

Florian Schreiner

Design of a three-stage cooled Current Lead for Superconducting High Current DC Busbars in Industrial Applications

Band 8

Design of a three-stage cooled Current Lead for Superconducting High Current DC Busbars in Industrial Applications

Entwicklung einer dreistufig gekühlten Stromzuführung
für supraleitende DC-Hochstrom-Stromschienensysteme
in industriellen Anwendungen

vom

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. **Florian Schreiner**
geb. in Landau in der Pfalz

Tag der Einreichung:	28. März 2019
Tag der mündlichen Prüfung:	29. Mai 2019
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky
Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr. rer. nat. Marco Rahm
Erster Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
Zweiter Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und
Energiemanagement

Band 8

Florian Schreiner

**Design of a three-stage cooled Current Lead for
Superconducting High Current DC Busbars in
Industrial Applications**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 20219

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7307-2

ISSN 2366-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Declaration of academic honesty

Hereby I declare that the present thesis is drawn up by myself without help of third parties but the support of my supervisor, that all used sources and tools including the internet are completely and exactly mentioned, and that everything is marked which is taken unchanged, shortened or analogous from other literature.

Frankfurt am Main, 19 November 2019



Florian Schreiner

CURRICULUM VITAE

DIPL.-ING. FLORIAN SCHREINER

Martin-Luther-Straße 7
60316 Frankfurt am Main
Deutschland

+49 176 56524614

florian.schreiner-ph@gmx.de



PERSÖNLICHE ANGABEN

Geburtsdatum	24. Juli 1986
Geburtsort	Landau (in der Pfalz)
Staatsangehörigkeit	Deutsch

BERUFSERFAHRUNG

01/2019 bis 06/2019	Keil & Schaafhausen Patent- und Rechtsanwälte, Frankfurt am Main Patentanwaltskandidat
08/2016 bis 03/2018	Vision Electric Super Conductors GmbH, Kaiserslautern Projektarbeit als angestellter Ingenieur und Promotion im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit der Technischen Universität Kaiserslautern • Entwicklung und Aufbau eines Stromzuführungsprototypen und Durchführung von verschiedensten Labortests am Prüfstand • Verifikation und Validierung des Prototypen anhand der durchgeführten Labortests • Integration des Prototypen in ein supraleitendes Demonstrator-DC-Hochstrom-Stromschienensystem • Entwicklung, Installation und Inbetriebnahme des supraleitenden Demonstrator-Stromschienensystems für eine Chlorelektrolyse eines großen deutschen Chemiekonzerns
07/2014 bis 07/2016	Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich mit dem Ziel der Promotion im Rahmen des Kooperationsprojektes mit der Industrie • Numerische Simulationen zur elektromagnetischen und thermischen Auslegung der Stromzuführung für supraleitende DC-Stromschienensysteme (basierend auf <i>MATLAB+FEMM</i> und <i>ANSYS</i>) • Auswahl und Aufbau geeigneter Messausrüstung für einen DC-Hochstrom-Laborprüfstand, Programmierung und Anwendung von Mess- und Automatisierungssoftware • Betreuung und Evaluation von Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen im Rahmen von Abschlussarbeiten
03/2014 bis 06/2014	Vision Electric Super Conductors GmbH, Kaiserslautern Projektarbeit als angestellter Ingenieur
06/2006 bis 02/2007	Caritas Werkstatt für Menschen mit Beeinträchtigungen, Pirmasens Zivildienst

AKADEMISCHER WERDEGANG

04/2018 bis 05/2019	Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik Promotion zum Thema <i>Stromzuführungen für supraleitende DC-Hochstrom-Stromschienensysteme</i> , Abschlussnote: magna cum laude („sehr gut“)
04/2010 bis 09/2013	Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe Diplomstudium Maschinenbau - Vertiefungsrichtung <i>Energie- & Umwelttechnik</i> , Abschlussnote: 1,0 („mit Auszeichnung“) • Hauptfächer: Energiesysteme, Erneuerbare Energien, energieeffiziente Gebäude, thermische Turbomaschinen • Thema Diplomarbeit: Entwicklung eines Sorptionsmaschinen- und eines Schichtspeichermodells in <i>TRNSYS</i> (basierend auf <i>Fortran</i>) • Thema Studienarbeit: Grobstruktursimulation von turbulenten Strömungen und Entwicklung von Turbulenzmodellen in <i>OpenFOAM</i> (basierend auf <i>C++</i>)
04/2008 bis 03/2010	Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern Vordiplom in Maschinenbau & Verfahrenstechnik
04/2007 bis 03/2008	Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe Studium der Physik
08/1997 bis 04/2006	Trifelsgymnasium, Annweiler am Trifels Allgemeine Hochschulreife, Abschlussnote: 1,1

PRAKTIKA

01/2012 bis 07/2012	juwi AG, Wörrstadt Fachpraktikum • Simulation des Wasser-Dampf-Kreislaufs von Holzheizkraftwerken
10/2004	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN), Kanton Genf Praktikum • Elektr. Funktionstests von Bauelementen des ATLAS-Detektors am LHC

FREMDSPRACHENKENNTNISSE

Englisch	Verhandlungssicher (in Wort und Schrift)
Französisch	Erweiterte Grundkenntnisse
Spanisch	Grundkenntnisse

IT-KENNTNISSE

Textverarbeitung	MS Office, TeX
Programmiersprachen	C++, Fortran, LabVIEW, MATLAB/Simulink, Mathematica, R
Simulationssoftware	ANSYS/Maxwell, FEMM, OpenFOAM, TRNSYS
Literatur-/Versionsverwaltung	Citavi, Git
Bussysteme	GPIO/IEC-625-Bus, Modbus/TCP, Modbus/RTU (RS-485 Schnittstelle)
Sonstiges	GenOpt, Linux-Systeme, Solid Edge

PERSÖNLICHE INTERESSEN

Klettern, Mountainbiken/Rennradfahren, Fußball, Yoga

Frankfurt am Main, den 17. Juni 2019


Florian Schreiner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei allen zu bedanken, die mich während meiner Promotion unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Wellßow, meinem Doktorvater, für die Betreuung dieser Arbeit und für Ihre hilfreichen und konstruktiven Anregungen, die mir stets einen kritischen Zugang zu dieser Thematik eröffneten und diese Arbeit in der jetzt vorliegenden Form erst ermöglichten.

Ich danke weiterhin in besonderem Maße Herrn Prof. Dr.-Ing. Noe für die stets hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung und thematische Ausrichtung dieser Arbeit. Sie haben den inhaltlichen Rahmen dieser Dissertation abgesteckt, mich stets mit viel Verständnis unterstützt und meine Arbeit über einen längeren Zeitraum begleitet. Für die vielfältig erfahrene Hilfe möchte ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Gutheil, Frau Mosbach-Theiss und Frau Häbel danke ich für unermüdliche Unterstützung, die Sie mir stets entgegengebracht haben in meiner Zeit als Doktorand an der Technischen Universität Kaiserslautern.

Diese Promotion wurde im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen der Technischen Universität Kaiserslautern und dem Unternehmen *Vision Electric Super Conductors GmbH* durchgeführt. Herrn Dr.-Ing. Reiser, meinem ehemaligen Chef bei der Vision Electric Super Conductors, danke ich, dass er es mir in seinem Unternehmen ermöglicht hat, dieses Promotionsprojekt zu verwirklichen. Weiterhin danke ich natürlich ebenso allen anderen ehemaligen Kollegen dort vielmals für die fortwährende Unterstützung, für all die anregenden Gespräche und nicht zuletzt für die tolle Zeit, die ich dort hatte.

Mein besonderer Dank gilt schließlich neben meinen vielen guten und engen Freunden meinen Eltern Rita und Norbert, die mich auf meinem gesamten bisherigen Weg immer begleitet, unterstützt und stets an mich geglaubt haben. Weiterhin gilt mein Dank meinem Bruder Fabian, der stets ein offenes Ohr für mich hatte und mich mit seiner wissenschaftlichen Expertise unterstützt hat. Ich danke auch meiner ehemaligen Lebensgefährtin Sophie Göttel, die mich über lange Jahre hinweg während meines Studiums unterstützt und immer an mich geglaubt hat. Ohne dich wäre diese Arbeit so nie entstanden, danke für alles.

Schließlich möchte ich meiner Freundin Martha Penzold für die liebevolle moralische Unterstützung danken. Du bist stets für mich da, glaubst an mich und hast mich ermutigt und konntest mir immer wieder etwas von deinem wunderbaren Optimismus abgeben, der mich auch in schwierigen Zeiten zuverlässig wieder aufgebaut hat. Deine Liebe und tiefe Zuneigung haben mich durch die schwierige und mit Zweifeln behaftete letzte Phase der Promotion getragen und mir unendlich viel Kraft gegeben.

Abstract

Many industrial applications such as chlorine electrolysis or aluminium plants require very high direct electric currents to operate the corresponding chemical processes. These currents are usually transported with huge busbar systems made of copper or aluminium causing electrical losses. Hence, there is a great potential to use high-temperature superconductors in these applications to carry the high currents and to reduce the losses.

Current leads are the components which connect the conventional room temperature applications to the superconducting system. Therefore, the task of a current lead is to transfer the electric current from room temperature level to the operating temperature level of the high-temperature superconductors, while maintaining minimum losses caused by the current lead. The losses of an optimized current lead are proportional to the transferred electric current and the industrial applications mentioned above have in common that the transmission systems have relatively short lengths, but very high currents are transmitted. Hence, the design of an efficient current lead in these applications is very important to be able to realise an overall efficient system.

In the context of this thesis, different types of resistive current leads for high-temperature superconductor applications are presented and compared to each other: conduction cooled, continuously cooled, multi-stage cooled and vapour cooled current leads are considered. This comparison is based on a new optimization approach to design resistive current leads. An overall electrical optimization approach is used which takes into account the electrical losses in the resistive current path of the current lead.

The most suitable approach for industrial applications of the different types of resistive current leads was selected to design and build a prototype: a multi-stage cooled current lead with two intermediate cooling stages optimized for a rated current of 20 kA. A completely closed cooling system was employed for this current lead to allow a stand-alone operation in industrial applications. The design and manufacturing process of this multi-stage cooled current lead is described in detail. The joint between the resistive copper path and the superconductor tapes was realised by a novel soldered copper lamella high-temperature superconductor tape connection.

A thermal-electric coupled 3D finite element method analysis of the current path was carried out and the built prototype of the current lead was tested in the laboratory. The experimental results are analysed and compared to the numerical calculations. Three different cases are investigated: operating at a current of 20 kA (rated current operation), 10 kA (part load operation) and 0 kA (no-load operation). The overall electric power consumption of the current lead consists of the electric power which is necessary to run the three refrigeration units and of the electrical losses which are generated in the resistive current path. The experimental results show a specific overall electric power consumption of about $0.95 \frac{\text{kW}}{\text{kA}}$ in the rated current operation.

Since a current lead and its geometry are always optimized and designed for one specific electric current, the specific losses of the current lead increase if the current deviates from the rated current. Within the scope of this thesis, a new design approach for resistive current leads is investigated which can adapt to different load conditions and therefore retain the minimum possible losses. A stepped arrangement of stacked copper lamellas and high-temperature superconductor tapes in parallel to vary the geometry of the resistive current path is considered. The investigations show that with this approach an almost four times lower specific heat leakage to the cryogenic temperature level can be achieved in part load operation. Consequently, the electric power consumption of the last cooling stage can be reduced which leads to a lower overall electric power consumption of the current lead in part load operation.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird erläutert, dass es ein großes Potential für die Nutzung von Hochtemperatursupraleitern in industriellen Anwendungen gibt, welche sehr hohe elektrische Gleichströme benötigen, um die entsprechenden chemischen Prozesse zu betreiben. Stromzuführungen übertragen den elektrischen Strom von Raumtemperaturniveau auf das Betriebstemperaturniveau der Hochtemperatursupraleiter und umgekehrt. Bei optimaler Auslegung sind die Verluste, die durch eine Stromzuführung in das kryogene Temperaturniveau eingebracht werden, proportional zu dem übertragenen elektrischen Strom. Eine Stromzuführung und ihre Geometrie sind immer optimiert und ausgelegt für einen bestimmten Strom. Somit verursacht beispielsweise eine Stromzuführung, welche für einen elektrischen Strom von 10 kA optimiert und ausgelegt ist und ebenso bei diesem Strom betrieben wird, zehnmal höhere Verluste als eine andere Stromzuführung, welche für einen Strom von nur 1 kA optimiert und ausgelegt ist und bei diesem niedrigeren Strom betrieben wird.

Die genannten industriellen Anwendungen haben gemeinsam, dass die Übertragungssysteme relativ kurze Längen haben, aber sehr hohe elektrische Strom übertragen werden. Daher verursachen Stromzuführungen in diesen Anwendungen in der Regel den Großteil der anfallenden Verluste und es ist sehr wichtig, effiziente Stromzuführungen zu entwerfen und bereitzustellen, um insgesamt effiziente Systeme realisieren zu können.

Der Einsatz von Supraleiter-Hochstromschienensystemen in besagten industriellen Anwendungen macht die Verwendung von sogenannten binären Stromzuführungen unmöglich. Diese Art von Stromzuführungen ist für Tieftemperatursupraleiteranwendungen gedacht, da hier der letzte Teil des Strompfades aus Hochtemperatursupraleitermaterial besteht und damit der Wärmeeintrag auf das Betriebstemperaturniveau der Tieftemperatursupraleiter reduziert werden kann. Bei Hochtemperatursupraleiteranwendungen auf einem Temperaturniveau von ca. 65 K - 80 K kommen dagegen ausschließlich rein resistive Stromzuführungen in Frage.

Resistive Stromzuführungen bestehen in der Regel aus einem metallischen Leitermaterial wie Aluminium, Kupfer oder Messing. Im Rahmen dieser Arbeit wird Kupfer als bevorzugtes metallisches Material verwendet und analytische Funktionen in Abhängigkeit von der Temperatur werden zur Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit und des spezifischen elektrischen Widerstandes des Kupfers verwendet.

Hochtemperatursupraleiter-Bänder werden nach dem Prinzip einer Architektur beschichteter Leiter entworfen und hergestellt. In Kapitel 2 wird die Struktur solcher Hochtemperatursupraleiter-Bänder vorgestellt und wichtige physikalische Größen werden eingeführt: die kritische Temperatur, die kritische Stromdichte und das kritische magnetische Feld. Die Hochtemperatursupraleiter-Bänder bestehen aus mehreren verschiedenen, dünnen Schichten und die supraleitende Seltene-Erden-Barium-Kupfer-Oxid-Schicht selbst ist nur ein kleiner Teil des gesamten Bandes.

Die drei Größen Temperatur, Stromdichte und magnetisches Feld sind alle voneinander abhängig und wenn nur eine Größe davon ihren kritischen Wert überschreitet, kommt es zu einem Zusammenbruch der Supraleitung. Weiterhin weisen die Hochtemperatursupraleiter-Bänder eine sehr anisotrope Kristallstruktur auf, was zu sehr anisotropen physikalischen Eigenschaften führt. So weist beispielsweise der kritische Strom eine Anisotropie gegenüber dem Winkel des eindringenden Magnetfeldes auf. Daher ist es sehr wichtig, die Temperatur- und Winkelabhängigkeit der verwendeten Hochtemperatursupraleiter-Bänder zu kennen, um in der Lage zu sein, einen Stapel optimal auszulegen, welcher aus mehreren dieser Einzelbändern besteht.

Kapitel 3 bietet einen umfassenden und konsistenten Überblick über die verschiedenen Arten von resistiven Stromzuführungen: leitungsgekühlte, kontinuierliche gekühlte, mehrstufig gekühlte und gasgekühlte resistive Stromzuführungen werden behandelt. Die zugrundeliegenden Differential- und Integralgleichungen werden diskutiert. Darüber hinaus werden verschiedene, grundlegende Ansätze zur Bereitstellung der notwendigen Kühlleistung für solche resistiven Stromzuführungen vorgestellt und unterschiedliche Kältemaschinen für kryogene Temperaturen größer als 2 K werden diskutiert. Der Carnot-Prozess als idealer Referenzprozess für Kryokühler und der ideale Verflüssigungsprozess für Gase werden erläutert, da sie für das Verständnis der verschiedenen Ansätze zur Bereitstellung der Kälteleistung von grundlegender Bedeutung sind. Basierend auf den genannten idealen Referenzprozessen werden die verschiedenen Auslegungsansätze zur Realisierung von resistiven Stromzuführungen beschrieben und miteinander verglichen.

Kapitel 4 stellt einen neuen Optimierungsansatz für die Auslegung von resistiven Stromzuführungen vor. Die gesamte ideale elektrische Leistungsaufnahme der Stromzuführung wird betrachtet und minimiert. Letztere besteht aus der idealen elektrischen Leistungsaufnahme der verschiedenen Kältemaschinen und darüber hinaus aus den Ohmschen Verlusten, die im resistiven Strompfad selbst entstehen. Auf der Grundlage dieses neuen Optimierungsansatzes wird ein detaillierter Vergleich und eine Bewertung der verschiedenen Arten von resistiven Stromzuführung durchgeführt.

Schließlich wurde der am besten geeignete Ansatz für industrielle Anwendungen unter den verschiedenen, vorgestellten Arten von resistiven Stromzuführungen ausgewählt, um einen Prototypen zu entwerfen und zu bauen: eine mehrstufige gekühlte Stromzuführung mit zwei Zwischenkühlstufen und ausgelegt für einen Nennstrom von 20 kA. Der Auslegungs- und Herstellungsprozess dieser mehrstufig gekühlten Stromzuführung wird in Kapitel 5 ausführlich beschrieben. Die beiden Zwischenkühlstufen befinden sich auf Temperaturniveaus von $T = 240$ K und $T = 150$ K.

Ein vollständig geschlossenes Kühlsystem wurde eingesetzt, um einen autarken Betrieb der Stromzuführung in industriellen Anwendungen zu ermöglichen und eine kontinuierliche Versorgung mit flüssigem Stickstoff entbehrlich zu machen. Für die 240 K Kühlstufe wird die benötigte Kälteleistung von einer gewöhnlichen Kompressionskältemaschine bereitgestellt. Die 150 K Kühlstufe wird von einer Joule-Thomson-Kältemaschine versorgt, welche mit einem speziellen Kältemittelgemisch befüllt ist. Die letzte Kühlstufe definiert die Betriebstemperatur der Hochtemperatursupraleiter und verwendet ein flüssiges Stickstoffbad bei einer Temperatur von etwa 77 K. Der Wärmeeintrag in das flüssige Stickstoffbad verdampft flüssigen Stickstoff, welcher dann durch einen Kryokühler wieder kondensiert wird.

Der resistive Strompfad der Stromzuführung besteht aus Kupfer und ist am kalten Ende mit einem Stapel Hochtemperatursupraleiter-Bänder verbunden. Dieser Stapel besteht aus 96 Hochtemperatursupraleiter-Bändern und wurde auf Grundlage einer elektromagnetischen Analyse unter Berücksichtigung der anisotropen physikalischen Eigenschaften der Hochtemperatursupraleiter-Bändern ausgelegt und optimiert. Der Übergang vom resistiven Kupferpfad zu den Hochtemperatursupraleiter-Bändern wird durch eine neuartige, gelötete Kupferlamellen-Hochtemperatursupraleiter-Band-Verbindung realisiert. Ein neuer Lötprozess wurde hierfür entwickelt und angewendet, um die Kupferlamellen mit den Supraleiterbändern zu verbinden und die anfallenden Verluste auf ein Minimum zu beschränken. Diese Lötverbindung erzeugt bei einem Strom von 450 A Ohmsche Verluste von weniger als 25 mW.

Der Prototyp der mehrstufig gekühlten Stromzuführung wurde im Labor getestet und eine thermoelektrisch gekoppelte 3D-Finite-Elemente-Methode Analyse des Strompfades durchgeführt. In Kapitel 6 werden die experimentellen Ergebnisse analysiert und mit den numerischen Berechnungen verglichen. Drei verschiedene Fälle werden hierbei untersucht: Betrieb bei einem Strom von 20 kA (Nennstrombetrieb), bei einem Strom von 10 kA (Teillastbetrieb) und bei einem Strom von 0 kA (Leerlaufbetrieb).

Platin Pt100-Temperatursensoren sind entlang des resistiven Strompfades angeordnet, um den Temperaturverlauf entlang des Strompfades zu bestimmen. Darüber hinaus sind Potentialabgriffe entlang des Strompfades verteilt, um Spannungsabfälle entlang der resistiven Geometrie zu messen. Der übertragene elektrische Strom wird mit einem Strommesswiderstand bestimmt und in Kombination mit den gemessenen Spannungsabfällen werden die Ohmschen Verluste des Strompfades berechnet. Die gemessenen Temperaturprofile, Spannungsabfälle und Ohmschen Verluste des resistiven Strompfades zeigen eine gute Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen. Aus den numerischen Berechnungen werden die Wärmeeinträge an den verschiedenen Kühlstufen und damit die benötigten Kühlleistungen der drei verschiedenen Kältemaschinen abgeleitet. Darüber hinaus werden die tatsächlichen elektrischen Leistungen gemessen, die von den drei verschiedenen Kältemaschinen benötigt werden.

Die gesamte elektrische Leistungsaufnahme des Stromzuführungsprototypen besteht aus den für den Betrieb der drei Kältemaschinen erforderlichen elektrischen Leistungen und den Ohmschen Verlusten des resistiven Strompfades. Im Nennstrombetrieb von $I = 20 \text{ kA}$ beträgt die gesamte elektrische Leistungsaufnahme weniger als 19 kW . Die spezifische gesamte elektrische Leistungsaufnahme ist das Verhältnis der gesamten elektrischen Leistungsaufnahme und der entsprechenden Betriebsströme. Das Verhältnis beträgt $0.95 \frac{\text{kW}}{\text{kA}}$ im Nennstrombetrieb. Im Teillastbetrieb ($I = 10 \text{ kA}$) steigt die spezifische gesamte elektrische Leistungsaufnahme auf ca. $1.76 \frac{\text{kW}}{\text{kA}}$ an. Das bedeutet eine Steigerung von rund 85% .

Der Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass der gebaute Stromzuführungsprototyp und dessen resistive Geometrie einerseits lediglich für einen Nennbetriebsstrom von $I = 20 \text{ kA}$ ausgelegt und optimiert wurden. Weicht der übertragene elektrische Strom vom Nennstrom ab, erhöhen sich die spezifischen Wärmeeinträge an den Kühlstufen. In einer absolut optimierten Auslegung sollte die spezifische gesamte elektrische Leistungsaufnahme konstant bleiben und nicht ansteigen. Andererseits sind die verwendeten Kältemaschinen nicht regelbar und beziehen aus diesem Grund immer ungefähr die gleiche elektrische Leistung, selbst wenn der Kühlleistungsbedarf im Teillastbetrieb tatsächlich eigentlich geringer ist.

Für zukünftige Entwicklungen wäre es sehr vorteilhaft, regelbare Kältemaschinen einzusetzen, die es erlauben, die Kühlleistung je nach Lastfall anzupassen. Insbesondere die Kältemaschine der letzten Kühlstufe bei 77 K , der Kryokühler, sollte regelbar sein, da diese Maschine den höchsten Stromverbrauch aufweist. Darüber hinaus ist der Stromverbrauch der Zwischenkühlstufe bei 150 K im Vergleich zu den anderen Kühlstufen außergewöhnlich hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hier verwendete Gemischkältemittel-Joule-Thomson-Kältemaschine nur eine sehr geringe Leistungszahl hat. Diese ist sogar niedriger als die des Kryokühlers, obwohl letzterer seine Kühlleistung auf einem niedrigeren Temperaturniveau bereitstellt. Daher wäre es für zukünftige Entwicklungen auch wichtig, für diese Zwischenkühlstufe eine effizientere Kältemaschine einzusetzen.

Der gebaute Prototyp und seine Geometrie sind nur für einen bestimmten elektrischen Strom optimiert und ausgelegt, aber in einigen industriellen Anwendungen kann sich der Strom im Laufe der Zeit oft ändern und vom Nennstrom abweichen. Daher wäre es vorteilhaft, die Möglichkeit zu haben, die resistive Stromzuführung an die unterschiedlichen Lastbedingungen anzupassen. In Kapitel 8 wird ein innovativer, technischer Ansatz vorgestellt, um dies zu realisieren. Hierzu wird eine gestufte Anordnung von gestapelten Kupferlamellen untersucht, welche mit Hochtemperatursupraleiter-Bändern verbunden sind. In Kombination mit einer Variation des Füllstands des flüssigen Stickstoffs kann so sehr zuverlässig eine Anpassung der resistiven Geometrie der Stromzuführung vorgenommen werden. Durch die Geometrieanpassung kann eine Reduzierung der Verluste im Teillastbetrieb erreicht werden.

Contents

1	Challenges and motivation	1
1.1	Background and motivation	1
1.2	Structure and target of this thesis	2
2	Superconductors	3
2.1	Structure of ReBCO superconductor tapes	3
2.2	Critical values: temperature, current density, magnetic field	3
2.3	Overview of the current state of development of HTS tapes	5
3	State of the art of resistive current leads	9
3.1	Introduction and basic properties	9
3.1.1	Material properties	9
3.1.2	Cryogenic cooling	12
3.2	Overview of different types of resistive current leads	22
3.2.1	Problem definition	22
3.2.2	Conduction cooled current leads	22
3.2.3	Continuously cooled current leads	27
3.2.4	Multi-stage cooled current leads	31
3.2.5	Vapour cooled current leads	37
3.2.6	Comparison of different types of resistive current leads	43
3.3	State of the art of high current leads	45
4	New optimization approach to design resistive current leads	47
4.1	Overall electrical optimization	47
4.1.1	Continuously cooled current leads	49
4.1.2	Multi-stage cooled current leads	52
4.1.3	Vapour cooled current leads	56
4.2	Comparison of the different types of resistive current leads	58
5	Design and manufacturing of an efficient three-stage cooled current lead for 20 kA	61
5.1	Conceptual design	61
5.1.1	Starting point of the design process	61
5.1.2	Optimal geometry ratios of the resistive current path	61
5.1.3	Calculated heat leakages of the three different cooling stages	62
5.1.4	HTS stack configuration and uniform current distribution	64
5.2	Constructive design	67
5.2.1	Realised geometry of the resistive current path	67
5.2.2	Cryostat and thermal insulation	68
5.2.3	Refrigeration units	71
5.2.4	Joint between the resistive copper path and the HTS tapes	72
5.3	Manufacturing process	74
5.3.1	Resistive current path connected to the heat exchangers	74
5.3.2	Soldered joints between copper lamellas and HTS tapes	74
5.3.3	Thermal connection of the cryocooler	77

6	Test of the three-stage cooled current lead and experimental results	81
6.1	Thermal-electric coupled 3D FEM analysis of the resistive current path	81
6.1.1	Motivation for the 3D analysis	81
6.1.2	Simulation model of the resistive current path	81
6.1.3	Meshing of the FEM model and boundary conditions	82
6.1.4	Results of the 3D FEM analysis	83
6.2	Laboratory setup	86
6.2.1	Experimental setup	86
6.2.2	Measurement setup	87
6.3	Comparison and validation of numerical and experimental results	90
6.3.1	Temperature profile of the resistive current path	90
6.3.2	Electrical losses of the resistive current path	92
6.3.3	Cooling power of the different cooling stages	93
6.3.4	3D FEM analysis with Neumann boundary condition at the cold end of the current path	94
6.4	Overall electric power consumption	96
7	Summary and outlook	99
8	Ideas for further improvement of resistive current leads	103
8.1	Optimal design of resistive current leads under different load conditions	103
8.1.1	Resistive current leads in part load operation and conceptual design approach .	103
8.1.2	Stepped arrangement of stacked copper lamellas and HTS tapes in parallel to vary the geometry of the resistive current path	105
8.1.3	Thermal and electromagnetic simulation and numerical results	105
8.1.4	Variation of liquid nitrogen level	108
8.1.5	Possible reduction of the specific heat leakage to the cryogenic temperature level in part load operation	109
8.2	Concluding remark	111
9	References	113
10	Appendix	123
10.1	List of Symbols	123
10.2	List of Abbreviations	126
10.3	List of Figures	127
10.4	List of Tables	131
10.5	Mathematical derivations relating to section 3.2 and section 4.1	132
10.6	Additional figures experimental results	136