen prozessiert, die 80 % des Wasserstoffs in reiner Form extrahieren und direkt rezyklieren. Das Vakuumpumpensystem umfasst 15 lineare Diffusionspumpen und über 100 Flüssigkeitsringpumpen. Die rezyklierte Gasfraktion wird dann mit dem Rückfluss aus den anderen Kreisläufen des Brennstoffkreislaufs vermischt und dem Plasma zugeführt. Dafür werden vor allem kryogene Pelletinjektoren verwendet.

Im nächsten Kreislauf wird wieder der Wasserstoff, hier mit Membranen, abgetrennt. Dafür ist ein zweistufiger Permeator vorgesehen, der in der ersten Stufe mit 45 Einheiten bereits 99,5 % des Wasserstoffs abtrennt. Die Zusammensetzung des Wasserstoffs wird dann in einem Temperaturwechselprozess angepasst.

Im äußeren Kreislauf wird der verbleibende Wasserstoffstrom über kryogene Destillation schließlich in die reinen Isotope zerlegt. Erzeugtes tritiiertes Wasser wird elektrolytisch getrennt und im Stoffaustausch in Wäschern aufgereinigt. Der äußere Kreislauf ist die Stelle, an der das von den Tritiumblankets erzeugte und extrahierte Tritium importiert wird.

Anhand eines repräsentativen Referenzpunktes wird eine Optimierung des Brenn-

stoffkreislaufs nach seinen Hauptdesignkriterien durchgeführt. Aus der Betrachtung des Gesamtsystems unter den Bedingungen des angenommenen Betriebspunktes der Anlage ergibt sich dabei ein geschätzter Tritiumverlustterm in Höhe von 1,6 g pro Jahr, der im Verhältnis zu einem operativen Tritiuminventar von 6,3 kg steht. Die einzelnen Beiträge zu dem gesamten Tritiuminventar werden hergeleitet und sind zum großen Teil in flüssiger Form oder in Feststoffbetten vorzufinden.

Mithilfe von Massenbilanzen wird unter Berücksichtigung der Verlustterme der Einfluss jedes Teilsystems auf den Referenzpunkt diskutiert. In einer Parameterstudie werden dann die wichtigsten Randbedingungen des Brennstoffkreislaufs variiert und entsprechende Anpassungsmöglichkeiten des Systems beschrieben. Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein umfassendes, modular aufgebautes und fundiertes Werkzeug zur Optimierung zukünftiger Brennstoffkreisläufe.

Diese Arbeit wird in einer Nachfolgearbeit weiter fortgeführt.

# Dr. Cyra Neugebauer

## Untersuchung zur semikontinuierlichen Separation von Wasserstoffisotopen für die Fusion

Der Brennstoffkreislauf ist für den effizienten Betrieb eines Fusionskraftwerks von zentraler Bedeutung. Bei der Brennstoffzufuhr muss das geforderte Teilchenverhältnis der beiden Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium im festgelegten Massestrom genau eingehalten werden, und der Anteil an Verunreinigungen darf gewisse Obergrenzen nicht überschreiten. In der Vergangenheit (z. B. ITER) wurde dazu die Wasserstofffraktion im Abgas abgetrennt und mittels kryogener Destillation in die einzelnen Isotope aufgetrennt. Da der Reaktor mit großem Brennstoffüberschuss gefahren wird, müssen dazu sehr große Ströme prozessiert werden, was bereits bei ITER zu großen Tritiuminventaren führt. Ein Scale-up des ITER-Ansatzes auf die Größe eines Demonstrationsfusionskraftwerks (DEMO) würde zu inakzeptablen Tritiuminventaren zwischen 15 und 20 kg führen. Dies ist zum einen problematisch, weil die Vorräte an Tritium, für die keine signifikante natürliche Quelle existiert, beschränkt sind. Zum anderen ist Tritium ein radioaktiver Strahler, und deswegen beträgt die maximal zulässige Obergrenze einer Freisetzung in einem Fusionskraftwerk lediglich 1 g pro Jahr. ITER hat ein Inventar von etwa 4 kg, und das Ziel ist es, diese Grenze auch für ein Fusionskraftwerk einzuhalten.

Aus diesem Grund wurde eine neue Architektur des Brennstoffkreislaufs vorgeschlagen, die die Separationsaufgabe auf zwei Systeme verteilt. Dazu soll der kryogenen Destillation ein semikontinuierlicher Temperaturwechselprozess vorgeschaltet werden, der eine Vorseparation bewirkt. In dem Trennprozess soll ein Teilstrom mit möglichst äquimolarer Zusammensetzung von Deuterium und Tritium erzeugt werden, der direkt rückgeführt werden kann, und ein an Wasserstoff angereicherter Teil-

strom, der in der Kryodestillation weiter aufgetrennt wird.

Die Arbeit beschäftigt sich mit dieser Separationsaufgabe. Hauptgegenstand ist die Entwicklung eines darauf basierenden technischen Prozesses und die experimentelle Demonstration des Temperaturwechselprozesses in einer Versuchsanlage.

Es wurde ein Konzept zur Trennung der Isotope entwickelt, das zwei Trennprinzipien kombiniert: Gasdiffusion und Wasserstoff-Metall-Wechselwirkungen in einem zyklischen Prozess. Der Ansatz basiert auf intensiver Forschung, erfüllt die Anforderungen eines Fusionskraftwerks, bezieht Literaturanalysen ein, spiegelt die bestmögliche Bewertung bekannter Trennverfahren wider und unterlegt das neue zweistufige Verfahren mit theoretischen Prozessanalysen.

Als erste Stufe werden Membranen verwendet. Membranen werden in der Regel für Gastrennungsanwendungen eingesetzt, nicht jedoch für die Trennung der verschiedenen Wasserstoffisotope. Der positive Trenneffekt von Membranen wurde in die Prozessentwicklung einbezogen und in Experimenten nachgewiesen. Für den DEMO-Upscale kann eine Tritiumreduzierung um 17 % erreicht werden.

Als zweite Stufe werden Wasserstoff-Metall-Wechselwirkungen ausgenutzt, die in erster Linie bisher zur Wasserstoffspeicherung und nicht zur Abtrennung genutzt werden. Für diesen Zweck wurden die Eigenschaften von zwei verschiedenen Materialien analysiert, um den Isotopeneffekt nachzuweisen und das Verhalten von Temperatur und Druck in einem speziell entwi-

ckelten Sieverts-Prüfstand zu zeigen. Pd und TiCr1.5 erwiesen sich als geeignete Kandidaten.

In einem nächsten Schritt wurde eine Versuchsanlage entworfen und aufgebaut, um die beiden Trennstufen experimentell zu untersuchen. Die experimentelle Trennung der Wasserstoffisotope wurde erfolgreich demonstriert und mit einem angepassten Simulationsmodell validiert. Für diese Stufe wurden insgesamt drei Parameterstudien durchgeführt. Der Parameter mit dem besten Ergebnis (Trennwirkung über die Zeit) wurde für die nächste Studie verwendet. In der ersten Studie wurden vier Temperaturdifferenzen im möglichen Betriebsbereich verglichen, wobei 288–383 K als das beste Ergebnis ermittelt wurden. In der zweiten Parameterstudie sind drei verschiedene Prozessvarianten durchgeführt worden, wobei sich eine klar als die beste qualifizierte. In der letzten Studie wurden drei verschiedene Anzahlen von Zyklen miteinander verglichen (3, 5 und 10), wobei sich drei Zyklen als die beste Einstellung herausstellten. Mit der finalen Verfahrensvariante konnten Anreicherungen für  $H_2$  von 42,2 % auf 66,5 % und für  $D_2$  von 57,8 % auf 78,5 % nachgewiesen werden.

Ein Scale-up für DEMO auf der Grundlage der in den Versuchen ermittelten besten Parameter hat gezeigt, dass das zweistufige Prinzip die Anforderungen erfüllen kann. Die Membranstufe ist dabei essenziell, um das hohe Tritiuminventar zu reduzieren. Die Temperaturwechselstufe ist für die Entfernung von Protium unerlässlich.

Diese Arbeit wird in einer Nachfolgearbeit weiter fortgeführt.

# Dr. Ruslan Popov

## Einfluss der Sauerstoffglühung auf strukturelle und Transporteigenschaften von $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-6}$ -Schichten mit und ohne $\text{BaHfO}_3$

In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, dass Bandleiter, die eine supraleitende Hochtemperaturschicht enthalten, eine vielversprechende Lösung für die Entwicklung von Großanwendungen wie Motoren, Generatoren, Fehlerstrombegrenzern und supraleitenden Magnetspeichern darstellen. Eine der wichtigsten Anforderungen für solche Anwendungen ist die Fähigkeit, große Ströme bei verschiedenen Temperaturen und Magnetfeldern zu übertragen.

Supraleitende  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-6}$  (GdBCO)-Dünnschichten, die durch gepulste Laserabscheidung hergestellt werden, haben eine hohe Übergangstemperatur ( $T_c$ ) und relativ hohe kritische Stromdichten ( $J_c$ ). GdBCO weist eine hohe Dichte an wachstumsbedingten Defekten auf, und  $J_c$  ist abhängig von der Wechselwirkung der „Flusslinien“, die den Supraleiter in der „Mischphase“ durchdringen, mit diesen Defekten. Daher bestand in den vergangenen Jahren die Hauptstrategie zur weiteren Steigerung von  $J_c$  darin, die Dichte dieser Defekte zu erhöhen.

Die Sauerstoffglühung, die ein wichtiger Schritt bei der Herstellung der Supraleiter ist, führt zusätzliche Sauerstoffatome in GdBCO ein und bildet die supraleitende Phase. Daher waren die Hauptziele dieser Arbeit die Verbesserung von  $J_c$  durch die Sauerstoffglühung, insbesondere durch Parameter wie Glühzeit und Sauerstoffdruck, die Suche nach der Möglichkeit, die Defektmorphologie durch Variieren der Sauerstoffglühparameter maßzuschneidern und  $J_c$  in GdBCO-Dünnschich-

ten mit  $\text{BaHfO}_3$  (BHO)-Nanokompositen zu verbessern.

Bei der Untersuchung des Sauerstoffglühens von Schichten ohne und mit 2,5 Gew.-% BHO wurden mehrere wichtige Merkmale beobachtet:

1. Glühzeit: beeinflusst in erster Linie die Stapelfehler in der GdBCO-Matrix. Alle Filme zeigten den höchsten  $J_c$ -Wert im Magnetfeld bei 450 °C (dem niedrigsten untersuchten Wert).
2. Sauerstoffdruck: beeinflusst in erster Linie die Größe der Gd-reichen Nanopartikel in der GdBCO-Matrix.
3. Glühzeit für GdBCO+2,5 Gew.-% BHO: Im Vergleich zu reinem GdBCO zeigen die Nanokomposit-Dünnschichten das höchste  $J_c$  beim Magnetfeld für 700 °C.

Die Kombination aller Merkmale, die in den Studien zum Einfluss von  $T_{\text{ann}}$  sowie  $T_{\text{ann}}$  und  $\text{PO}_2$  beobachtet wurden, lässt vermuten, dass die Defektmorphologie in GdBCO-Dünnschichten auf zwei Arten verändert werden kann:

1. Glühung bei hoher Temperatur und hohem Sauerstoffdruck mit anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur: Auf diese Weise bleiben die in der GdBCO-Matrix vorhandenen Stapelfehler erhalten, und die Dichte der Gd-reichen Nanopartikel wird verringert.
2. Glühung bei hoher Temperatur und niedrigem Sauerstoffdruck und Glühen bei niedriger Temperatur und hohem Sauerstoffdruck: Dieser Weg erhält die Gd-reichen Nanopartikel und reduziert die Dichte der Stapelfehler.

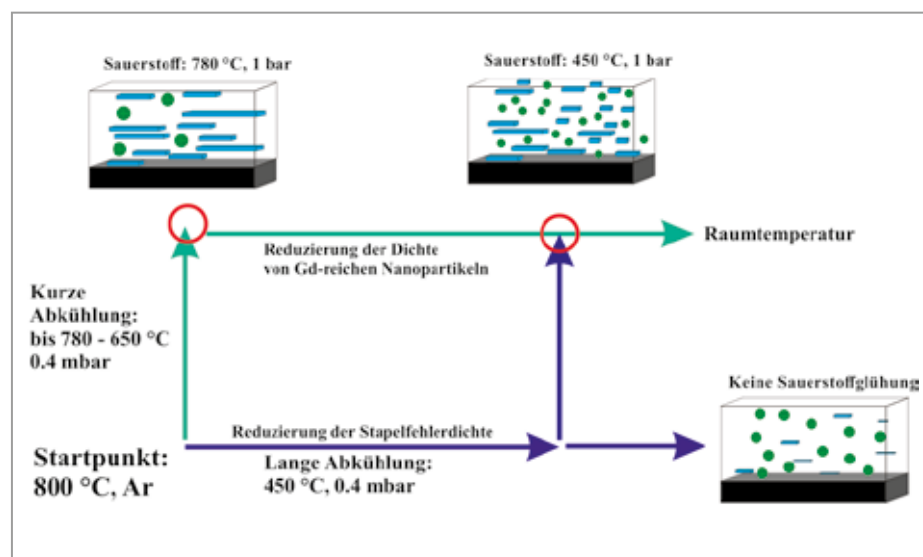


Abb. 1: Diagramm mit zwei Wegen zur Veränderung der Defektmorphologie und der beobachteten  $J_c$ -Abhängigkeit von der Magnetfeldorientierung für unbehandelte GdBCO-Dünnschichten.

# Dr. Fabian Schreiner

## Entwicklung und Test eines supraleitenden Generatordemonstrators für Windkraftanlagen

Der steigende Bedarf an günstigen erneuerbaren Energiequellen verursacht eine anhaltende Entwicklung hin zu Windkraftanlagen höherer Leistungsklassen. Generatoren dieser Leistungsklassen sind meist besonders schwer und weisen erhöhte Anforderungen an den Bauraum auf. Supraleitende Materialien mit ihrer hohen Stromtragfähigkeit zeigen das Potenzial einer erhöhten Leistungsdichte von elektrischen Maschinen hinsichtlich Gewicht und Volumen. Gleichzeitig kann der Bedarf an seltenen Erden im Vergleich zu konventionellen, permanent erregten Generatoren drastisch reduziert werden. Die Arbeit behandelt deshalb die Entwicklung und den Test eines Generatordemonstrators mit Felderregerspulen, bestehend aus Hochtemperatur-Supraleitern. Für eine verbesserte elektrische und thermische Stabilität sind die supraleitenden Spulen als nicht isolierte Spulen ausgeführt und verfügen über keine elektrische Isolation zwischen den Spulenwindungen.

Im Rahmen der Dissertation wird ein detailliertes elektromagnetisches, thermisches und mechanisches Design eines supraleitenden Generatordemonstrators erarbeitet. Hierbei wird nicht nur die Wechselwirkung der genannten physikalischen Domänen untereinander, sondern auch die grundsätzliche praktische Umsetzbarkeit berücksichtigt.

Die supraleitenden Felderregerspulen befinden sich im Stator der Maschine, während die normalleitende Drehstromwicklung rotierend ausgeführt ist. Weiterhin sind Stator und Rotor als sogenannte Luftspaltwicklungen realisiert. Somit sind die Wicklungen nicht wie bei herkömmlichen Drehfeldmaschinen in Nuten eingelegt. Die kryogene Kühlung wird mittels direkter Leitungskühlung mit zwei Kryokühlern realisiert. Die Kühler sind zweistufig ausgeführt mit den jeweiligen Betriebstemperaturen bei 77 K

und 30 K. Die Nennleistung des Demonstrators beträgt 10 kW bei einer Drehzahl von  $389 \text{ min}^{-1}$  und einem Drehmoment von 250 Nm. Die mittlere magnetische Flussdichte im Luftspalt beträgt 0,63 T bei einem Nennerregerstrom der supraleitenden Feldspulen von 450 A. Die Wärmeeinträge durch die Stromzuführungen, die mechanischen Stützstrukturen und die Wärmestrahlung betragen für die erste Kühlstufe jeweils 44,64 W, 15,87 W und 4,12 W und für die zweite Kühlstufe jeweils 0,89 W, 2,89 W und 0 W. Das Design des supraleitenden Generatordemonstrators ist in [Abbildung 1](#) dargestellt.

Für den Aufbau des Demonstrators wurden 14 sogenannte Pancake-Spulen entwickelt und hergestellt, die in einem späteren Schritt zu sieben Double-Pancake-Spulen zusammengefügt wurden. Dabei kamen Hochtemperatur-Supraleiter von zwei verschiedenen Herstellern zum Einsatz. Alle Spulen wurden in Flüssigstickstoff bei 77 K vorcharakterisiert und erfüllten die Anforderung der minimalen kritischen Stromstärke. Allerdings zeigten die Spulen mit kritischen Strömen zwischen 122,4 und 283,6 A eine große Streuung. Die Verzögerungen der Ladezeit aufgrund der fehlenden Windungsisolierung betragen für die verschiedenen Double-Pancake-Spulen zwischen 13,1 und 43,2 s. Insgesamt wurden für das Statorsystem nur sechs Double-Pancake-Spulen benötigt. Die siebte Spule

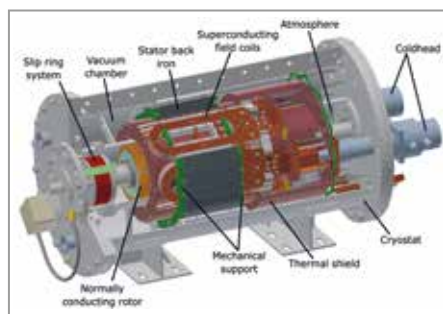


Abb. 1: Design des supraleitenden Generatordemonstrators.

wurde unter leitungsgekühlten Bedingungen bei Temperaturen unterhalb von 77 K weiteren Tests unterzogen. Nicht isolierte supraleitende Spulen zeigen zusätzliche Verluste bei transienten Lade- und Entladevorgängen. Um das Verhalten der Spulen besser abzuschätzen, wurde ein transientes, thermisch-elektrisches Modell entwickelt, das eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen maximalen Spulentemperaturen während transients Vorgänge zeigt. Darüber hinaus konnte die verbesserte elektrische und thermische Stabilität der nicht isolierten Spule überprüft werden. Trotz einer kontinuierlichen Belastung mit dem 1,5-Fachen der kritischen Stromstärke zeigte die Spule keinerlei Beschädigungen.

Das Abkühlen des gesamten Systems benötigte knapp 48 Stunden. Dabei erreichten alle Spulen Temperaturen unterhalb von 20 K. Bei der eingeregeltten Betriebstemperatur von 30 K erreichte das Spulensystem einen kritischen Strom von 695,4 A und erfüllte somit die Anforderungen an den Betriebsstrom. Die für den Generatorbetrieb erforderlichen alternierenden magnetischen Pole konnten ebenfalls messtechnisch bestätigt werden.

In [Abbildung 2](#) ist der supraleitende Generatordemonstrator auf einem Motorprüfstand am Campus Ost zu sehen.

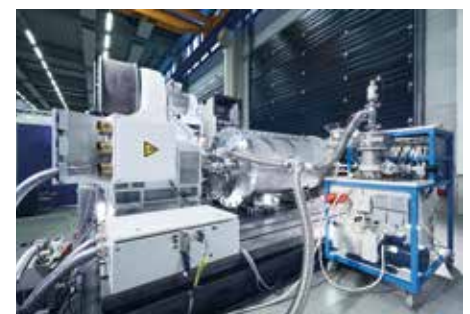


Abb. 2: Supraleitender Generatordemonstrator auf dem Motorprüfstand am Campus Ost.

# Lehre und Bildung

## Vorlesungen, Seminare und Workshops

### KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

- **Praktikum Supraleitende Materialien** (Holzapfel, Hänisch) SS 22, WS 22/23
- **Energy Storage and Network Integration** (Grilli, De Carne) WS 21/22, WS 22/23
- Tutorial for Energy Storage and Network Integration** (Noe, Grilli, De Carne, Kottonau, Karrari) WS 21/22, WS 22/23
- Superconductivity for Engineers** (Holzapfel, Kempf) WS 21/22, SS 22, WS 22/23
- Exercise for superconductivity for Engineers** (Hänisch) WS 22/23
- Seminar on Applied Superconductivity** (Arndt, Holzapfel, Kempf) SS 22, WS 22/23
- Superconducting Materials Part I** (Holzapfel) WS 21/22, WS 22/23
- Superconducting Materials Part II** (Holzapfel) SS 22
- Superconducting Magnet Technology** (Arndt) SS 22
- Seminar Strategieableitung für Ingenieure** (Arndt) WS 21/22, SS 22, WS 22/23
- Superconducting Power Systems** (Arndt, Pham, Müller, Grilli, Schreiner, De Sousa) WS 21/22, SS 22, WS 22/23

- Praktikum Robotische Wickeltechnik für Supraleiterdrähte** (Arndt)  
WS21/22, SS 22, WS 22/23
- Superconductors for Energy Applications** (Grilli) WS 21/22, SS 22, WS 22/23
- Übungen zu Superconductors for Energy Applications** (Grilli) SS 22, WS 22/23
- Electrical and Electronic Engineering for Mechanical Engineers** (De Carne) WS 21/22, WS 22/23
- Tutorial for Electrical Engineering and Electronics for Mechanical Engineers** (De Carne) WS 22/23

### KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

- **Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 21/22, WS 22/23
  - **Übung zu Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 21/22, WS 22/23
- ### KIT -Fakultät Maschinenbau
- **Fusionstechnologie A** (Day, Gröbke, Fietz, Weiss, Wolf) WS 21/22, WS 22/23

### House of Competence

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

### Seminare

#### Kryo-Seminare

- **09.–11.03.2022** (Neumann)
- **28.–30.09.2022** (Neumann)

### Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau

- **Arbeitssicherheit und Umweltschutz** (Bauer) WS 21/22, SS 22, WS 22/23
- **Tieftemperaturtechnik** (Neumann) WS 21/22
- **Thermodynamik Grundlagen 2** (Neumann) WS 21/22
- **Thermodynamik Grundlagen 1** (Neumann) SS 22
- **Magnet-Technology for Fusion Reactors** (Weiss, Wolf) SS 22
- **Angewandte Kryo-Technologie** (Weiss, Lietzow, Neumann) SS 22



# Abgeschlossene Doktorarbeiten

(\* akademischer Betreuer)

## ENERGIE

### Alexander Buchholz

Prospective Life Cycle Assessment of High-Temperature Superconductors for Future Grid Applications

Betreuer: Dr. M. Weil (ITAS),  
Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Dustin Kottonau

Echtzeitsimulation und Netzintegration einer Mikrogasturbine

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

### Fabian Schreiner

Development and test of a technology wind generator demonstrator with no insulation field coils applying high temperature superconductors

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Doppelbauer (ETI), Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

## MATERIAL

### Lukas Grünewald

Elektronenmikroskopische Untersuchung von eisen- und kupferbasierten Hochtemperatursupraleitern

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

### Ruslan Popov

Influence of oxygen annealing on structural and transport properties of pristine and BaHfO<sub>3</sub> nanocomposite GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> films

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

## VAKUUM

### Cristian Gleason-González

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

### Yannick Hörstensmeyer

Holistische Modellierung des Brennstoffkreislaufs eines zukünftigen Fusionsreaktors

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

### Cyra Neugebauer

Untersuchung zur semi-kontinuierlichen Separation von Wasserstoff-Isotopen für die Fusion

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

# Abgeschlossene Masterarbeiten

(\* akademischer Betreuer)

## ENERGIE

### Stefanelli Lorenzo

Rowen's Model application for non-real-time and real-time simulation of Micro Gas Turbines  
Betreuer: D. Kottonau, Prof. Eng. M. Marconcini (University of Florence)\*

### Mauro Semeraro

Modelling complexity reduction of AC distribution grids  
Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Judy Bavaro

$H_\infty$  Robust Control of a HESS for frequency regulation  
Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Irene Goiria

Optimization of Hybrid Energy Storage Systems Under Different Control Approaches  
Betreuer: M. Maroufi, Dr. G. de Carne Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Ander Retamosa Garcia

Micro Gas Turbine thermal emulator set-up in a real-time environment  
Betreuer: D. Kottonau, Dr. G. de Carne Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Xiaochang Liu

Stability Analysis of Power Hardware in the Loop with Impedance-based modeling approach using Grid converters  
Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Ziyang Li

Untersuchung einer schnell taktenden LLC Wandlerstufe im Sub-MHz / MHz Bereich in verschiedenen Ausgangleistungsklassen  
Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

### Han Zhang

Modeling and Analysis of a PEM Electrolysis System for Parallel Simulation  
Betreuer: N. Nemsow, Dr. G. de Carne Prof. Dr.-Ing. M. Noe\*

## VAKUUM

### Alexander Zilz

Investigation of the Rarefied Gas Flow in the Pumping Tube of a  $^3\text{He}/^4\text{He}$  Dilution Refrigerator  
Betreuer: Dr. Tantos, Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (ITTK)\*

## MATERIAL

### Johannes Weis

Thermal Resistance Measurement over Solid-Solid Interfaces  
Betreuer: Dr. N. Bagrets, Dr. K. Weiss Prof. Dr. B. Holzapfel\*

# Abgeschlossene Bachelorarbeiten

(\* akademischer Betreuer)

## MATERIAL

### **Julian Bell**

Entwicklung eines didaktischen Konzepts für die Station „Windenergie“ im KIT-Schülerlabor Energie  
Betreuer: A. Rimikis,  
Prof. Dr. B. Holzapfel\*

### **Nicolas Dworschak**

Entwicklung eines didaktischen Konzeptes für die Station „Wasserstoffmobilität“ im KIT-Schülerlabor Energie  
Betreuer: A. Rimikis,  
Prof. Dr. B. Holzapfel\*

### **Florian Steinhauser**

Entwicklung einer Messroutine für kritische Ströme von Supraleitern  
Betreuer: Dr. J. Hänisch,  
Prof. Dr. B. Holzapfel\*

## KRYO

### **Simon Urban**

Konstruktion einer Füllstandsonde für flüssigen Wasserstoff  
Betreuer: S. Bobien,  
M. Kastner (DH)\*

## MAGNET

### **Maximilian Korb**

Elektromagnetische Auslegung eines HTS-Gyrotron-Magneten  
Betreuer: Dr. F. Hornung,  
Prof. Dr. T. Arndt\*

# Fach- und Gastvorträge

## **16. März 2022**

Characterization of HTS material for electrical engineering applications  
Prof. Bruno Douine University of Lorraine  
Gastvortrag, IB Energie

## **31. März 2022**

Impact of local strain on the screening currents induced in 2G HTS insert magnets of high DC magnetic field generation  
Prof. Frederic Trillaud UNAM – National Autonomous University of Mexico  
Gastvortrag, IB Energie

## **08. September 2022**

Low Inertia Systems: Complex Frequency and Simple Control.  
Prof. Federico Milano  
Gastvortrag, IB Energie

## **28. September 2022**

Interpretation of divertor detachment in JET using edge fluid codes  
Prof. Mathias Groth  
Aalto University, Espoo, Finland  
Gastvortrag IB Vakuum

## **15. November 2022**

Understanding the real, imperfect nature of REBCO ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  with RE=Rare Earth elements) coated conductors and implications for ultra-high magnetic field used  
Prof. David Larbalestier  
Chief Materials Scientist of the National High Magnetic Field Laboratory & Professor of Mechanical Engineering Applied Superconductivity Center and Florida State University, Tallahassee, Florida, USA  
Fachvortrag ITEP/IQMT, IB Material

## **08. Dezember 2022**

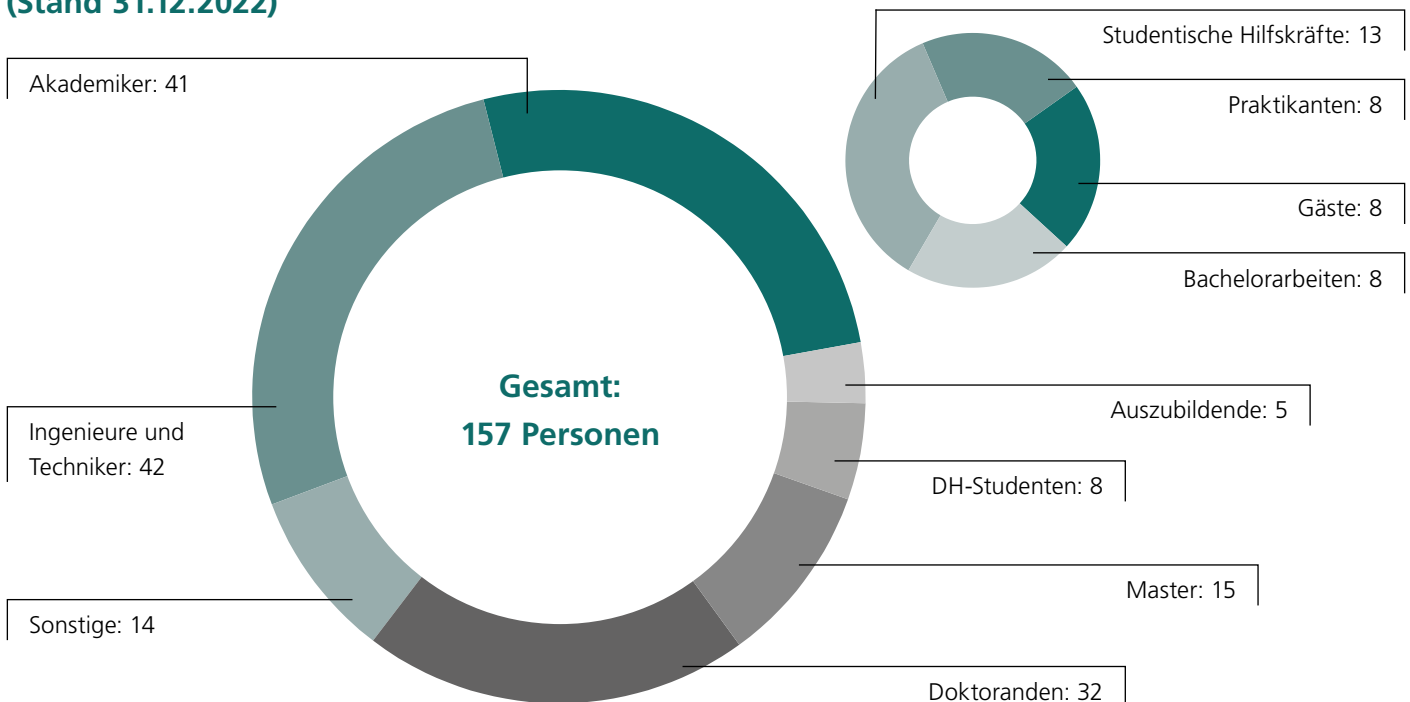
Grid forming power converters. Principles and applications  
Prof. Pedro Rodriguez  
Gastvortrag, IB Energie

# Zahlen, Fakten, Daten

## Forschungsfelder und -themen

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

## Personalstand (m/w/d) (Stand 31.12.2022)



# Gastwissenschaftler

**Dr. P. Zhou**

23.08.21–22.08.23

Southwest Jiaotong University, Chengdu,  
P.R. China

**J. Shi**

23.10.21–15.09.22

Southwest Jiaotong University, Sichuan,  
P.R. China

**J. Zhang**

26.10.21–17.10.22

Southwest Jiaotong University, Sichuan,  
P.R. China

**M. Tian**

17.01.22–14.04.22

University of Cambridge, Cambridge, UK

**J. Wang**

22.01.22–20.07.22

North China Electric Power University,  
Bei Jing, P.R. China

**Prof. Dr. B. Douine**

04.04.22–31.05.22

University of Lorraine; Green Lab, Lorraine,  
Frankreich

**D. Fusco**

01.09.22–31.12.22

University of Cassino and Southern Lazio,  
Lazio, Italy

**C. Chow**

03.11.22–02.04.23

University of Hongkong, Hongkong

# Mitgliedschaften

## in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

### Tabea Arndt

- Programmkomitee der Tagung ZIEHL, 04.-05.04.2022, Berlin
- International Organizing Committee Conference Magnet Technology, MT
- International Organizing Committee Conference EUCAS, Large Scale
- International Organizing Committee Conference CCA, Large Scale
- Mitglied DKE TC90
- Delegierte zum Technology Cooperation Program High-Temperature Superconductivity der International Energy Agency
- Mitglied des Magnet Panel der Muon-Collider-Aktivität, CERN
- Mitglied des Kuratoriums der EnBW-Stiftung
- „Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung“ des BMWi, Kuratorin seit Ende 2021

### Nadja Bagrets

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

### Kai Bauer

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

### Christian Day

- Mitglied des Vorstandsrates der Dt. Vakuumgesellschaft (DVG).
- Projektleitung des Bereichs Tritium-Materiezufuhr-Vakuum (TFV) im Europäischen Fusionsprogramm EUROFUSION
- Sprecher Topic ‚Vakuum und Tritium‘ der deutschen DEMO-Initiative
- Mitglied im International Advisory Committee der RGD (Rarefied Gas Dynamics Conference)
- Mitglied des Programmkomitees der ISFNT (international Symposium of Fusion Nuclear Technology).
- Chartered Engineer der American Vacuum Society (AVS).
- Mitglied im Team zur Erarbeitung des Forschungsplans von DTT, verantwortlich für Fusionstechnologie.
- Mitglied im Board der IAEA Technical Meeting Reihe Brennstoffkreislauf

### Giovanni de Carne

- Leiter des IEEE Power and Energy Society „Task Force on Solid State Transformer integration in distribution grids“
- Helmholtz Nachwuchsgruppen-Leiter – 2020
- Chairman der IEEE PES Task Force „Solid State Transformer integration in distribution grids“
- Sekretär und Mitglied der CIGRE Arbeitsgruppe B4.91 „Power electronics-based transformer technology, design, grid integration and services provision to the distribution grid“
- Mitglied der CIGRE Arbeitsgruppe A3.40 „Technical requirements and field experiences with MV DC switching equipment“
- Mitglied der IEEE Arbeitsgruppe P2004 „Hardware in the Loop“.
- Mitglied der IEEE Arbeitsgruppe „Modelling and Simulation with High Penetration of Inverter-Based Renewables“
- 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
- Mitglied im KIT-Konvent

### Bernhard Holzapfel

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

### Holger Neumann

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

### Mathias Noe

- Kurator des Forschungsnetzwerkes Hochtemperatur-Supraleitung des BMWi
- Internationaler Experte der CIGRE D1.69 Arbeitsgruppe "Assessing emerging test guidelines for HTS applications in power systems"
- Internationaler Experte der CIGRE Arbeitsgruppe D1.64 "Cryogenic dielectric insulation"
- Deutscher Abgesandter der International Energy Agency, Technology Cooperation Programm Hochtemperatur-Supraleitung
- Mitglied des Boards der Applied Superconductivity Conference
- Mitglied des Interessenverbandes Supraleitung (ivsupra)
- Mitglied der Arbeitsgruppe zur Erstellung einer Beschleuniger F&E Roadmap im Rahmen einer europäischen Strategie für Teilchenphysik

### Sonja Schlachter

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

### Wesley T. B. de Sousa

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

### Stylianos Varoutis

- Mitglied im wissenschaftlichen Komitee der NEGF (European Conference on Non-equilibrium Gas Flows).
- Mitglied im Auswahlkomitee des EU High Performance Computers MARCONI
- Mitglied 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
- Sprecher der Arbeitsgruppe „Magnet Design“ innerhalb der deutschen Koordination der Fusionsforschung für DEMO
- Member of the International Technical Program Committee – Workshop on Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors / Organizer MEM2022 10th Workshop in Karlsruhe
- Board Member ICMC (International Cryogenic Materials Conference) & Subcommittee International Cryogenic Material Library
- Experte im EUROfusion Scientific & Technical Advisory Committee (STAC)



# Veröffentlichungen

## Fusion

### Zeitschriftenaufsatz

U. Stroth et al. [incl. Chr. Day and S. Varoutis] Progress from ASDEX Upgrade experiments in preparing the physics basis of ITER operation and DEMO scenario development, Nuclear Fusion 62 (2022) 042006.

doi: 10.1088/1741-4326/ac207f // Open access

Chr. Day, K. Battes, B. Butler, et al. The Pre-Concept Design of the DEMO Tritium, Matter Injection and Vacuum Systems, Fusion Engineering and Design 179 (2022) 113139.

Doi: 10.1016/j.fusengdes.2022.113139 // Open access

T. Haertl, Chr. Day, T. Giegerich, et al. Design and feasibility of a pumping concept based on tritium direct recycling Fusion Engineering and Design 174 (2022) 112969.

Doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112969 // Open access

D. S. Nickel, N. Bagrets, W. H. Fietz, et al. Subscale HTS Fusion Conductor Fabrication and Testing in High Magnetic Background Field

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4, pp. 1-7, June 2022, Art no. 4200907, doi: 10.1109/TASC.2022.3151581

M.Q. Tran, P. Agostinetti, G. Aiello, et al. Status and future development of Heating and Current Drive for the EU DEMO, Fusion Engineering and Design 180 (2022) 113159.

Doi: 10.1016/j.fusengdes.2022.113159 // Open access

J. C. Schwenzler, C. Day, T. Giegerich, et al. Operational Tritium Inventories in the EU-DEMO Fuel Cycle, Fusion Science Technology 78 (2022) 664-675.

Doi: 10.1080/15361055.2022.2101834 // Open access

T. Teichmann, T. Giegerich, Chr. Day Simulation of Mercury Driven Diffusion Pumps for Torus Exhaust Pumping, IEEE Trans. Plasma Science 50 (2022) 4459-4464.

Doi: 10.1109/TPS.2022.3202083

P.T. Lang, T. Bosman, Chr. Day, et al. ASDEX Upgrade Team, Concept for a multi-purpose EU-DEMO pellet launching system, Fusion Engineering and Design 185 (2022) 113333.

Doi: 10.1016/j.fusengdes.2022.113333 // Open access

B. Ploeckl, P.T. Lang, Chr. Day, et al. Testbed for the Pellet Launching System for JT-60SA, Fusion Engineering and Design 186 (2023) 113370.

Doi: 10.1016/j.fusengdes.2022.113370 // Open Access

C. Tantos, S. Varoutis, C. Day, et al. DSMC simulations of neutral gas flow in the DTT particle exhaust system, Nuclear Fusion 62 (2022) 026038.

doi:10.1088/1741-4326/ac42f5

M. Yoshida et al. [incl. Chr. Day] Plasma physics and control studies planned in JT-60SA for ITER and DEMO operations and risk mitigation, Plasma Phys. Control. Fusion 64 (2022) 054004.

Doi: 10.1088/1361-6587/ac57a0 // open access

Y. Kamada et al. [incl. C. Day and H. Strobel]

Completion of JT-60SA construction and contribution to ITER, Nuclear Fusion 62 (2022) 042002.

doi: 10.1088/1741-4326/ac10e7

T. Sunn Pedersen et al. [incl. C. Day, S. Varoutis, C. Tantos] Experimental confirmation of efficient island divertor operation and successful neoclassical transport optimization in Wendelstein 7-X, Nucl. Fusion 62 (2022) 042022.

Doi: 10.1088/1741-4326/ac2cf5 // open access

C. Tantos, E. Kritikos, S. Varoutis, et al. Kinetic modeling of polyatomic heat and mass transfer in rectangular microchannels, Heat and Mass Transfer (2022).

Doi: 10.1007/s00231-022-03224-z // open access

## Proceedingsbeitrag

D. Sánchez-Herranz, O. Nomen, B. Kumar, et al.

Status of the Engineering Design of the IFMIF-DONES high energy beam transport line and beam dump system, Proc. 13th International Particle Accelerator Conference (IPAC'22), Bangkok, Thailand, 12–17 June 2022, pp. 2520-2523.  
doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-THPOST035

I. Podadera, A. Ibarra, M. Weber, et al.  
Commissioning Plan of the IFMIF-DONES Accelerator, LINAC-22 31st International Linear Accelerator Conference, Liverpool, UK, 28 Aug-2 Sep 2022, pp. 330-333.  
doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TU-POJO01

P. T. Lang, M. van Berkel, W. Biel, et al.  
ASDEX Upgrade Team, Real time monitoring of pellet delivery to facilitate burn control in EU-DEMO, 48th EPS Plasma Conference, virtual, 27–30 June 2022.  
[https://indico.fusenet.eu/event/28/contributions/277/attachments/291/700/Paper\\_Final.pdf](https://indico.fusenet.eu/event/28/contributions/277/attachments/291/700/Paper_Final.pdf)

## Buchbeitrag

Y.N. Hörstensmeyer

Holistic fuel cycle modelling of a future fusion reactor = Holistische Modellierung des Brennstoffkreislaufs eines zukünftigen Fusionsreaktors; KITopen, July 2022.  
DOI: 10.5445/IR/1000148749

C. Gleason González

Modelling and validation of neutral particle flow by means of stochastic algorithms using the example of a fusion divertor  
KITopen, November 2022.  
DOI: 10.5445/IR/1000152187

## Vortrag

X. Luo, S. Hanke, K. Battes, et al.  
Monte Carlo Simulation Studies to Support an Integrated Design for the Cryogenic Vacuum Systems of the Einstein Telescope, 68th Int. Symp. of the American Vacuum Society, Pittsburg, PA, USA, 6–11 Nov 2022.

S. Merli, A. Schulz, M. Walker, et al.  
Self-Consistent Modelling of a Linear Microwave Plasma Source in a Magnetic Field, DPG Meeting 2022, Mainz, 28–21 Mar 2022.

Chr. Day, K. Battes, S. Hanke, et al.  
Vacuum system simulations for the Einstein Telescope LF section, 1st Gravitational Wave Detector Vacuum Workshop, La Biodola, Italy, 28–30 Sept 2022.

S. Hanke, K. Battes, Chr. Day, et al.  
Technical concepts and potential solutions for the vacuum challenges of the LF tower, 1st Gravitational Wave Detector Vacuum Workshop, La Biodola, Italy, 28–30 Sept 2022.

P. T. Lang, L.R. Baylor, Ch. Day, et al.  
Plasma fuelling on ITER and new requirements for DEMO, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022.

D. Naujoks, A. Kharwandikar, V. Haak, et al.  
Divertor concept development for the W7-X stellarator experiment, 4th IAEA Technical Meeting on divertor concepts, Vienna, Austria, 7–10 Nov 2022.

T. Kremeyer, D. Boeyaert, Chr. Day, et al.  
Complete H fuel cycle with the island divertor in Wendelstein 7-X, 4th IAEA Technical Meeting on divertor concepts, Vienna, Austria, 7–10 Nov 2022.

F. Siviero, M. Mura, B. Busetto, et al.  
Getter pump mock-up in view of application in modern Neutral Beam Injectors, XXV Conference of the Italian Vacuum Society, Naples, Italy, 10–12 May 2022.

Y. Kathage, Chr. Day  
Validation of hydrogen plasma simulation using optical emission spectroscopy, 94th IUVSTA Workshop on reliable sensing and control of reactive plasmas, Kranjska Gora, Slovenia, 29 May – 2 June 2022.

S. Hanke, X. Luo, K. Battes, et al.  
Simulations of vacuum conditions in the beam pipe and around the cryogenic mirror of the Einstein Telescope, 22nd Int. Vacuum Congress IVC-22, Sapporo, Japan, 11–16 Sep 2022.

K. Battes, S. Hanke, Chr. Day  
Alternative structural materials and their outgassing behaviour, 22nd Int. Vacuum Congress IVC-22, Sapporo, Japan, 11–16 Sep 2022.

S. Hanke, T. Giegerich, Chr. Day, et al.  
Pumping performance of metal foils, 22nd Int. Vacuum Congress IVC-22, Sapporo, Japan, 11–16 Sep 2022.

X. Luo, Chr. Day  
Topological impact of a simple self-replication geometric structure with great application potential in vacuum pumping and photovoltaic industry, 32nd Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Seoul, Korea, 4–8 July 2022.

T. Teichmann, T. Giegerich, Chr. Day  
A Direct Simulation Monte Carlo Framework for the Simulation of Mercury Driven Diffusion Pumps for Fusion Reactor Exhaust Pumping, 32nd Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Seoul, Korea, 4–8 July 2022.

C. Tantos, A. Zilz, Chr. Day, et al.  
Numerical cooling power predictions for a dilution refrigerator via kinetic modeling, 32nd Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Seoul, Korea, 4–8 July 2022.

S. Kunze, P. Perrier, R. Groll, et al.  
Predicting rarefied gas flow through surface functionalized channels, 32nd Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Seoul, Korea, 4–8 July 2022.

A. Santucci, G. Cortese, V. Narcisi, et al.  
Impact of DEMO nuclear buildings air ventilation on the Exhaust Detritiation System, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

M. Dalla Palma, G. Barone, A. Cucchiario, et al.  
Design of DTT vacuum vessel, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

S. Rocella, P. Innocente, G. Dose, et al.  
Design and qualification activities of the First Divertor in the DTT facility, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

P. T. Lang, M. van Berkel, W. Biel, et al.  
Real time monitoring of pellet delivery to facilitate burn control in EU-DEMO, 48th EPS Plasma Conference, virtual, 27–30 June 2022.

C. Tantos, S. Varoutis, Chr. Day  
Transient deterministic modeling of neutral gas flow in DEMO particle exhaust system, 3rd Fusion HPC Workshop, virtual, 15–16 Dec 2022.

S. Varoutis, C. Tantos, C. Day, et al.  
Deterministic and stochastic modelling of particle exhaust in the sub-divertor region of W7-X, 3rd Fusion HPC Workshop, virtual, 15–16 Dec 2022.

T. Giegerich, C. Day, A. Santucci, et al.  
Design considerations and latest architecture of the EU-DEMO fuel cycle inner loops, 13th Int. Conf. On Tritium Science and Technology, Bucharest, Romania, 16–21 Oct 2022.

## Poster

Yu. Igitkhanov, T. Giegerich, Chr. Day  
Fuel purification requirements in a Fusion Power Plant, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022

T. Giegerich, J. Igitkhanov, J.C. Schwenzer, et al.  
Actuators for plasma operation by the DEMO fuel cycle inner loops, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022.

C. Tantos, S. Varoutis, Chr. Day  
Self-consistent modeling of the interface between the divertor and the pumping system in DTT, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022.

G. Dose, S. Rocella, P. Innocente, et al.  
An overview of the conceptual design of the plasma-facing components of the DTT divertor, 4th

IAEA Technical Meeting on divertor concepts, Vienna, Austria, 7–10 Nov 2022.

D. Sánchez-Herranz, O. Nomen, B. Kumar, et al.  
Status of the Engineering Design of the IFMIF-DONES high energy beam transport line and beam dump system, 13th International Particle Accelerator Conference (IPAC'22), Bangkok, Thailand, 12–17 June 2022.

I. Podadera, F. Arranz, S. Becerril, et al.  
Commissioning Plan of the IFMIF-DONES Accelerator, LINAC-22 31st International Linear Accelerator Conference, Liverpool, UK, 28 Aug–2 Sep 2022.

I. Ivanova-Stanik, P. Chmielewski, Ch. Day, et al.  
Divertor power spreading in Divertor Tokamak Test facility for full power scenario with Ar and Ne seeding, 25th Int. Conf. on plasma surface interaction, virtual, 12–17 June 2022.

Yu. Igitkhanov, Chr. Day, S. Varoutis, et al.  
Vortices formation in DEMO divertor during the particle exhaust, 25th Int. Conf. on plasma surface interaction, virtual, 12–17 June 2022.

Y. Kathage, X. Luo, Chr. Day  
Implementation of Test Particle Monte-Carlo codes in the Development of a Metal Foil Pump, 32nd Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, Seoul, Korea, 4–8 July 2022.

Chr. Day, J. Ayllon-Gerola, S. Davis, et al.  
Design of the JT-60SA divertor cryopumps, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

S. Hanke, Ch. Day, T. Giegerich, et al.  
Experimental characterisation of a large NEG pump towards its application in DEMO neutral beam injectors, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

G. Cortese, A. Santucci, J. C. Schwenzer, et al.  
Review of Wet Scrubber Columns technology and preliminary dimensioning for Exhaust Detritiation System in DEMO, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

Y. Kathage, A. Vazquez Cortes, T. Giegerich, et al.  
Hydrogen plasma simulation results and their experimental validation via optical emission spectroscopy, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

J.C. Schwenzer, Chr. Day  
EU-DEMO fuel cycle performance metrics and tritium selfsufficiency criteria, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

T. Teichmann, T. Giegerich, Chr. Day  
Direct Simulation Monte Carlo of Mercury Driven Linear Diffusion Pumps for EUDEMO Torus Exhaust Pumping, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

A. Uihlein, T. Giegerich, Chr. Day  
Hydrogen Isotope Separation process development for the EU-DEMO Fuel Cycle, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

A. Vazquez Cortes, Y. Kathage, S. Hanke, et al.  
HERMESplus Experimental Campaigns with Nb and V as Membrane Materials, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

P.T. Lang, T. Bosman, Chr. Day, et al.  
ASDEX Upgrade Team, Concept for a multi-purpose EU-DEMO pellet launching system, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

B. Ploeckl, P.T. Lang, Chr. Day, et al.  
Testbed for the Pellet Launching System for JT-60SA, 32nd SOFT, Dubrovnik, Croatia, 18.–23. Sept 2022.

J.C. Schwenzer, A. Santucci, Chr. Day  
Modeling of the HCPB He-CPS for EU-DEMO – Process simulations of molecular sieves & NEG sorbents, TOFE-22, Anaheim, CA, USA, 12–16 June 2022.

A. Uihlein, T. Giegerich, Chr. Day  
Investigations of a Membrane-Coupled Temperature Swing Absorption Process for Hydrogen Isotope Separation in the EU-DEMO Fuel Cycle, 13th Int. Conf. On Tritium Science and Technology, Bucharest, Romania, 16–21 Oct 2022.

Y. Kathage, A. Vazquez Cortes, S. Hanke, et al.  
Plasma-driven permeation with noble gas admixtures, 13th Int. Conf. On Tritium Science and Technology, Bucharest, Romania, 16–21 Oct 2022.

J.C. Schwenzer, Chr. Day, T. Giegerich, et al.  
Water Balance and Water Detritiation Requirements in the EU DEMO, 13th Int. Conf. On Tritium Science and Technology, Bucharest, Romania, 16–21 Oct 2022.

T. Teichmann, X. Luo, T. Giegerich, et al.  
Estimation of the effective pumping speed for deuterium and tritium of the Linear Diffusion Pumps in the EU-DEMO torus exhaust vacuum pumping system, 13th Int. Conf. On Tritium Science and Technology, Bucharest, Romania, 16–21 Oct 2022.

## Outreach

Thinking big in Vacuum R&D, CERN Courier Vacuum Edition 2022, pp. 5–8  
<https://cerncourier.com/a/thinking-big-invacuum-rd/>

Daniel Clery, OUT OF GAS – A shortage of tritium fuel may leave fusion energy with an empty tank, Science, Vol 376, Issue 6600.  
<https://www.science.org/content/article/fusion-power-may-run-fuel-even-started>

# Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)

## Zeitschriftenaufsatz

- G. dos Santos; F. G. R. Martins; F. Sass; et al. "A 3-D Finite-Element Method Approach for Analyzing Different Short Circuit Types in a Saturated Iron Core Fault Current Limiter". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* vol. 32, no. 3 (2022), p. 5600713. doi: 10.1109/TASC. 2022.3142047.
- F. Huber; W. Song; M. Zhang, et al. "The T-A formulation: an efficient approach to model the macroscopic electromagnetic behaviour of HTS coated conductor applications". *Superconductor Science and Technology* vol. 35, no. 4 (2022), p. 043003. doi: 10.1088/1361-6668/ac5163.
- B. M. Oliveira Santos; G. dos Santos; F. Si-rois; et al. "2-D Modeling of HTS Coils With T-A Formulation: How to Handle Different Coupling Scenarios". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* vol. 32, no. 5 (2022), p. 5900804. doi: 10.1109/TASC. 2022.3160512.
- F. Trillaud; E. Berrospe-Juarez; V. M. R. Zermeno, et al.. "Electromagneto-mechanical model of high temperature superconductor insert magnets in ultra high magnetic fields". *Superconductor Science and Technology* vol. 35 (2022), p. 054002. doi: 10.1088/1361-6668/ac4b9f.
- C. R. Vargas-Llanos; F. Huber; N. Riva; et al. "3D homogenization of the T-A formulation for the analysis of coils with complex geometries". *Superconductor Science and Technology* vol. 35, no. 12 (2022), p. 124001. doi: 10.1088/1361-6668/ac9932.
- Z. Wen; H. Zhang; M. Tian; et al. "A statistical model for the design of rotary HTS flux pumps based on deep-learning neuron network". *Superconductivity* vol. 3 (2022), p. 100017. doi: 10.1016/j.supcon.2022.100017.
- A. Lani, V. Sharma, V. F. Giangaspero et al. A Magnetohydrodynamic enhanced entry system for space transportation: MEESSST *Journal of Space Safety Engineering* (2022) in press, available online doi: 10.1016/j.jsse.2022.11.004.
- Corato V., Bruzzone P., Bykovskiy N. et al. Strategy for Developing the EU-DEMO Magnet System in the Concept Design Phase *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 6, pp. 1-7, Sept. 2022, Art no. 4201407, doi: 10.1109/TASC.2022.3153248.
- P. Cayado, L. Grünwald, M. Erbe, et al. Critical current density improvement in CSD-grown high-entropy REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> films, *RSC Adv.* 12, 28831 (2022)
- J. Hänisch, K. Iida, P. Cayado, et al. Microstructure, pinning properties, and aging of CSD-grown SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> films with and without BaHfO<sub>3</sub> nanoparticles, *Supercond. Sci. Technol.* 35 (2022) 084009, <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac7b4d>
- D. Li, P. Shen, J. Tian, et al. A disorder-sensitive emergent vortex phase identified in high-T<sub>c</sub> superconductor (Li,Fe)OHFeSe, *Supercond. Sci. Technol.* 35 (2022) 064007, <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac68a9>
- M. Y. Chen, K. Iida, K. Kondo, et al. Inter- to intra-layer resistivity anisotropy of NdFeAs(O,H) with various hydrogen concentrations, *Phys. Rev. Mat.* 6, 054802 (2022), DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.054802
- J. Hänisch, S. Wimbush Properties of Superconductors, in: J. Rumble (ed), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 103rd edition, CRC Press, 2022
- J. Hänisch, S. Wimbush High-Temperature Superconductors, in: J. Rumble (ed), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 103rd edition, CRC Press, 2022

Bagrets N., Heller R., Weis J.R., et al.  
„Thermal Resistance Between Metallic Surfaces of Copper and Stainless Steel at Different Temperatures and Applied Forces for High Current HTS Cable-in-Conduit Conductors“ IEEE Transactions on Applied Superconductivity, (2022) 32 (6), 8800205,  
DOI: 10.1109/TASC.2022.3154327

Hohe J., Schober M., Weiss K.-P., et al.  
„Verification of Puck’s criterion for CFRP laminates under multiaxial loads at ambient and cryogenic temperatures“ Composites Science and Technology (2022), 228, 109631,  
DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109631

Santillana I.A., Vallone G., Anderssen E., et al.  
„Mechanical Characterization of Low-Carbon Steels for High-Field Accelerator Magnets: Application to Nb<sub>3</sub>Sn Low- $\beta$  Quadrupole MQXF“ IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2022), 32 (6), 4100507,  
DOI: 10.1109/TASC.2022.3149853

Nickel D.S., Bagrets N., Fietz W.H., et al.  
„Subscale HTS Fusion Conductor Fabrication and Testing in High Magnetic Background Field“ IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2022) 32 (4), 4200907,  
DOI: 10.1109/TASC.2022.3151581

Tirunilai A.S., Weiss K.-P., Freudenberger J., et al.  
„Revealing the Role of Cross Slip for Serrated Plastic Deformation in Concentrated Solid Solutions at Cryogenic Temperatures“ Metals,(2022) 12 (3), 514,  
DOI: 10.3390/met12030514

Corato et al.  
„The DEMO magnet system – Status and future challenges“ Fusion Engineering and Design,(2022) 174, 112971 , OI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112971

Weiss K.-P., Hetzler S, Kvackaj T., et al.  
“Cryogenic material properties of additive manufactured 316L stainless steel“, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1241 (2022) 012047 ,  
doi:10.1088/1757-899X/1241/1/012047

Heiduk, M.; Wolf, M. J.; Fietz, W. H.  
Reel-to-reel fabrication of HTS CroCo Strands and Test of HTS CroCo Demonstrator Coils  
2022. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 32 (4), Art.-Nr.: 4800805.  
doi:10.1109/TASC.2022.3152985

Wolf, M. J.; Fietz, W. H.; Heiduk, M.; et al.  
200 kA DC Busbar Demonstrator DEMO 200 – Conceptual Design of Superconducting 20 kA Busbar Modules Made of HTS CroCo Strands  
2022. IEEE transactions on applied superconductivity, 32 (4), 1–5. doi:10.1109/TASC.2022.3152130

## Proceedingsbeitrag

S.I. Schlachter, J. Brand, S. Elschner et al.  
“Test of a DC-HTS Busbar Demonstrator for Power Distribution in Hybrid-Electric Propulsion Systems for Aircraft“  
CEC/ICMC 2021, July 19-23, 2021, virtual IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1241 (2022) 012037  
doi:10.1088/1757-899X/1241/1/012037

Fink S., Fuhrmann U., Zwecker V.  
Cryogenic testing of a 25 kV RIS bushing  
CEC/ICMC 2021, July 19-23, 2021, virtual IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1240 (2022) 012148  
doi: 10.1088/1757-899X/1240/1/012148

S. Fink, R. Müller and V. Zwecker  
Cryogenic high voltage testing of a 25 kV RIS bushing  
2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), 2022,  
pp. 1-4,  
doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961329.

M. Yazdani-Asrami, S. M. Seyyedbarzegar, A. Sadeghi, et al.  
„High temperature superconducting cables and their performance against short circuit faults: current development, challenges, solutions, and future trends“  
Superconductor Science and Technology vol. 35, no. 8 (2022), p. 083002.  
doi: 10.1088/1361-6668/ac7ae2.

## Vorträge

S.I. Schlachter, N. Bagrets, M.B.C. Branco et al.  
Development and Test of High-Temperature Superconductor Harness for Cryogenic Instruments on Satellites  
Applied Superconductivity Conference 2022, October 22–28, 2022, Honolulu, USA

Fink S., Müller R., Zwecker V.  
Cryogenic high voltage testing of a 25 kV RIS bushing  
IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE’22), virtual, 25.9.-29.9.2022

Sonja I. Schlachter, Joerg Brand, Steffen Elschner et al.  
“DEMO200 – First steps towards a superconducting 200 kA DC busbar demonstrator“  
Applied Superconductivity Conference 2022, October 22-28, 2022, Honolulu, USA

M. J. Wolf & T. Arndt  
Wasserstoff und Supraleitung  
ZIEHL VIII, Berlin, 5. April 2022

T. Arndt  
Energy & Material Efficiency: Liquid Hydrogen & HTS – a perfect fit  
Konferenz CIMTEC, Perugia, Italien,  
23.06.2022

T. Arndt  
Linking the Energy Vector “Liquid Hydrogen” to Power Engineering – HTS as an enabler  
Konferenz HTS4FUSION, 29.06.2022,  
Karlsruhe

T. Arndt  
Liquid Hydrogen – Transport, Storage & Usage in Power Engineering  
Zentrum Energie, Wasserstoff-Woche, Triangel, 30.06.2022, Karlsruhe

T. Arndt  
Magnet Infrastructure (of KIT)  
Konferenz Test Facilities for Superconducting Magnets, INFN-LASA, Mailand,  
17.11.2022

T. Arndt  
Status and Prospects for Superconducting Power Systems  
Konferenz ISS 2022, Tsukuba, Japan und virtuell, 29.11.2022

Michael Wolf  
AppLHy! – Transport and Application of Liquid Hydrogen (LH2)  
TransHyDE- wissenschaftliche Konferenz,  
Berlin, 30.11.2022

S. Palacios  
How Hybrid Pipelines Tackle Multiple Challenges in the Energy Transition  
TransHyDE- wissenschaftliche Konferenz,  
Berlin, 30.11.2022

S. Palacios  
How Hybrid Pipelines Tackle Multiple Challenges in the Energy Transition  
Ideenwettbewerb „Energie und Umwelt Meine Idee für morgen“  
Stiftung Energie & Klimaschutz, Stuttgart,  
25.11.2022

## Poster

Q.H. Pham, M. Noe:  
“Experimental investigation of the switching behavior of high-temperature superconductors with an alternating magnetic field”,  
Applied Superconductivity Conference  
2022, October 22-28, 2022, Honolulu, USA

Sonja Schlachter, Marcus Collier-Wright,  
Manuel La Rosa Betancourt et al.  
“A Magnetohydrodynamic Entry System for Space Transportation (MEESST)”  
Applied Superconductivity Conference  
2022, October 22-28, 2022, Honolulu, USA

M. Wehr, M. J. Wolf, T. Arndt  
Combined Large-Scale Transport of Chemical and Electrical Energy – Design of a Hybrid Energy Transfer Line with LH2 and High Temperature Superconductors  
Helmholtz-Workshop, Frankfurt,  
30.05.2022

M. Wehr, M. J. Wolf, T. Arndt  
AppLHy! – Conceptual Designs of hybrid Energy Pipelines (LH2 + HTS) – Experimental Studies on the Influence of the thermal Coupling of HTS Wires and Cryogen  
ASC 2022, Honolulu, USA, 21.10.2022

Barth, A. Ballarino, A. Devred et al.  
Onset of Mechanical Degradation due to Transverse Compressive Stress in Nb3Sn Rutherford-Type Cables  
K. Puthran, C. ASC  
2022, Honolulu, USA

S. Fatehi, A. Bernhard, S.C. Richter, et al.  
Validating a HTS miniature, periodic quadrupole driving a short length transport line for laser-plasma accelerators  
ASC 2022, Honolulu, USA

# Energiesystemdesign (ESD)

## Buchartikel

De Carne, Giovanni; Liserre, Marco; Wald, Felix;  
"Smart transformer control of the electrical grid" *Advances in Power System Modelling, Control and Stability Analysis*. Ed.: F. Milano, p.451-471, 2022, doi: 10.1049/PBPO217E\_ch13

## Zeitschriftenaufsatz

G. De Carne; Lauss, Georg; Syed, Mazheruddin H. et al.,  
„On Modeling Depths of Power Electronic Circuits for Real-Time Simulation – A Comparative Analysis for Power Systems“ *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 9, pp. 76-87, 2022, doi: 10.1109/OAJPE.2022.3148777.

G. De Carne, A. Morandi and S. Karrari,  
„Supercapacitor Modeling for Real-Time Simulation Applications“ *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 509-518, July 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3165985.

Shahab Karrari, Giovanni De Carne, Mathias Noe,  
"Adaptive droop control strategy for Flywheel Energy Storage Systems: A Power Hardware-in-the-Loop validation" *Electric Power Systems Research* 212 (2022) 108300, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108300.

S. Karrari, N. Ludwig, G. De Carne et al.,  
„Sizing of Hybrid Energy Storage Systems Using Recurring Daily Patterns“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 4, pp. 3290-3300, July 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3156860.

T. Jacob, A. Buchholz, M. Noe et al.  
Comparative Life Cycle Assessment of Different Cooling Systems for High-Temperature Superconducting Power Cables *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, June 2022, Art no. 4802805 doi: 10.1109/TASC.2022.3168239.

## Proceedingsbeitrag

G. Arena, D. Vinnikov, A. Chub et al.,  
„Accuracy Analysis of Dual Active Bridge Simulations under Different Integration Methods“ *2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Rome, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEIT56783.2022.9951711.

F. Ashrafidehkordi and G. De Carne,  
„Improved Accuracy of the Power Hardware-in-the-Loop Modeling using Multi-rate Discrete Domain“ *2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Kiel, Germany, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923128.

Buticchi, Giampaolo; De Carne, Giovanni; Pereira, Thiago et al.  
"A Multi-port Smart Transformer for Green Airport Electrification" *24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE ECCE Europe 2022)*, Hanover, Germany, 05.09.2022–09.09.2022; Publisher: IEEE, ISBN 978-9-0758-1539-9, 2022

M. Courcelle, D. Kottonau and G. De Carne,  
„Synchronized Micro-Controllers-based Data Acquisition System for Energy Plants using Modbus Protocol“ *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9948022.

G. De Carne and D. Kottonau,  
„Power Hardware In the Loop laboratory testing capability for energy technologies“ *2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Rome, Italy, 2022, pp. 1-5, doi: 10.23919/AEIT56783.2022.9951766.

De Carne, Giovanni; Liserre, Marco; Wald, Felix;  
Smart transformer control of the electrical grid *Advances in Power System Modelling, Control and Stability Analysis*. Ed.: F. Milano, p.451-471, doi: 10.1049/PBPO217E\_ch13



Ö. Ekin, G. Arena, S. Waczowicz, et al.  
Comparison of Four-Switch Buck-Boost and  
Dual Active Bridge Converter for DC Mi-  
crogrid Applications  
2022 IEEE 13th International Symposium  
on Power Electronics for Distributed Gene-  
ration Systems  
(PEDG), Kiel, Germany, 2022, pp. 1-6,  
doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923074.

P. Emiliani, A. Blinov, A. Chub, et al.,  
Black Start and Fault Tolerant Operation of  
Isolated Matrix Converter for dc Microgrids  
IECON 2022 – 48th Annual Conference of  
the IEEE Industrial Electronics Society, Brus-  
sels, Belgium, 2022, pp. 1-5,  
doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968735.

P. Emiliani, A. Blinov, A. Chub, et al.,  
DC Grid Interface Converter based on  
Three-Phase Isolated Matrix Topology with  
Phase-Shift Modulation,  
2022 IEEE 13th International Symposium  
on Power Electronics for Distributed Gene-  
ration Systems  
(PEDG), Kiel, Germany, 2022, pp. 1-6,  
doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923256.

Q. Tao, Qiucen; Geis-Schroer, Johanna;  
Wald, Felix et al.,  
The Potential of Frequency-Based Power  
Control in Distribution Grids,  
2022 IEEE 13th International Symposium  
on Power Electronics for Distributed Gene-  
ration Systems (PEDG), Kiel, Germany,  
2022, pp. 1-6,  
doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923112.

# Eingeladene Vorträge

## **Katharina Battes**

- K. Battes, Outgassing rate studies and Monte Carlo simulations, DPG Meeting 2022, Regensburg, 4–9 Sept. 2022

## **Christian Day**

- Chr. Day, Deuterium-Tritium fuel cycle: Overview and DEMO objectives, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022.
- Chr. Day, Overview of tritium designs and developments for European DEMO, 13th Int. Conf. On Tritium Science and Technology, Bucharest, Romania, 16–21 Oct 2022

## **Stefan Hanke**

- S. Hanke, Experimental characterisation of a NEG pump of novel size – a major step to its application in neutral beam injectors of future fusion devices, DPG Meeting 2022, Regensburg, 4–9 Sept. 2022.

## **Jens Hänisch**

- J. Hänisch, Recent Developments in Fe-Based Superconductors – Towards Understanding Their Vortex Matter and Possible Applications, invited talk, MRS Spring Meeting, 24.05.22, online

## **Bernhard Holzapfel**

- Tailored High Tc Superconductors for Power and Magnet Applications MSM Conference, Duisburg, 31.8.2022
- HTSC Coated Conductors for Power and Magnet Applications ITC31 Conference, virtuell, 9.11.2022
- Tailored High Tc Superconductors for Power and Magnet Applications: nm defects for kA on the km scale Walther-Meißner-Seminar, Garching, 2.12.22

## **Jonas Schwenzer**

- J.C. Schwenzer, EU-DEMO fuel cycle operation modelling and design, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022.

## **Christos Tantos**

- C. Tantos, Transient modeling of the gas flows in the gas injection systems of fusion reactors, DPG Meeting 2022, Regensburg, 4–9 Sept 2022.

## **Tim Teichmann**

- T. Teichmann, Direct Simulation Monte Carlo of diffusion pumps for the application in fusion reactors, DPG Meeting 2022, Regensburg, 4–9 Sept 2022.

## **Stylios Varoutis**

- S. Varoutis, Particle exhaust and vacuum pumping on ITER and other devices, IAEA Technical Meeting on Plasma Physics and Technology Aspects of the Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy, Vienna, Austria, 11–13 Oct 2022.

## **Klaus-Peter Weiss**

- Weiss K.-P., „Structural material challenges for fusion magnets“, Symposium on Fusion Technology SOFT 2022 Dubrovnik, Invited Talk

# Schutzrechtsbestände

- Kryostat mit einem Magnetspulensystem, das eine LTS- und eine gekapselte HTS-Sektion umfasst  
Kläser, Marion  
US 8255023
- Kryostat mit einem Magnetspulensystem, das eine unterkühlte LTS- u. eine in einem separaten Heliumtank angeordnete HTS-Sektion umfasst  
Schneider, Theo  
US 8255022
- Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einer veränderbaren Spulenimpedanz  
Noe, Mathias; Schacherer, Christian  
DE 2532016  
FR 2532016  
GB 2532016  
JP 5907894  
US 9583258
- Isolierter Hochtemperatur-Bandsupraleiter und Verfahren zu seiner Herstellung  
Brand, Jörg; Elschner, Steffen; Fink, Stefan; Goldacker, Wilfried; Kudymow, Andrej  
AT 2729969  
CH 2729969  
DE 2729969  
FR 2729969  
GB 2729969  
IT 2729969  
KR 10192955  
US 939840
- 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  
US 10604898
- 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  
DE 102015010636.8  
FR 3335228  
GB 3335228  
IE 3335228  
US 10825585
- Verbinder für supraleitfähige Leiter und Verwendung des Verbinders  
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.  
CH 3335280  
CN 10814961  
DE 3335280  
DE 102015010634.1  
FR 3335280  
GB 3335280  
IE 3335280  
US 10218090
- Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines supraleitfähigen Leiters  
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.  
CN 10814715  
DE 102015010676.7  
EP 16756943.3-1212  
US 11328841

- Design of contacts for superconducting busbars and cables  
Rodriguez Zermeno, Victor  
DE 3352303  
FR 3352303  
GB 3352303
- Verfahren und Vorrichtung zur Anreicherung oder Abreicherung mindestens eines Wasserstoffisotops in einem Gasstrom  
Day, Christian; Giegerich, Thomas; Hörstems Meyer, Yannik; Müller, Ralf; Peters, Benedikt  
DE 3441129  
GB 3441129
- Stromschienensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungsstück sowie Stromschiene mit einer Vielzahl von solchen Elementen  
Kudymow, Andrej; Rodriguez Zermeno, Victor; Strauß, Severin  
DE 202017102659
- Stromschienensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungsstück sowie Stromschiene mit einer Vielzahl von solchen Elementen  
Kudymow, Andrej; Rodriguez Zermeno, Victor; Strauß, Severin  
EP 18720292.4
- Bitterprinzipbasierte Magnetvorrichtung und Verwendung einer bitterprinzipbasierten Magnetvorrichtung  
Arndt, Tabea  
DE 102020124852.0  
WO PCT/EP2021/025312
- Bandleitervorrichtung und Kabel, das die Bandleitervorrichtung aufweist  
Arndt, Tabea  
DE 102020128417.9  
WO PCT/EP2021/078897
- Hochtemperatur supraleitende Schaltvorrichtung  
Martz, Simon; Noe, Mathias; Pham, Quoc Hung  
LU LU502329
- Hochtemperatur supraleitender Schalter  
Noe, Mathias  
LU LU502334
- Modular High Capacity Current Lead  
Wolf, Michael J.  
US 63/278,850

# Kontakt

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

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

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

## **Leitung**

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

## **Sekretariat**

Dagmar Klimmek (-23501)

## **Supraleiter- und Kryomaterialien**

Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)

## **Supraleitende Energietechnische Anwendungen**

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

## **Geschäftsführer**

Kai Bauer (-23705)

## **Kryobetrieb**

Dr. Holger Neumann (-22625)

## **Supraleitende Magnettechnologie**

Prof. Dr. Tabea Arndt (-23515)

## **Technologie des Fusionsbrennstoffkreislaufs**

Dr. Christian Day (-22609)