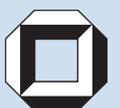
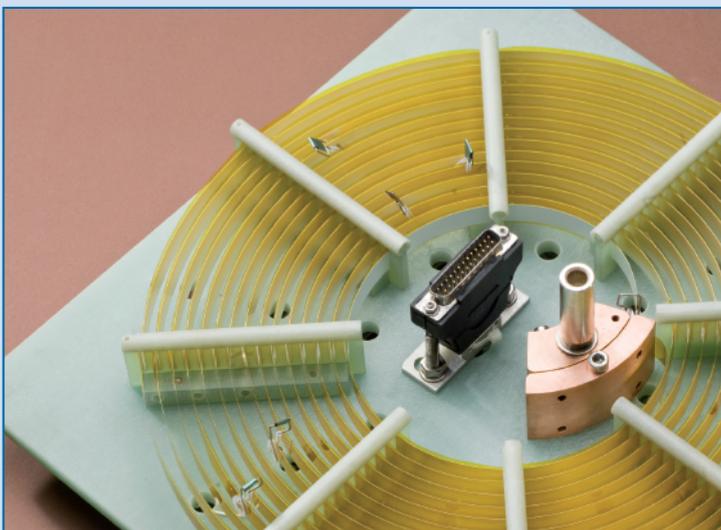




Christian Schacherer

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung supraleitender resistiver Strombegrenzer



Christian Schacherer

**Theoretische und experimentelle Untersuchungen
zur Entwicklung supraleitender resistiver Strombegrenzer**

Karlsruher Schriftenreihe zur Supraleitung
Band 001

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. M. Noe
Prof. Dr. rer. nat. M. Siegel

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung supraleitender resistiver Strombegrenzer

von
Christian Schacherer



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2009
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2009
Print on Demand

ISSN: XXXX-XXXX
ISBN: 978-3-86644-412-6

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung supraleitender resistiver Strombegrenzer

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Elektrotechnik und Informationstechnik

der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

M.Sc. Christian Schacherer

geb. in: Schramberg

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2009

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Technische Physik des Forschungszentrums Karlsruhe, dem ich für die fachliche und professionelle Unterstützung danke.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe, Institutsleiter des Instituts für Technische Physik, danke ich für die Übernahme des Referats. Des Weiteren bedanke ich mich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für die zum richtigen Zeitpunkt motivierende Unterstützung und die Möglichkeit zum selbständigen Arbeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried von der Universität Karlsruhe (TH), Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH), bin ich dankbar für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Herzlich danke ich den Mitgliedern der Gruppe “Supraleiter - Materialien und Energieanwendungen” und deren Leiter Herrn Dr. Wilfried Goldacker. Insbesondere habe ich Herrn Dr. Klaus Peter Weiß und Herrn Dr. Michael Schwarz zu danken, deren Bereitschaft zum fachlichen Diskurs und zur Klärung allgemeiner Fragestellungen viel zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beitrug. Auch die anregenden Diskussionen mit den Doktoranden Herrn André Berger, Herrn Olaf Mäder und Herrn Alexander Winkler waren für mich stets eine große Hilfe und Motivation.

Wichtige Unterstützung und verlässliche Hilfe durfte ich bei dem experimentellen Teil meiner Arbeit erfahren - Andrej Kudymow war ein, als der für die Messeinrichtung verantwortliche Laboringenieur, stets verlässlicher und freundschaftlicher Helfer. Wichtige Personen für die Umsetzung meiner Ideen waren Johann Wilms als Verantwortlicher in allen elektrischen Belangen, Antje Drechsler und Uwe Braun für die mechanischen Komponenten. Auch auf die Administration des Instituts für Technische Physik (ITP) konnte ich mich immer verlassen und wurde fleißig in allen organisatorischen Aufgaben unterstützt. Dem gesamten Team des ITP gilt mein herzlicher Dank.

Ebenso herzlich danke ich Herrn Prof. Dr. Steffen Elschner von der Hochschule Mannheim für seine hilfreichen Anregungen und die inspirierenden Gespräche sowie Herrn Dr.-Ing. Michael “Mischa” Steurer für die erfolgreiche Unterstützung meines Forschungsaufenthalts am CAPS in Tallahassee/Florida USA.

Schließlich danke ich allen Menschen in meinem persönlichen Umfeld die mir duldsam ihr Ohr liehen, mit großem Interesse am Fortgang dieser Arbeit Anteil nahmen und mir in dieser Zeit behilflich waren. Besonderer Dank gilt hierfür meiner Familie.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Hochtemperatursupraleiter für technische Anwendungen	7
2.1	Kritische Größen	10
2.2	YBCO-Bandleiter	12
2.2.1	Substratband	13
2.2.2	Pufferschicht und supraleitende Schicht	14
2.2.3	Deckschicht und zusätzliche Stabilisierung	19
2.3	Zusammenfassung	19
3	Charakterisierung von YBCO-Bandleitern	23
3.1	Messeinrichtungen und Messmethoden	24
3.1.1	Charakteristische supraleitende Größen	25
3.1.2	Allgemeine charakteristische Größen	28
3.2	Ergebnisse und Diskussion	30
3.2.1	Kritischer Strom und n-Wert	30
3.2.2	Bandleiterhomogenität	31
3.2.3	Allgemeine physikalische Größen	33
3.3	Zusammenfassung	37
4	Begrenzungsverhalten von YBCO-Bandleitern	39
4.1	Grundlagen	39
4.1.1	Strombegrenzung	42
4.1.2	Fehlstellen	43
4.1.3	Bandleiterhomogenität	45
4.2	Experimentelle Untersuchungen	49
4.2.1	Messeinrichtungen und Probenhalterungen	49
4.2.2	Stabilisierung und Bandleiterhomogenität	51
4.2.3	Belastungsgrenzen supraleitender Bandleiter	58
4.2.4	Skalierung und Parallelschaltung	62
4.2.5	Einfluss des Kühlmediums	64
4.3	Optimierung des Begrenzungsverhaltens	66

4.3.1	Einfluss der Deckschichtdicke	69
4.3.2	Einfluss eines Parallelwiderstandes und zusätzlicher Schichten	70
4.4	Zusammenfassung	72
5	Strombegrenzendes Modul	75
5.1	Entwurf eines strombegrenzenden Moduls	76
5.1.1	Vorgaben und Entwurfsgleichungen	77
5.1.2	Entwurfsgang	82
5.1.3	Zusammenfassung	88
5.2	Test von strombegrenzenden Modulen unter Laborbedingungen	88
5.2.1	Monofilare Spiralwicklung	89
5.2.2	Bifilare Spiralwicklung	93
5.3	Test eines strombegrenzenden Moduls mit Power-Hardware-in-the-Loop	95
5.3.1	Testeinrichtung und Prüfling	97
5.3.2	Simulation des Energieversorgungsnetzes	98
5.3.3	Testablauf	99
5.3.4	Ergebnisse	102
6	Konzeptioneller Entwurf eines supraleitenden resistiven Strombegren-	
	zers	107
6.1	Strombegrenzende Module und Stromzuführungen	108
6.2	Kryostat und Kälteanlage	112
6.3	Verluste	115
6.3.1	Strombegrenzende Module und Stromzuführungen	115
6.3.2	Kryostat	117
6.4	Investitionskosten	117
7	Zusammenfassung	121
A	Physikalische Material- und Stoffeigenschaften	125
A.1	Hastelloy C276	125
A.2	Nickel-Wolfram NiW(5%at)	126
A.3	Silber	126
A.4	Kupfer	127
A.5	Stickstoff	127
B	Symbolliste und Indizes	129
C	Literaturverzeichnis	135

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Anforderungen an elektrische Energieversorgungsnetze haben sich in den vergangenen Jahren stark geändert. Unter anderem sind die Ansprüche an die Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Energieversorgungsnetze aufgrund der jüngsten politischen Entscheidungen zur Deregulierung und Vermeidung von Treibhausgasen stark gestiegen. Der Ausbau dezentral eingespeister Energie aus regenerativen Energiequellen und Blockheizkraftwerken in die Versorgungs- und Transportnetze verändert den Energiefluss und kann zu einem Anstieg der Kurzschlussleistung in bestehenden Energieversorgungsnetzen führen. Ein steigender Energiebedarf in urbanen Zentren führt zudem zu einer steigenden Energiedichte in den Energienetzen, was eine bessere Vermaschung der Netze erfordert mit der Folge einer sinkenden Netzzinnenimpedanz und damit weiter steigender Kurzschlussleistung.

Um die Verluste beim Energietransport und den daraus resultierenden Spannungsfall zu minimieren, ist in einem elektrischen Versorgungsnetz die Netzzinnenimpedanz grundsätzlich möglichst gering im Vergleich zu den angeschlossenen Verbrauchern. In aktuellen Energieversorgungsnetzen in Mitteleuropa, kann der aus der geringen Netzzinnenimpedanz resultierende Kurzschlussstrom den Nennstrom um das 10...20-fache übersteigen [RDB74]. Alle Betriebsmittel in einem Energieversorgungsnetz müssen für die auftretenden Kurzschlussströme und die damit verbundenen magnetischen und thermischen Belastungen ausgelegt sein. Gegenwärtig sind die Betriebsmittel in den Energieversorgungsnetzen nicht auf eine deutlich steigende Kurzschlussleistung und den damit verbundenen erhöhten Anforderungen an mechanische und thermische Festigkeit ausgelegt. Mit fortschreitender Dezentralisierung der Energieeinspeisung und engerer Vermaschung der Energieversorgungsnetze wird die Notwendigkeit der Kurzschlussstrombegrenzung zukünftig weiter ansteigen [SAB05]. So zählt zu den Herausforderungen moderner Energieversorgungsnetze die Beherrschung der steigenden Kurzschlussströme unter ökonomischen und technologischen Aspekten.

Anstelle eines Neubaus von Anlagen oder dem Austausch von Betriebsmitteln ist es häufig günstiger Maßnahmen zur Begrenzung von Kurzschlussströmen anzuwenden [Sch03a]. Alle bisher angewandten Maßnahmen zur Begrenzung von Kurzschlussströmen bewirken entweder eine Erhöhung der Netzzinnenimpedanz im Nennbetrieb (Trafo, Drosselspule) oder müssen nach dem Begrenzen des Kurzschlussstroms ersetzt werden (I_s -Begrenzer). Zur Begrenzung von Kurzschlussströmen in Energieversorgungsnetzen wird zwischen netztechnischen, anlagentechnischen und gerätetechnischen Maßnahmen unterschieden [FH00, OO04, HDS07].

Netztechnische Maßnahmen

Netztechnische Maßnahmen verringern die Kurzschlussleistung an der Kurzschlussstelle, ohne den Strom zu unterbrechen und wirken sich somit unterstützend für die gerätetechnischen Maßnahmen aus. Typische netztechnische Maßnahmen zur Kurzschlussstrombegrenzung sind:

- Aufteilung in Subnetze mit Überlagerung einer Spannungsebene
- Anhebung der Spannungsebene bei gleicher Leistung
- Einführung von Netzkuppelstellen mit Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Die Überlagerung einer höheren Spannungsebene ist eine Maßnahme zur Senkung der Kurzschlussleistung mit einem hohen Planungs- und Zeitbedarf. Die Reduzierung der Kurzschlussleistung in einem Energieversorgungsnetz durch das Aufspalten in zwei, über Transformatoren gekoppelte, Teilnetze verursacht einen hohen Investitionsaufwand für Transformatoren durch die n-1 Redundanzbedingung in Energieversorgungsnetzen.

Anlagen- und gerätetechnische Maßnahmen

Gerätetechnische Maßnahmen zielen auf eine direkte Begrenzung des Kurzschlussstromes ab. Bislang gebräuchliche anlagen- und gerätetechnische Maßnahmen zur Kurzschlussstrombegrenzung sind [FH00, Sch03a, OO04, HDS07]:

- Trennen von Sammelschienen
- Erhöhung der relativen Kurzschlussspannung von Transformatoren
- I_s -Begrenzer
- Drosselspulen
- HH-Sicherungen

Im Gegensatz zu netztechnischen Maßnahmen lassen sich anlagen- und gerätetechnische Maßnahmen leichter zur Kurzschlussstrombegrenzung in bereits bestehenden Netzstrukturen umsetzen. Für eine wirksame Begrenzung des Kurzschlussstroms in Energieversorgungsnetzen ist eine Abstimmung zwischen anlagen- und gerätetechnischen Maßnahmen erforderlich. Zudem werden häufig verschiedene Maßnahmen zur Kurzschlussstrombegrenzung in Kombination umgesetzt. So wird ein I_s -Begrenzer zur Überbrückung einer Drosselspule eingesetzt, um den Spannungsfall über der Drosselspule im Normalbetrieb zu minimieren oder zur Sammelschienen-Schnellentkopplung. Nachteilig am Einsatz bisher angewandter Maßnahmen zur Kurzschlussstrombegrenzung sind die hohen Verluste im Nennbetrieb, die negativen Auswirkungen auf die Spannungshaltung oder der notwendige Ersatz nach dem Begrenzen eines Kurzschlussstroms [HDS07].

Strombegrenzer mit supraleitenden Elementen sind neuartige Betriebsmittel zur Kurzschlussstrombegrenzung. Die einzigartige Eigenschaft im Nennbetrieb den Strom bis auf geringe Wechselstromverluste verlustfrei zu transportieren, in Verbindung mit der stark nichtlinearen Änderung des Widerstandes beim Überschreiten eines definierten Stromwertes, machen Supraleiter zu einem idealen Material für strombegrenzende Betriebsmittel. Die Idee, strombegrenzende Betriebsmittel mit supraleitenden Elementen zu entwickeln, kam bereits vor der Entdeckung der Hochtemperatursupraleitung (HTS) auf, doch erst mit Hochtemperatursupraleitern wurde der Bedarf an Kühlleistung für Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung vertretbar. Allgemeine wesentliche Vorteile beim Einsatz eines supraleitenden Strombegrenzers sind unter anderem [Noe98, NO99]:

- Vorhandene Einrichtungen (Leistungsschalter, Stromschienen etc.) können bei einer höheren Kurzschlussleistung betrieben werden
- Schnelles Ansprechen der Kurzschlussstrombegrenzung bereits im ersten Anstieg des Kurzschlussstroms
- Effiziente und verbesserte Energieübertragung durch die Verringerung der relativen Kurzschlussspannung und/oder dem Verzicht auf Drosselspulen
- Durch kompakte Bauweise günstig für das Nach- und Aufrüsten von Umspannstationen mit Platzbeschränkungen

Anwendung finden supraleitende Strombegrenzer bei anlagen- und gerätetechnischen Maßnahmen. Abb. 1.1 zeigt einige Anwendungsbeispiele in der 10 kV Spannungsebene für supraleitende Strombegrenzer.

Wichtige Konzepte sind der resistive Strombegrenzer und die meist induktiv wirkenden Konzepte des gleichstromvormagnetisierten Eisenkerns und des abgeschirmten Eisenkerns [NS07, SAB05, HHJ04]. Nachteilig an den Konzepten mit einer induktiven Wirkung sind der meist hohe Materialeinsatz, die damit verbundene große Baugröße und die vergleichsweise hohen Herstellungskosten. Zudem beeinflussen induktiv wirkende Strombegrenzer auch im Normalbetrieb die Spannungshaltung negativ. Während der Kurzschlussstrombegrenzung kann sich die hohe Induktivität zudem nachteilig auf die Stabilität des Energieversorgungsnetzes auswirken.

Das Konzept eines supraleitenden resistiven Strombegrenzers fußt auf dem einfachen Prinzip eines Widerstandes im Kurzschlusspfad. Das Wirkprinzip ist der schnelle Aufbau eines Widerstandes nach dem Auftreten eines Kurzschlussstromes. Beim Überschreiten des kritischen Stromes geht der Supraleiter in den normalleitenden Zustand über und begrenzt den Kurzschlussstrom durch seinen normalleitenden Widerstand. Je nach Auslegung können supraleitende resistive Strombegrenzer als ein quasi schaltendes Element mit einem sehr hohen Widerstand und als begrenzendes Element mit einem moderaten Widerstand konstruiert werden.

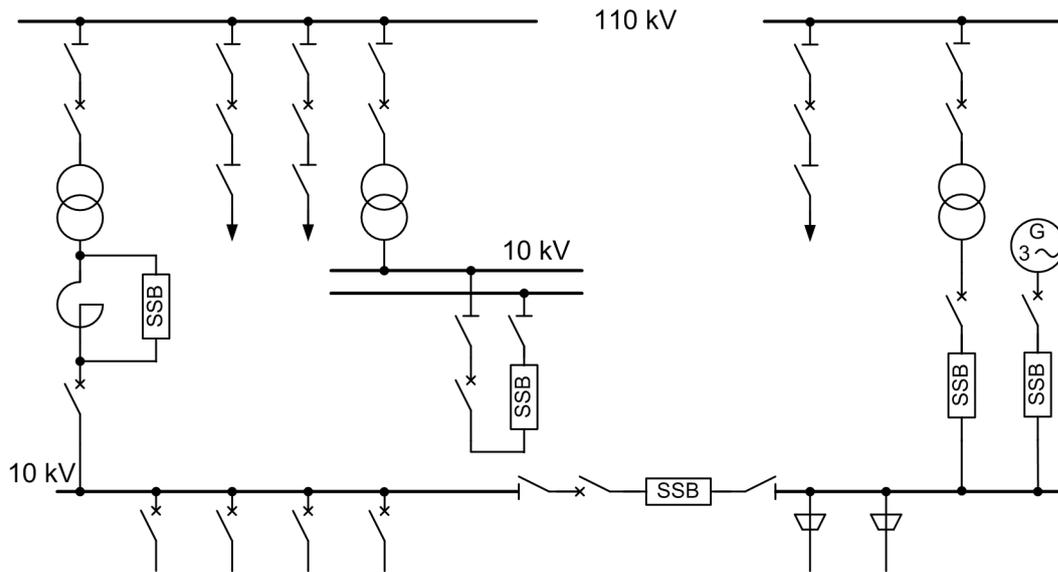


Abb. 1.1: Auswahl an Anwendungsbeispielen für supraleitende Strombegrenzer (SSB) in der Mittelspannungsebene [Noe98].

Resistive supraleitende Strombegrenzer besitzen im Normalbetrieb eine vernachlässigbar geringe Impedanz. Bei Nennstrom im supraleitenden Zustand ist praktisch kein Widerstand im Stromkreis wirksam. Während der Kurzschlussstrombegrenzung mit resistiven Strombegrenzern werden hohe Anforderungen an den Supraleiter gestellt. Einerseits muss der Supraleiter unter Normalbedingungen Wechselstrom mit möglichst geringen Verlusten transportieren. Andererseits ist der Bandleiter während der Kurzschlussstrombegrenzung einem starken thermischen und mechanischen Stress ausgesetzt, dem der Supraleiter zuverlässig widerstehen muss.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, aktuell verfügbare Hochtemperatursupraleiter aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ für die Verwendung in supraleitenden Strombegrenzern systematisch zu untersuchen und sowohl einen Überblick als auch einen Ausblick für die Leistungsfähigkeit der Hochtemperatursupraleiter zu geben.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen für das allgemeine Verständnis des Begrenzungsverhaltens von Hochtemperatursupraleitern mit $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ als Dünnschicht-Bandleiter erarbeitet. In Kapitel 3 wird die experimentelle Charakterisierung von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Dünnschicht-Bandleitern vorgestellt. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Kapitel 4 umfasst neben den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen des Begrenzungsverhaltens an Kurz- und 1-m-Proben die Modellierung der Dünnschicht-Bandleiter zur Optimierung des Begrenzungsverhaltens. Ausserdem wird die besondere Bedeutung der Bandleiterhomogenität auf das Begrenzungsverhalten in einer theoretischen Ausarbeitung diskutiert. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der vorherigen Kapitel zur Entwicklung eines Entwurfsgangs sowie zur Konstruktion und Test von supraleitenden, strombegrenzenden Modulen umgesetzt. Neben der Untersuchung des Begrenzungsverhaltens verschiedener supraleitender,

strombegrenzender Module wird ein neuartiges Testverfahren vorgestellt. Zum Abschluss wird in Kapitel 6 ein konzeptioneller Entwurf eines supraleitenden Strombegrenzer-Prototyps für die Mittelspannungsebene durchgeführt und Abschätzungen zu den Investitionskosten und den Hauptabmessungen getroffen.

2 Hochtemperatursupraleiter für technische Anwendungen

Die Supraleitung als physikalisches Phänomen ist seit beinahe 100 Jahren bekannt und zeichnet sich allgemein durch einen nicht messbaren elektrischen Gleichstromwiderstand und ein ideal diamagnetisches Verhalten aus [BK04]. Der supraleitende Zustand lässt sich unter normalen Bedingungen erst bei tiefen (kryogenen) Temperaturen erreichen. Die Temperatur, bei der ein Material vom normalleitenden in den supraleitenden bzw. vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand übergeht (S-N-Übergang), wird als kritische Temperatur T_c bezeichnet. Zahlreiche supraleitende Materialien sind bekannt. Unter normalem Umgebungsdruck besitzt die Verbindung $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ die höchste bekannte kritische Temperatur von 135 K [BK04]. In Abb. 2.1 sind kritische Temperaturen supraleitender Elemente und Verbindungen in Abhängigkeit des Jahres ihrer Entdeckung aufgetragen.

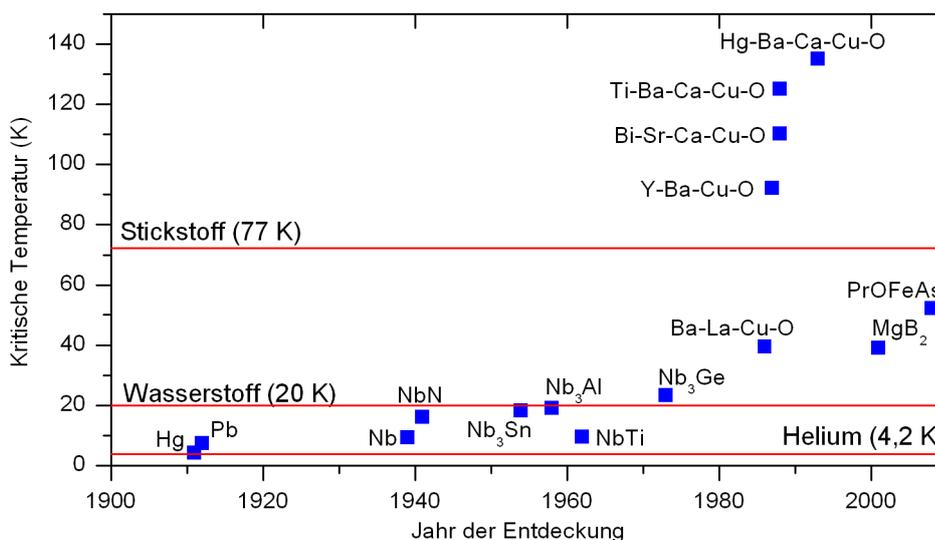


Abb. 2.1: Zeitliche Entwicklung der entdeckten supraleitenden Verbindungen mit Angabe der kritischen Temperatur T_c [BM86, BK04]

Supraleitende Materialien werden nach ihren kritischen Temperaturen in Tieftemperatursupraleiter (Low Temperature Superconductor - LTS) und Hochtemperatursupraleiter (HTS) eingeteilt. Zu den LTS gehören alle Materialien, deren kritische Temperatur typischerweise unter 23 K bei Normalbedingungen liegt und einige Elemente des Periodensystems mit einem T_c von einigen Millikelvin [Kom95]. Die im Jahr 2001 entdeckte Verbindung MgB_2 mit einer kritischen Temperatur von 39 K [BK04] zählt ebenfalls zu den LTS. Derzeit finden LTS vor allem Anwendung in Geräten für die Medizintechnik und in supraleitenden Magneten für die

Forschung. Der geringe Wirkungsgrad der Kältemaschinen für tiefe Temperaturen erschwert kommerzielle energietechnische Anwendungen mit LTS.

Mit der Entdeckung von Hochtemperatursupraleitern (HTS) mit typischen kritischen Temperaturen oberhalb der Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff bei 77,35 K (-195,8 °C) wurde die Technologie der Supraleitung für energietechnische Anwendungen interessant [HHJ04]. Die Hauptvertreter der HTS sind Kupfer-Oxidverbindungen sog. Kuprate. Die erste bekannte stabile Verbindung mit einer kritischen Temperatur über 77 K war $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ oder kurz YBCO [WAT87] und ist bis heute neben $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ bzw. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (BSCCO) der bedeutendste Vertreter der HTS für technische Anwendungen. Supraleiter mit BSCCO als supraleitendes Material werden mit der PIT-Technik (Powder in Tube) aus mehreren, gesinterten supraleitenden Filamenten in einer Silbermatrix zu einem Rundleiter gezogen und zu einem Bandleiter flachgepresst. In der Ausführung als BSCCO-Massivmaterial wird der Supraleiter in einem Schlegelgussverfahren zu Rohren mit Wandstärken von einigen Millimetern hergestellt. Rohre aus BSCCO-Massivmaterial lassen sich durch spanende Verfahren zu Spulen bearbeiten. Supraleiter mit YBCO als supraleitendes Material sind ein Komposit aus mehreren dünnen Schichten unterschiedlicher Materialien und werden direkt als Bandleiter hergestellt. In Abb. 2.2 ist der schichtweise Aufbau von YBCO-Bandleitern und eines strombegrenzenden Elements aus BSCCO-Massivmaterial schematisch dargestellt.

Die kritische Temperatur von Kupraten ist generell von der Stöchiometrie in der Verbindung bzw. der Sauerstoffbeladung abhängig. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ erreicht die höchste kritische Temperatur von ca. 92 K in einer leicht nichtstöchiometrischen Zusammensetzung mit $x = 0,08$ [BK04, Wei04, Sch03b, Kom95]. Zudem kann das Yttrium im Kuprat durch ein Element der Seltene Erden ersetzt werden, wobei der Ionenradius des Substituenten die kritische Temperatur der Verbindung beeinflusst [WT96]. In der kommerziellen Supraleiterproduktion wird neben Yttrium die Seltene Erde Dysprosium verwendet. Durch die ähnlichen Ionenradien von Dysprosium und Yttrium verändert sich die kritische Temperatur des Kuprats praktisch nicht. Zur Vereinfachung werden im Weiteren alle Bandleiter als YBCO-Bandleiter bezeichnet, unabhängig davon, ob Yttrium oder Dysprosium verwendet wurde.

YBCO-Bandleiter entwickeln sich in jüngster Zeit zu sehr attraktiven Supraleitern für energietechnische Anwendungen [CDLP04]. Die physikalischen Vorzüge von Supraleitern mit YBCO gegenüber Supraleitern mit BSCCO liegen in der vergleichsweise hohen Magnetfeldverträglichkeit des kritischen Stromes und der hohen kritischen Stromdichte [LGFP01, BK04]. Der ökonomische Vorteil von YBCO-Bandleitern, vor allem im Vergleich zu BSCCO-Bandleitern, liegt in dem geringen Materialkostenanteil durch den geringen Bedarf an Silber.

Für die Verwendung in Strombegrenzern wurde BSCCO als Massivmaterial ausgeführt und erfolgreich getestet [EBN03, NJW02, EBW01]. Die bereits erwähnte Ausführung von BSCCO als Bandleiter aus einem flachgepressten Rundleiter mit Silbermatrix ist für supraleitende Strom-

begrenzer aus ökonomischen Gründen kaum geeignet. Durch den geringen Widerstandsbelag der Silbermatrix werden für eine ausreichende Begrenzung verhältnismäßig große Leiterlängen notwendig. Die prinzipielle technische Umsetzbarkeit eines resistiven Strombegrenzers mit BSCCO-Bandleitern wurde dennoch an kleineren Prototypen demonstriert [HHJ04].

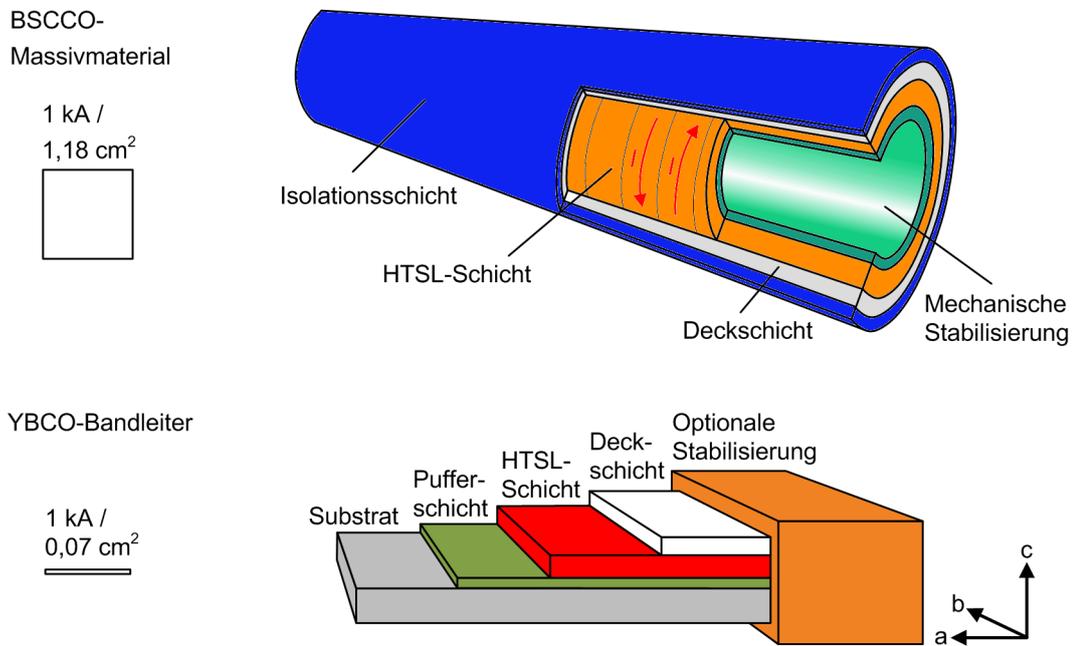


Abb. 2.2: Schematischer Schichtaufbau eines YBCO-Bandleiters und eines strombegrenzenden Elements aus BSCCO-Massivmaterial – Die Schichtdicken sind nicht maßstabsgerecht dargestellt. Die Pufferschichten des YBCO-Bandleiters sind entsprechend ihrer Funktion zu einer Schicht zusammengefasst. Auf der linken Seite sind maßstabsgerecht die notwendigen Querschnitte eines BSCCO-Massivmaterials und eines YBCO-Bandleiters für jeweils $1 \text{ kA}_{\text{rms}}$ Transportstrom dargestellt.

Für energietechnische Anwendungen von Supraleitern sind eine Reihe von Eigenschaften zu berücksichtigen. Neben den charakteristischen physikalischen Eigenschaften eines Supraleiters, die das Begrenzungsverhalten direkt beeinflussen (siehe Kapitel 3), spielen auch allgemeine technisch-ökonomische Eigenschaften eine Rolle. Dazu zählen:

- Materialeinsatz (Bandleiterlänge und Masse)
- Wechselstromverluste
- Handhabung bei der Verarbeitung
- Herstellungskosten

In Tab. 2.1 sind ausgewählte Eigenschaften von YBCO-Bandleitern und BSCCO, ausgeführt als Massivmaterial und als Bandleiter, die für die Verwendung in resistiven Strombegrenzern von besonderer Bedeutung sind, für das Jahr 2008 gültigen quantitativen Werten angegeben.

	YBCO-Bandleiter	BSCCO-Bandleiter	BSCCO-Massivmaterial
Kritische Stromdichte j_c	10...30 kA/cm ²	7...15 kA/cm ² ^d	0,8...1,3 kA/cm ² ^{e,f}
Kritische Temperatur T_c	92 K	108 K (BSCCO 2223)	94 K (BSCCO 2212)
Mechanische Festigkeit	< 690 MPa ^c (Dehngrenze)	85...150 MPa ^g	36 MPa ^e (Bruchgrenze)
Herstellungskosten	ca. 250 €/kA m)	ca. 150 €/kA m)	<1000 €/kA m) ^e
Verfügbare Längen	< 1000 m ^a	ca. 1000 m ^b	< 10 m
Stand der Entwicklung	Weitere Entwicklung zu erwarten	Fortgeschrittene Entwicklung	Fortgeschrittene Entwicklung

^a[SX08], ^b[Sch09a], ^c[CEC06], ^d[GSR], ^e[Els09], ^f[NJ04], ^g[Kel08]

Tab. 2.1: Gegenüberstellung der Parameterbereiche von YBCO und BSCCO (Stand 2008) – Alle Werte beziehen sich auf 77 K. Die Werte mit Angabe einer Quelle wurden gerundet.

2.1 Kritische Größen

Neben der kritischen Temperatur T_c besitzen supraleitende Materialien weitere, intrinsische kritische Größen für den S-N-Übergang: die obere kritische magnetische Flussdichte (Induktion) B_{c2} und den kritischen Strom I_c . Um supraleitende Materialien in den unterschiedlichen Supraleitern miteinander vergleichen zu können, wird der kritische Strom auf die Querschnittsfläche der supraleitenden Schicht bezogen und als kritische Stromdichte j_c ausgedrückt. Für technische Anwendungen wird meist die technische Stromdichte j_e , von engl. engineering, angegeben. Die technische Stromdichte berücksichtigt die Querschnittsfläche des gesamten Supraleiters und nicht nur die Querschnittsfläche der supraleitenden Schicht.

In Abb. 2.3 sind die prinzipiellen Abhängigkeiten der drei kritischen Größen untereinander in einem Diagramm aufgetragen. Beim Überschreiten der in Abb. 2.3 dargestellten Fläche geht der Supraleiter vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand über. Mögliche Arbeitspunkte des Supraleiters werden somit von allen drei kritischen Größen bestimmt, wobei sich die kritischen Größen gegenseitig beeinflussen. Die kritische Stromdichte j_c ist eine Funktion der magnetischen Flussdichte und die kritische magnetische Flussdichte B_{c2} ist eine Funktion der Temperatur [BK04, Kom95]. Die so entstehende Grenzfläche zwischen Normalleitung und Supraleitung verläuft nicht für alle supraleitenden Materialien, wie in Abb. 2.3 gezeigt, zwingend monoton. Fließt ein Strom durch den Supraleiter, erzeugt er ein Eigenmagnetfeld, dessen Wirkung auf das supraleitende Material die gleiche ist wie die eines äußeren Magnetfeldes [Sil16].

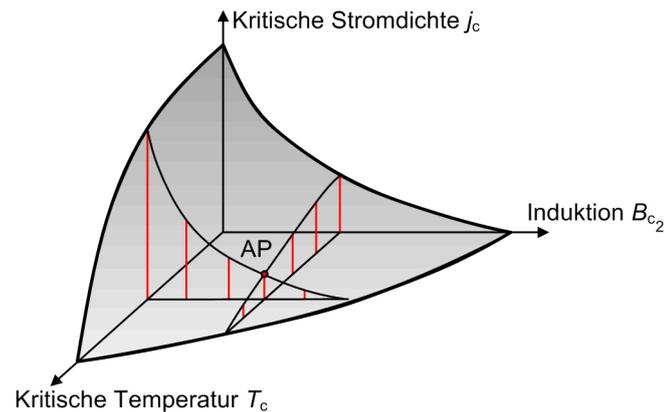


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der gegenseitigen Abhängigkeiten der kritischen Größen nach [Kom95] – Alle supraleitenden Arbeitspunkte liegen unterhalb der entstehenden Grenzfläche der kritischen Größen.

Durch die strukturbestimmte Anisotropie der supraleitenden Schicht ist nicht nur der Betrag des magnetischen Feldes, sondern auch die Richtung der Feldlinien für die Magnetfeldtoleranz der supraleitenden Schicht maßgeblich. Feldkomponenten normal zur a-b-Ebene beeinträchtigen die Stromtragfähigkeit der supraleitenden Schicht stärker als Feldkomponenten parallel zur a-b-Ebene. Der kritische Strom wird somit von der Temperatur des Supraleiters und dem Vektor der resultierenden magnetischen Flussdichte (Summe aus äußerem Magnetfeld und Eigenmagnetfeld) bestimmt.

Für die energietechnische Anwendung von Supraleitern als resistiver Strombegrenzer wird der stromabhängige S-N-Übergang des Supraleiters ausgenutzt. Beim Überschreiten des kritischen Stromes beginnt der Supraleiter einen Widerstand aufzubauen und den Strom wirksam zu begrenzen [EBW01]. Der S-N-Übergang findet bei technischen Supraleitern nicht sprunghaft statt. Empirisch bestätigt ist ein nichtlinearer Übergang des Supraleiters in die Normalleitung. Eine anerkannte mathematische Beschreibung des nichtlinearen Überganges in die Normalleitung ist ein exponentieller Anstieg des elektrischen Feldes E (E-Feld) entlang des Supraleiters in Abhängigkeit eines Gleichstroms I durch den Supraleiter nach Gl. 2.1 [Wal74, CE77, Bru04].

$$E = E_c \cdot \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad [2.1]$$

Bei dieser mathematischen Beschreibung handelt es sich nicht um eine physikalische Gesetzmäßigkeit zur Beschreibung des vollständigen S-N-Übergangs des Supraleiters. Der Zusammenhang aus Gl. 2.1 ist nur gültig für Stromwerte I um den kritischen Strom I_c . Im Bereich des kritischen Stromes I_c liegt bei YBCO-Bandleitern ein typischer Wert für den Exponent n (n-Wert) zwischen 30 und 50. Der kritische Strom eines Supraleiters ist definiert durch das Erreichen der kritischen E-Feldstärke E_c entlang des Supraleiters. Die kritische E-Feldstärke ist nicht für alle supraleitenden Materialien durch eine Norm festgelegt [CE77, Bru04] und sollte daher immer mit dem kritischen Strom I_c angegeben werden. Für BSCCO ist eine kritische E-

Feldstärke E_c von $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ durch eine Norm vorgegeben [Ne00]. Dieses $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -Kriterium hat sich allgemein für die Charakterisierung von Supraleitern für energietechnische Anwendungen durchgesetzt [CE77].

Zusätzlich zu den intrinsischen kritischen Größen T_c und B_{c2} beeinflusst eine extrinsische mechanische Belastung der supraleitenden Schicht den kritischen Strom I_c . In Abb. 2.4 ist die prinzipielle Abhängigkeit des kritischen Stromes I_c von der Dehnung eines YBCO-Bandleiters zu sehen. In Abhängigkeit des E-Moduls der verwendeten Strukturmaterialien ändert sich bis zu einer bestimmten Druck- oder Zugspannung σ der kritische Strom I_c reversibel durch eine geringe Dehnung ε der supraleitenden Schicht. Ab einer kritischen Dehnung ε_{irr} verringert sich I_c irreversibel. Als Ursache für die irreversible Verringerung von I_c kann ein Brechen der supraleitenden Schicht aufgrund übermäßiger Dehnung angenommen werden. Dafür spricht auch, dass die supraleitende Schicht auf Kompression eine geringere Empfindlichkeit zeigt als auf eine Zugbelastung. Selbst unter einer Kompression von mehr als 1 % bleibt die Verminderung von I_c bei YBCO-Bandleitern noch reversibel [SOP05, LE07].

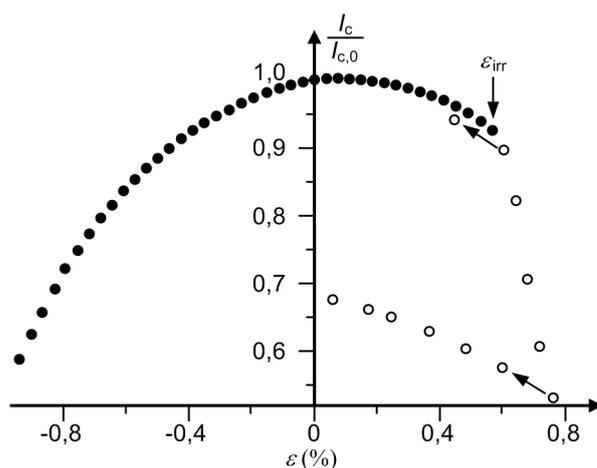


Abb. 2.4: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines supraleitenden Bandleiters nach [LE07] – Bei geringer Dehnung des Bandleiters steigt I_c zunächst auf ein Maximum und nimmt bei weiterer Dehnung wieder ab. Nach Überschreiten der Irreversibilitätsdehnungsgrenze ε_{irr} bleibt I_c auch nach einer Entlastung dauerhaft verringert (leere Symbole).

2.2 YBCO-Bandleiter

Wie bereits erwähnt, werden Supraleiter mit YBCO als supraleitendes Material für energietechnische Anwendungen als mehrschichtiges Komposit in einem Bandleiter ausgeführt. Im englischsprachigen Raum werden diese Bandleiter als coated conductor oder second generation wire (2G-wire) bezeichnet. Auf einem flexiblen metallischen Substratband werden Pufferschichten und die supraleitende Schicht aufgebracht. Eine Deckschicht, um die Supraleiterschicht zu schützen und elektrisch zu stabilisieren, schließt den Schichtaufbau des Bandleiters

ab. Je nach Herstellungsverfahren und späterer Anwendung wird eine zusätzliche ein- oder beidseitige Stabilisierung auf den Bandleiter aufgebracht. Durch die geringe Stärke der aufgetragenen Schichten bleibt der Bandleiter flexibel und kann zu Spulen verarbeitet werden. Der schichtweise Aufbau eines YBCO-Bandleiters ist in Abb. 2.2 schematisch dargestellt.

Für die Herstellung eines YBCO-Bandleiters existiert eine Reihe von Herstellungsverfahren. Jedes Herstellungsverfahren stellt verschiedene Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe der einzelnen Schichten und bestimmt so die späteren Eigenschaften des Bandleiters in der Anwendung. In diesem Kapitel werden alle Schichten eines YBCO-Bandleiters und die verschiedenen Herstellungsverfahren vorgestellt und deren Bedeutung für die Anwendung des Bandleiters erörtert.

2.2.1 Substratband

An das Substratband werden eine Reihe von unterschiedlichen Anforderungen während der Herstellung und in der späteren Anwendung gestellt. Für energietechnische Anwendungen sind unterschiedliche physikalische Eigenschaften des Substratbandes von Bedeutung. Um die Wechselstromverluste im Bandleiter gering zu halten, sollte das Substratband aus einem hochohmigen, nicht magnetischen Werkstoff bestehen. Da die aufgetragenen Pufferschichten und die supraleitende Schicht auf Zugspannung bzw. Dehnung empfindlich reagieren (siehe Kapitel 2.3), muss die thermische Ausdehnung des Substratbandes mit denen der übrigen Schichten möglichst übereinstimmen, um mechanische Spannungen in der Supraleiterschicht nach dem Abkühlen zu minimieren. Zudem muss das Substratband für eine ausreichende mechanische Stabilität sorgen und sowohl die auftretenden Kräfte bei 77 K in der Anwendung als auch bei den hohen Temperaturen von bis zu 1000 K während der Herstellung aufnehmen, ohne die Irreversibilitätsdehngrenze ϵ_{irr} der supraleitenden Schicht oder gar die maximale Dehngrenze $R_{p0,2}$ des Substrats zu erreichen. Die mechanische Festigkeit der eingesetzten Materialien ist generell temperaturabhängig und steigt mit sinkender Temperatur an [RC83, CEC06]. In Abb. 2.5 sind die mechanische Festigkeit und das E-Modul ausgewählter Materialien miteinander verglichen und in Anhang A aufgelistet. Für die meisten energietechnischen Anwendungen werden Zugbelastungen von 150 MPa erwartet. Bei Elektromotoren und Generatoren können die Zugbelastungen auf über 250 MPa bei 77 K ansteigen [GPS04].

Die verschiedenen Herstellungsverfahren der Pufferschichten und der supraleitenden Schicht erfordern unterschiedliche Legierungen für das Substratband. Das Substratband ist während des Herstellungsprozesses neben mechanischen Kräften und hohen Temperaturen einer chemisch aggressiven Umgebung ausgesetzt. Es muss daher neben einer gewissen mechanischen Festigkeit bei hohen Temperaturen eine gute chemische Widerstandsfähigkeit aufweisen [NSY91, ITIK91]. Für die meisten Substratbänder wird eine zur Gruppe der Nickel-Knetwerkstoffe gehörende Nickel-Chrom-Molybdän-Legierung (Handelsname HASTELLOY C276) oder eine

Nickel-Wolfram-Legierung (NiW(5%at)) verwendet. Wenige Herstellungsverfahren ermöglichen die Verwendung eines Edelstahlbandes als Substratband.

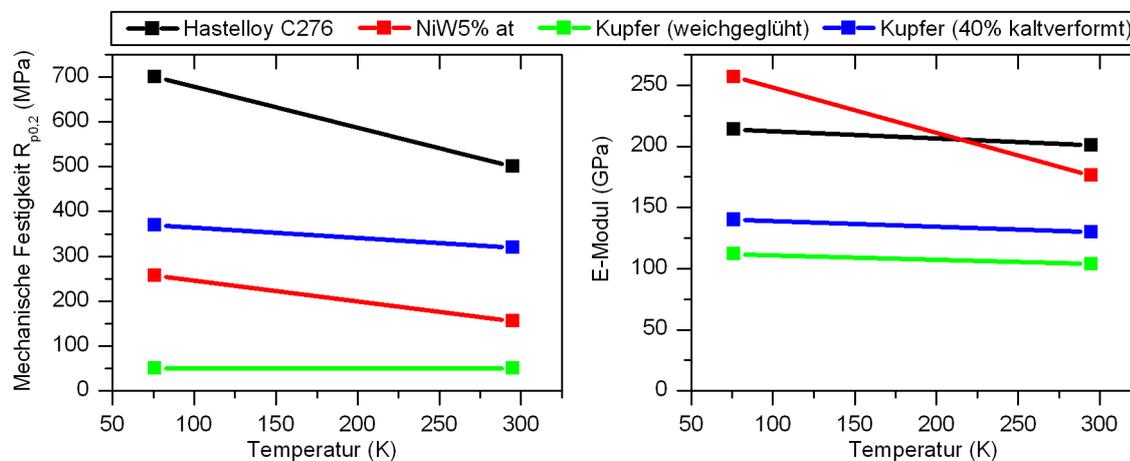


Abb. 2.5: Übersicht der mechanischen Festigkeit und E-Modul ausgewählter Materialien [CEC06, Eki06, SDR92] – Für den Einsatz in einem Strombegrenzer ist die mechanische Festigkeit und das E-Modul innerhalb eines großen Temperaturbereichs von Bedeutung.

2.2.2 Pufferschicht und supraleitende Schicht

Für das Abscheiden der dünnen Pufferschichten und der supraleitenden Schicht finden verschiedene Verfahren Anwendung: das physikalische Verfahren Physical Vapor Deposition (PVD), die physikalisch-chemischen Verfahren Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) und Chemical Vapor Deposition (CVD) sowie das rein chemische Verfahren Metal-Organic Deposition (MOD). Die Abscheidungsverfahren unterscheiden sich bei den Herstellungskosten, der Herstellungsgeschwindigkeit und der Qualität der Schichten. Supraleitende Schichten, hergestellt mit dem physikalischen Verfahren PVD, erzielen die höchste Qualität, allerdings bei sehr geringer Herstellungsgeschwindigkeit und hohen Herstellungskosten. Die physikalisch-chemischen Verfahren MOCVD und CVD und das rein chemische Verfahren MOD erzielen eine geringere Qualität bei einer höheren Herstellungsgeschwindigkeit und besitzen ein hohes Potential zur Verringerung der Herstellungskosten [CDLP04]. Bei der kommerziellen Herstellung werden aktuell mehrere Verfahren zur Abscheidung der einzelnen Schichten in einem Bandleiter verwendet.

Die supraleitende Schicht in einem Bandleiter ist von polykristalliner Struktur. Die Stromtragfähigkeit einer polykristallinen YBCO-Schicht ist von der gleichmäßigen Ausrichtung der kristallographischen Achsen aller Kristallite abhängig. Grund hierfür ist ein stark anisotropes Verhalten der YBCO-Elementarzelle mit ihrer Perowskit ähnlichen Struktur, in der die Supraleitfähigkeit praktisch nur in den CuO-Ebenen der YBCO-Elementarzellen (a-b-Ebene), parallel zur Substratoberfläche, stattfindet [BM86]. Das anisotrope Verhalten der Elementarzelle

überträgt sich bei einer gleichmäßigen Ausrichtung der Kristallitachsen auf die gesamte supraleitende Schicht. So ist die Stromtragfähigkeit der supraleitenden Schicht in der a-b-Ebene 5-7 mal höher als in c-Richtung (normal zur a-b-Ebene) [LGFP01].

Geringe Abweichungen in der Ausrichtung der kristallographischen Achsen benachbarter Kristallite verursachen Versetzungen und Störungen im Kristallgitter und damit verbunden eine geschwächte supraleitende Kopplung [DCML88, CMD88, Gra00, LGFP01]. Bei einer völlig unausgerichteten Anordnung der Kristallitachsen (Abb. 2.6a) ist keine supraleitende Stromtragfähigkeit über die Kristallitgrenzen hinweg möglich. Ideal für die supraleitende Stromtragfähigkeit ist eine vollständig geregelte Textur, also eine nahezu exakte Ausrichtung aller Kristallitachsen der supraleitenden Schicht, wie man sie in einem Einkristall findet [DCML88]. Als Einkristalle werden in diesem Zusammenhang Festkörper bezeichnet, in denen die Abweichungen der Kristallachsen weniger als ca. 1° betragen [Bau99].

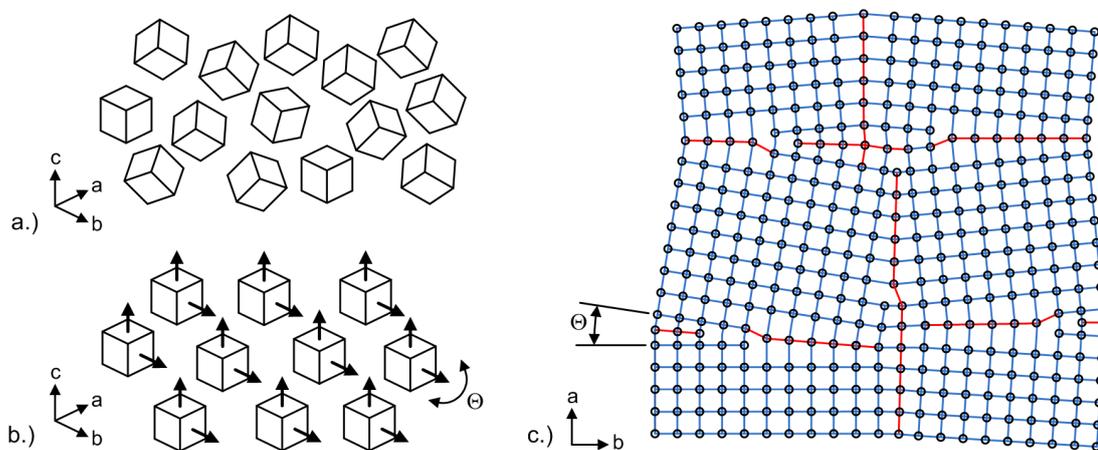


Abb. 2.6: Schema einer biaxial texturierten supraleitenden Schicht – a.) Völlig unausgerichtete Kristallite in einer polykristallinen Schicht. b.) Mit einer kleinen Abweichung Θ ausgerichtete Kristallite zu einer biaxial ausgerichteten Schicht. c.) Entstehung von Kristallitgrenzen in einer biaxial texturierten Schicht nach dem Burgers-Modell [KGL99].

Durch die komplexen und auf Schwankungen der Fertigungsparameterwerte empfindlichen Prozessabläufe der bekannten Herstellungsverfahren ist eine vollständige Textur der supraleitenden Schicht in Bandleitern vergleichsweise aufwendig. Es bleiben geringe Abweichungen in der Ausrichtung der Kristallitachsen. Die Abweichung der Kristallitachsen in c-Richtung zeigt bei supraleitenden Schichten in YBCO-Bandleitern generell eine geringere Abweichung als in der a-b-Ebene [Bau99]. Daher werden für die Bewertung der supraleitenden Schicht nur die Abweichungen in der a-b-Ebene beachtet. Eine Textur mit geringen Abweichungen wird als biaxiale Textur bezeichnet (Abb. 2.6b). Biaxial, da mit der Ausrichtung zweier Kristallitachsen die dritte Kristallachse festgelegt ist. Die Abweichung Θ der Kristallitachsen einer supraleitenden Schicht liegt bei aktuellen Bandleitern zwischen $4..9^\circ$ [SCX07, SCX08]. In Abb. 2.6c sind entstehende Versetzungen in der a-b-Ebene durch eine biaxiale Textur der supraleitenden Schicht nach dem Burgers-Modell dargestellt [KGL99, Gra00, LGFP01, HM02].

Die Pufferschichten in einem Bandleiter erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Zum einen dienen sie als chemische Barriere zwischen dem Substratband und der Supraleiterschicht. Sie verhindern, dass z. B. Nickelatome aus dem Substrat in das Kristallgitter der supraleitenden Schicht diffundieren und die supraleitende Eigenschaft zerstören [KAC04, GNB96]. Zum anderen ist die Aufgabe der Pufferschichten die Weitergabe oder die Erzeugung einer möglichst vollkommenen bzw. biaxialen Textur, um von der Supraleiterschicht durch Epitaxie übernommen zu werden [HRS04].

Für die Herstellung einer biaxialen Textur für die supraleitende Schicht existieren mehrere Verfahren. Diese Verfahren unterscheiden sich in Ihrer Qualität, der Produktionsgeschwindigkeit und den Herstellungskosten. Zudem stellt jedes Verfahren zur Erzeugung einer biaxialen Textur unterschiedliche Anforderungen an das Substratband und bestimmt den Schichtaufbau eines Bandleiters. Da das Texturierungsverfahren somit indirekt die späteren mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Bandleiters beeinflusst, werden die unterschiedlichen Verfahren zur Erzeugung einer biaxialen Textur ausführlich vorgestellt. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Bandleitern fanden drei Verfahren Anwendung: Rolling Assisted Biaxial Textured Substrate (RABiTS), Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) und Inclined Substrate Deposition (ISD) [IM00, HSS00].

RABiTS - Rolling Assisted Biaxial Textured Substrate

Bei diesem Texturierungsverfahren handelt es sich um ein Walzstrukturierungsverfahren. Im Gegensatz zu anderen Texturierungsverfahren wird beim RABiTS-Verfahren das Substratband selbst durch einen Walzprozess mit anschließender Rekristallisierung biaxial texturiert [GPS04, GNB96]. Die biaxiale Textur des Substratbandes wird durch epitaktisches Wachstum von den Pufferschichten und der supraleitenden Schicht übernommen. Der Schichtaufbau eines mit dem RABiTS-Verfahren hergestellten YBCO-Bandleiters ist in Abb. 2.7 auf der rechten Seite schematisch dargestellt.

Eine geeignete biaxiale Textur des Substratbandes ist nur mit wenigen Materialien wie z.B. Silber, Kupfer oder Nickel zu erreichen [GNB96]. Bei kommerziell, im RABiTS-Verfahren hergestellten Bandleitern wird eine Nickel-Wolframlegierung (NiW5%at) verwendet, um eine höhere Festigkeit des Bandleiters für die Herstellung und spätere Anwendungen zu erreichen [CEC06, SRT05, GPS04]. Durch das nötige Rekristallisieren des Substratbandes für eine ausreichend gute biaxiale Textur bleibt die Festigkeit des Substratbandes vergleichsweise gering. Um die geforderte Festigkeit für Anwendungen zu erreichen, werden Edelstahlbänder als zusätzliche Stabilisierung auf den Bandleiter gelötet. Trotz der zusätzlichen Herstellungsschritte um die Festigkeit des Bandleiters zu erhöhen, bleiben die geringen Herstellungskosten ein Vorteil des RABiTS-Verfahrens gegenüber den anderen Texturierungsverfahren [SRT05].

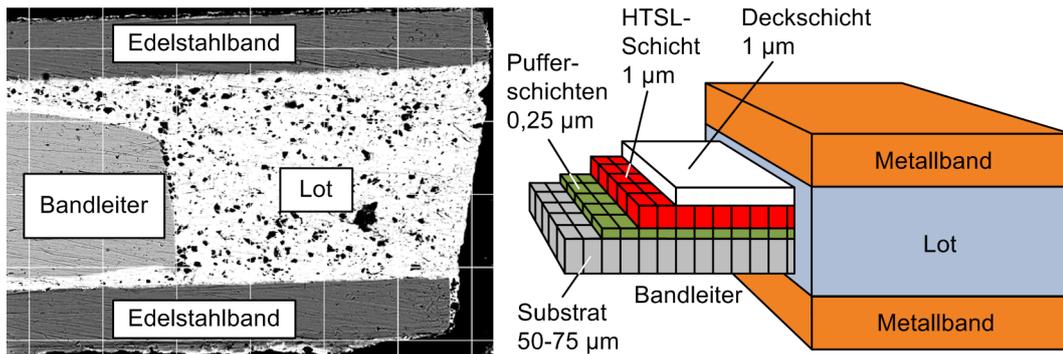


Abb. 2.7: Schichtaufbau eines mit dem RABiTS-Verfahren hergestellten YBCO-Bandleiters [RSV03] – Rechts ist schematisch der Schichtaufbau des Bandleiters mit texturiertem Substratband und zusätzlicher, aufgelöteter Stabilisierung zu sehen. Links der seitliche Ausschnitt einer Querschnittsaufnahme eines mit Edelstahlbändern zusätzlich stabilisierten Bandleiters.

IBAD - Ion Beam Assisted Deposition

Beim IBAD-Verfahren wird die nötige Textur für die supraleitende Schicht in der Pufferschicht erzeugt [MLF02, BSK99b]. Bei diesem Texturierungsverfahren ist keine Texturierung des Substratbandes notwendig. Daher können festere und weniger magnetisierbare Werkstoffe wie HASTELLOY C276 als Substratband verwendet werden (siehe Kapitel 2.2.1). In Abb. 2.8 ist ein typischer Schichtaufbau eines mit dem IBAD-Verfahren hergestellten Bandleiters mit Angaben typischer Schichtdicken zu sehen [XLR07].

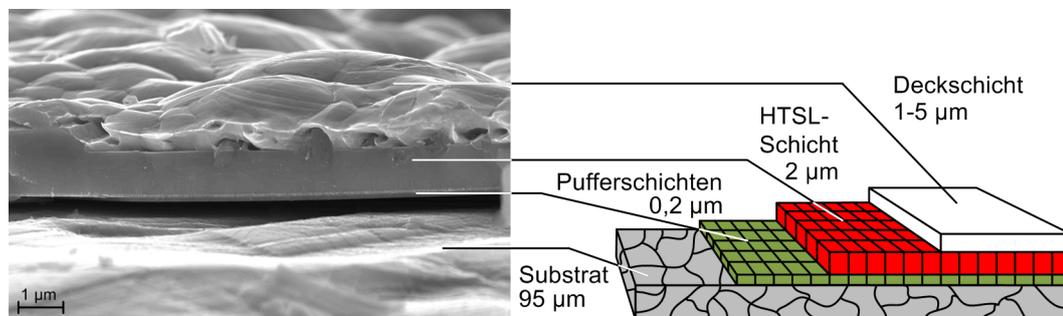


Abb. 2.8: Schichtaufbau eines mit dem IBAD-Verfahren hergestellten YBCO-Bandleiters – Rechts der schematische Schichtaufbau mit untexturiertem Substratband, texturierter Pufferschicht und supraleitender Schicht [XLR07]. Links ist die Aufnahme einer, von der Substratoberfläche abgelösten Pufferschicht mit darüberliegender supraleitender Schicht und aufgesputzter Deckschicht zu sehen.

Die Pufferschicht besteht aus bis zu sechs Einzelschichten, von denen nur die unteren als Diffusionssperre zwischen Substratband und supraleitender Schicht dienen. Die übrigen Schichten in der Pufferschicht erzeugen eine biaxiale Textur, die von der supraleitenden Schicht durch Epitaxie übernommen wird. Während des Abscheidvorganges wird eine Pufferschicht aus Zirkonoxid (ZrO_2) oder Magnesiumoxid (MgO) mit einem Ionenstrahl unter einem bestimmten Winkel beschossen. Der Ionenstrahl entfernt falsch orientierte Abscheidungen der Pufferschicht

sofort wieder und erzeugt so eine biaxiale Textur [RBR92, ITKI92, ITIK91]. Die supraleitende Schicht wächst epitaktisch auf den biaxial texturierten Pufferschichten auf. Im Vergleich zum RABiTS-Verfahren ist das IBAD-Verfahren technologisch aufwendiger. Die Vorteile des IBAD-Verfahrens liegen vor allem in der guten Qualität der supraleitenden Schicht und in der Unabhängigkeit von einer Texturierung des Substratbandes.

ISD - Inclined Substrate Deposition

Bei diesem Schrägbedampfungsverfahren werden zwei biaxial texturierte Pufferschichten aus MgO erzeugt, auf denen die supraleitende Schicht epitaktisch aufwächst [PSN05, PNH05, BSK99a]. Da beim ISD-Verfahren wie beim IBAD-Verfahren kein texturiertes Substratband notwendig ist, wird ebenfalls HASTELLOY C276 als Substratband verwendet.

Zu Beginn der Bedampfung wachsen die MgO-Kristallite zunächst ungeordnet auf dem Substratband. Aufgrund der Umgebungsbedingungen und der hohen Abscheiderate wachsen die Kristallite säulenartig. In Abhängigkeit des Bedampfungswinkels (Winkel zwischen der MgO-Quelle und der Substratbandnormalen) wachsen bevorzugt Kristallite mit einer bestimmten Ausrichtung [Lüm05, Han04]. Durch das bevorzugte Wachstum nimmt die Säulenstärke der ausgerichteten Kristallite mit der Schichtdicke stärker zu als bei unausgerichteten Kristalliten. Bei genügend großen Schichtdicken "hungern" die ausgerichteten Kristallite benachbarte, nicht ausgerichtete Kristallite durch Abschattungseffekte aus. So entsteht eine biaxiale Textur der Pufferschicht in Abhängigkeit des Bedampfungswinkels. In Abb. 2.9 sind in einer Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop die schrägen, säulenartigen Kristallite der Pufferschicht zu sehen.

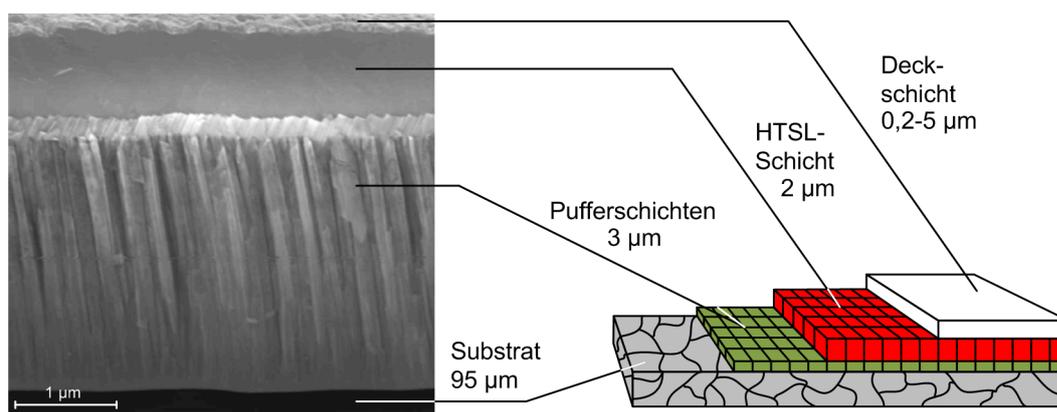


Abb. 2.9: Schichtaufbau eines mit dem ISD-Verfahren hergestellten YBCO-Bandleiters – Rechts der schematische Schichtaufbau mit Angabe typischer Schichtdicken. Links ist eine Aufnahme der beiden, mit dem ISD Verfahren hergestellten Pufferschichten zu sehen. Gut zu erkennen ist die schräge, säulenartige Struktur der Pufferschicht aus MgO und die darüber liegende, ebenfalls schräge MgO-Abschlusschicht. Der Beginn des Substratbandes ist als schwarzer Bereich am unteren Bildrand zu erkennen. (Quelle der linken Abbildung: THEVA Dünnschichttechnik GmbH)

Durch das säulenartige Wachstum und Reste von “ausgehungerten” Kristalliten entstehen kleine, durch die gesamte Pufferschicht reichende Spalten, die eine Diffusion von Bestandteilen aus dem Substratband in die Supraleiterschicht erlauben würden. Um eine Diffusion zu verhindern, wird eine zusätzliche, durch eine geringere Abscheiderate dichte, MgO-Abschlusschicht auf die biaxial texturierte Pufferschicht aufgebracht. Die Abschlusschicht übernimmt die Textur der unteren Pufferschicht durch epitaktisches Wachstum und gibt sie an die supraleitende Schicht weiter. Charakteristisch für dieses Texturierungsverfahren ist eine poröse und vergleichbar dicke Pufferschicht von ca. 3 μm .

2.2.3 Deckschicht und zusätzliche Stabilisierung

Neben dem Schutz vor Umwelteinflüssen ist es die Aufgabe der Deckschicht, die darunter liegende supraleitende Schicht elektrisch und thermisch zu stabilisieren. Fehlstellen in der supraleitenden Schicht führen in einem kleinen Volumen quer zur Stromrichtung zu einem erhöhten Widerstand und in der Folge zu einer lokalen Erwärmung – einem sogenannten Hot-Spot. Derzeit besitzen alle Supraleiter eine elektrisch und thermisch gut leitende Deckschicht, um die supraleitende Schicht vor Hot-Spots zu schützen. Die Deckschicht wird mit einem Bedampfungs- oder einem Sputterverfahren auf die supraleitende Schicht aufgebracht. Als Material für die Deckschicht eignet sich besonders Silber wegen seiner Durchlässigkeit von Sauerstoff zur Beladung der supraleitenden Schicht während der Bandleiterherstellung (vgl. Kapitel 2). Neben Silber werden allerdings auch Gold oder Kupfer als Deckschicht aufgetragen [Uso07]. Mit einer ausreichenden Stabilisierung kommt es bei thermisch stabilen Hot-Spots zu keiner praktischen Beeinträchtigung des Bandleiters in energietechnischen Anwendungen, abgesehen von einem erhöhten Bedarf an Kühlleistung. Für Anwendungen, die ausschließlich im supraleitenden Zustand betrieben werden und für die eine hohe thermische Stabilität gefordert wird, wie bei supraleitenden Magneten, rotierenden Maschinen oder bei Energieübertragungskabeln, wird auf die Deckschicht zusätzlich eine Stabilisierungsschicht aus Kupfer aufgebracht.

Das Aufbringen einer zusätzlichen Stabilisierung beeinflusst neben den elektrisch-thermischen Eigenschaften die mechanische Eigenschaft des Bandleiters [CEC06]. Besonders Bandleiter, die mit einem texturierten Substrat aus einer Nickel-Wolfram-Legierung hergestellt sind, besitzen eine zusätzliche Stabilisierung aus aufgelöteten Edelstahlbändern, um die mechanische Festigkeit des Bandleiters zu erhöhen.

2.3 Zusammenfassung

Jede Anwendung stellt eigene Anforderungen an den eingesetzten Supraleiter. Für energietechnische Betriebsmittel sind neben einer hohen kritischen Temperatur und einem hohen kritischen Strom generell die kostengünstige Herstellung des Supraleiters in ausreichender Länge

und Qualität das Ziel. Besondere Anforderungen an den Supraleiter stellt der Betrieb in einen großen Temperaturbereich zwischen dem supraleitenden und dem normalleitenden Zustand in der Anwendung als resistiver Strombegrenzer.

Mit Vorgriff auf die weiteren Ergebnisse dieser Arbeit zeigen sich YBCO-Bandleiter aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften für die Verwendung in supraleitenden resistiven Strombegrenzern als besonders geeignet. Die hohe technische Stromdichte bereits bei 77 K, der hohe Widerstandsbelag aufgrund des geringen Bandleiterquerschnitts und die damit verbundenen geringen Wechselstromverluste sind für den Nennbetrieb und die Kurzschlussstrombegrenzung im Fehlerfall von elementarer Bedeutung. Die geringe Masse von YBCO-Bandleitern wirkt sich zudem günstig auf das Rückkühlverhalten nach der Kurzschlussstrombegrenzung aus, während die mechanische Flexibilität des YBCO-Bandleiters bei gleichzeitig hoher Festigkeit eine kostengünstige automatisierte Fertigung von strombegrenzenden Modulen ermöglicht.

Die Umstellung von der Kleinserienproduktion zu einer industriellen Herstellung ist der Schlüssel für den ökonomischen Erfolg von YBCO-Bandleitern. Besonders hervorzuheben in diesem Zusammenhang sind die Herstellungsverfahren der notwendigen biaxialen Textur für die supraleitende Schicht in YBCO-Bandleitern, die sich in ihrer Qualität, Herstellungsgeschwindigkeit und Kosten unterscheiden. In Abb. 2.10 sind die Herstellungsverfahren qualitativ miteinander verglichen.

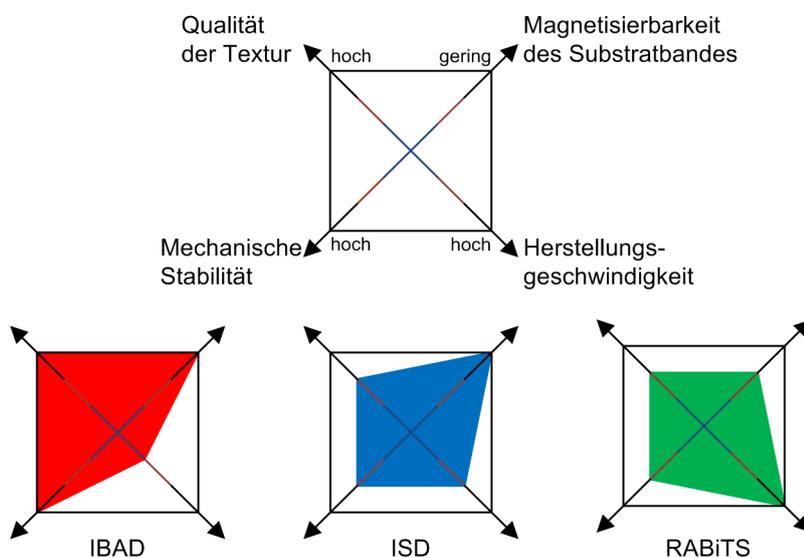


Abb. 2.10: Qualitativer Vergleich der unterschiedlichen Verfahren zur Herstellung einer biaxialen Textur – Das zunehmende Erfüllen der unterschiedlichen Kriterien für die Herstellungsverfahren ist mit steigendem Abstand vom Mittelpunkt gekennzeichnet. Ein Texturierungsverfahren, das über die geforderten Eigenschaften vollständig verfügt, füllt somit die gesamte gekennzeichnete Fläche farbig aus.

Bandleiter, hergestellt mit den Texturierungsverfahren IBAD und RABITS liefern aktuell ausreichende Längen und ausreichende Stromdichten für erste energietechnische Anwendungen mit den geringsten spezifischen Kosten. Um die Kosten für die Herstellung eines Band-

leiters in Zusammenhang mit der Qualität und der Länge zu bringen, werden die Marktpreise als spezifische Kosten in €/ (kA m) ausgedrückt, wobei es sich bei dem Strom um den kritischen Strom des Bandleiters handelt. Während der Erstellung dieser Arbeit wurden Bandleiter zu Marktpreisen von 200...360 €/ (kA m) angeboten. Es wird erwartet, dass sich supraleitende Komponenten in der Energietechnik in der Breite durchsetzen, wenn Marktpreise von unter 35 €/ (kA m) erreicht werden [Ben08].

3 Charakterisierung von YBCO-Bandleitern

Das Design eines supraleitenden Strombegrenzers und das Verhalten im Begrenzungsfall werden durch die charakteristischen physikalischen Eigenschaften des Supraleiters bestimmt. Als charakteristische Größen von YBCO-Bandleitern sind in dieser Arbeit physikalische Größen definiert, die zur Beschreibung des Bandleiterverhaltens in der Anwendung in energietechnischen Betriebsmitteln, wie supraleitenden Strombegrenzern, maßgeblich sind. Die charakteristischen supraleitenden Größen beschreiben das Verhalten des Bandleiters im supraleitenden Zustand, während die allgemeinen charakteristischen Größen sowohl das Bandleiterverhalten im supraleitenden Zustand als auch im normalleitenden Zustand bestimmen. Zu den charakteristischen supraleitenden Größen zählen

- der kritische Strom I_c
- der n-Wert
- die Bandleiterhomogenität

und zu den allgemeinen charakteristischen Größen zählen

- der temperaturabhängige Widerstandsbelag R'
- die spezifische Wärmekapazität c
- die Wärmeleitfähigkeit λ
- die mechanische Stabilität (Festigkeit und E-Modul).

Die charakteristischen supraleitenden Größen müssen für jeden Bandleiter durch Messungen bestimmt werden. Zur Charakterisierung von YBCO-Bandleitern wurden die supraleitenden Größen von unterschiedlichen Bandleitern experimentell bestimmt und untersucht. Die allgemeinen charakteristischen Größen lassen sich bei Kenntnis der physikalischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und der Bandleitergeometrie für jeden Bandleiter berechnen. Von den allgemeinen charakteristischen Größen eines Bandleiters wurde in dieser Arbeit nur der temperaturabhängige Widerstandsbelag experimentell bestimmt, um die berechneten Werte zu verifizieren. Für die spezifische Wärmekapazität c , die Wärmeleitfähigkeit λ und die mechanische Stabilität wurden Werte aus der Literatur verwendet.

In Tab. 3.1 sind die geometrischen Daten der untersuchten Bandleiter zusammengefasst. In Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens der Textur der supraleitenden Schicht (vgl. Kapitel 2.2), sind die untersuchten Bandleiter in drei Gruppen unterteilt: A (RABiTS), B (IBAD) und C (ISD). Bandleiter einer Gruppe sind zur eindeutigen Identifikation zusätzlich nummeriert. Die Nummer steht für die Dicke der Deck- bzw. Stabilisierungsschicht als Vielfaches von 100 nm. Die Kombination aus Bandleitergruppe und Bandleiternummer bezeichnet eindeutig den Bandleitertyp. Beim Bandleitertyp B16 handelt es sich z. B. um einen Bandleiter, hergestellt mit dem IBAD-Verfahren mit einer Deckschichtdicke von 1,6 μm .

	A500	B30	B25	B16	C44	C5
Dicke der Deckschicht aus Silber (μm)	1 ^a	3 ^b	2,5 ^{a,b}	1,6 ^b	4,4	0,5
Dicke der supraleitenden Schicht (μm)	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	3	3
Dicke der Pufferschichten (μm)	0,25 ^a	0,16 ^a	0,16 ^a	0,16 ^a	4 ^a	4 ^a
Dicke des Substrats (μm)	50-75 ^a	44	97	96	92	93
Gesamtdicke des Bandleiters (μm)	147	50	102	99	103	100
Breite des Bandleiters (mm)	4,23	12	12,4	12	9,88	9,86
Zusätzliche Stabilisierung mit Edelstahlbändern und Lot (μm)	2·50	-	-	-	-	-

^a Herstellerangaben, ^b Berechnete Werte (vgl. Kapitel 3.2.3)

Tab. 3.1: Übersicht der geometrischen Daten aller untersuchter Bandleiter – Durch die Verwendung von Messwerten und Herstellerangaben kann die Summe der Einzelschichtdicken nicht mit der gemessenen Gesamtdicke übereinstimmen.

Im folgenden Kapitel 3.1 sind die Messeinrichtungen und Messmethoden zur Bestimmung der charakteristischen Größen beschrieben. Die erhaltenen Ergebnisse werden im Kapitel 3.2 – Ergebnisse und Zusammenfassungen – vorgestellt und deren Bedeutung für die Verwendung eines YBCO-Bandleiters in einem resistiven Strombegrenzer erörtert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind Grundlage für die weiteren theoretischen Ausarbeitungen dieser Arbeit.

3.1 Messeinrichtungen und Messmethoden

In diesem Kapitel sind die in dieser Arbeit angewandten Methoden und Messeinrichtungen zur Bestimmung der charakteristischen supraleitenden Größen und des Widerstandsbelags beschrieben. Die charakteristischen Größen wurden für alle Bandleitertypen an mehreren Proben bestimmt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

3.1.1 Charakteristische supraleitende Größen

Zur Bestimmung der charakteristischen supraleitenden Größen wurde eine Messeinrichtung aus einer Gleichstromquelle und einem Messsystem für kleine Spannungen entworfen und aufgebaut. Der Testablauf ist vollautomatisiert. Alle Geräte wurden von einem LabVIEW-Messprogramm über eine GPIB-Schnittstelle gesteuert und die gemessenen Strom- und Spannungsmesswerte ausgelesen und gespeichert. Das Messsystem zur Spannungsmessung bestand aus einem Nanovoltmeter zur Messung der Spannung über dem Bandleiter und einem elektromechanischen Multiplexer zur Umschaltung zwischen den Spannungskontakten der einzelnen Sektionen auf das Nanovoltmeter. Als Gleichstromquelle diente ein regelbares Netzgerät mit einer maximalen Ausgangsspannung von 6 V und einem maximalen Ausgangsstrom von 2 kA. Die aktuelle Stromstärke wurde über einen integrierten Shunt im Netzgerät gemessen. Alle Untersuchungen der charakteristischen supraleitenden Größen fanden in siedendem Stickstoff unter Normaldruck bei 77 K statt. Die Messeinrichtung zur Bestimmung der charakteristischen supraleitenden Größen ist in Abb. 3.1 schematisch dargestellt.

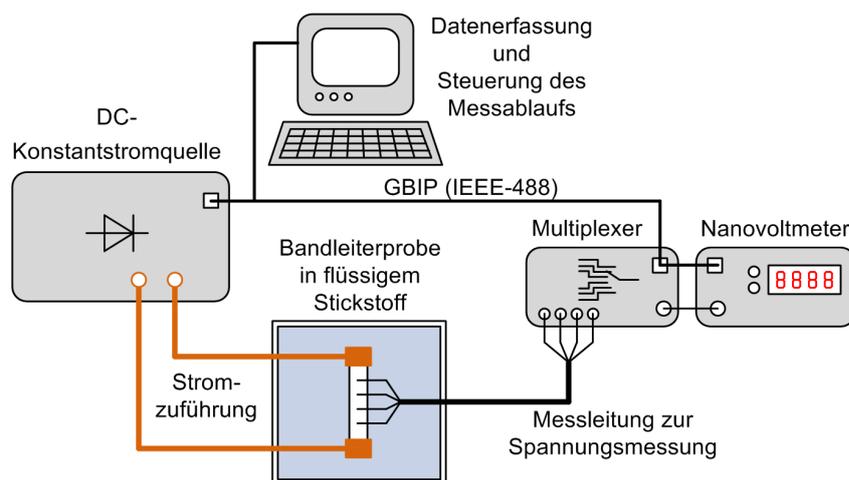


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Testeinrichtung zur Bestimmung des kritischen Stromes und der Bandleiterhomogenität.

Für die Kontaktierung des Bandleiters wurde eine Probenhalterung konstruiert und hergestellt. Über Klemmkontakte aus Kupfer wurde der Strom über die normalleitende Deckschicht in die supraleitende Schicht des Bandleiters eingekoppelt. Durch Joulesche Wärme kommt es zu einer Temperaturerhöhung des Bandleiters an den Kontaktflächen. Aufgrund der Beeinflussung der supraleitenden Eigenschaften durch die Temperatur (siehe Kapitel 2.1), wurde während der Untersuchungen auf eine möglichst geringe Erhöhung der Bandleitertemperatur geachtet. Um die Joulesche Wärme zu minimieren, wurde der Bandleiter an den Kontaktflächen mit einer Indiumfolie umwickelt. Indium ist ein duktiles Metall und bleibt selbst bei 77 K gut formbar, gleicht geringe Unebenheiten an den Kontaktflächen aus und vermindert so den Übergangswiderstand durch Vergrößerung der Kontaktfläche.

Die entstehende Wärme an den Kontaktflächen wird an den umgebenden flüssigen Stickstoff abgegeben. Die abgegebene Kühlleistung ist von der Größe der Kontaktfläche, der Beschaffenheit der Kontaktfläche (u. a. Material, Rauheit und Lage) und von der Temperaturdifferenz zwischen Kontaktfläche und flüssigem Stickstoff abhängig¹ [MC62, DSF96, DF96, Fis99]. Die Klemmkontakte wurden so ausgelegt, dass bei einem Strom von 300 A der Temperaturanstieg an den Kontakten unter 1 K begrenzt wird [Eki06]. Die korrekte Auslegung der Kontakte zur Begrenzung des Temperaturanstiegs wurde durch Temperaturmessungen an den Klemmkontakten während der Untersuchungen bestätigt.

Zur Bestimmung der charakteristischen Größen wurden Kurzproben von 11 cm Länge in 11 gleiche Sektionen unterteilt. Über jeder Sektion und über der gesamten Bandleiterlänge wurde die Spannung mit vergoldeten Federkontakten gemessen. Die äußersten Spannungskontakte sind im Abstand von ca. 3 mm von den Klemmkontakten angebracht, um den Einfluss der Bandleitererwärmung unter den Kontaktflächen auf die Bestimmung der charakteristischen supraleitenden Eigenschaften weiter zu minimieren. In Abb. 3.2 ist schematisch die Probenhalterung mit Kontaktierung des Bandleiters und die Einteilung in Sektionen mit den Kontakten für die Spannungsmessung zu sehen.

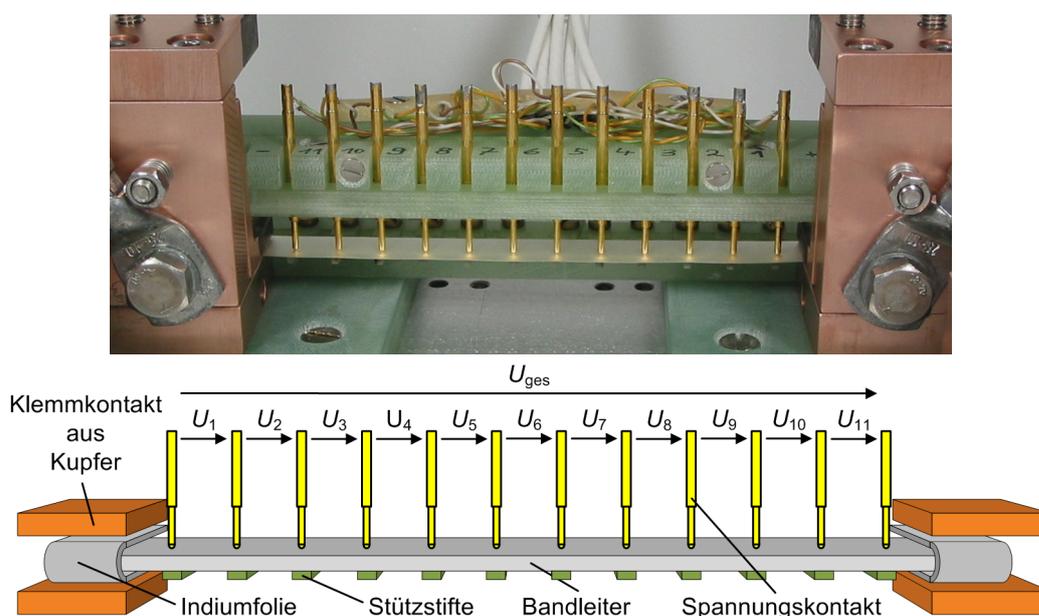


Abb. 3.2: Bandleiterkontaktierung und Spannungsmessung in der Probenhalterung für 11 cm Kurzproben – Oben: Foto der Probenhalterung für Kurzproben mit Kontaktierung für Spannungsmessung. Unten: Schematische Darstellung der Probenhalterung mit Messeinrichtung. Der Bandleiter wird mit einer Indiumfolie umwickelt, um Unebenheiten an den Kontaktflächen zwischen Bandleiter und Klemmkontakt auszugleichen.

Um Fehler durch Rauschen und äußere Störungen zu reduzieren, wurde in jeder Sektion die Spannungsmessung 5-mal wiederholt und aus den Einzelergebnissen der arithmetische Mittel-

¹Die spezifische statische Kühlleistungskurve von flüssigem Stickstoff ist in Anhang A.5 zu sehen.

wert gebildet. Die Abweichung der 5 einzelnen Spannungsmessungen von ihrem arithmetischen Mittelwert in einer Sektion lag typischerweise unter 40 nV. Jeder Federkontakt wurde mit dem kugelförmigen Kontaktende mittig auf die Deckschicht des Bandleiters mit einer Kraft von ca. 5 N aufgedrückt. Um den Bandleiter von Zugkräften durch die aufgedrückten Kontakte zu entlasten, wurde der Bandleiter unter jedem Kontakt mit einem Stift aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) unterstützt. Die Stifte hatten eine Stärke von 2 mm und reichten über die gesamte Bandleiterbreite.

Der kritische Strom wurde mit der Transportmethode in Verbindung mit dem $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -Kriterium bestimmt (vgl. Kapitel 2.1). Bei der Transportmethode wird der Strom durch den Bandleiter schrittweise erhöht und nach jeder Stromerhöhung bei konstant gehaltenem Strom die Spannung über dem Bandleiter gemessen. Die gemessenen Spannungen werden auf die Messlänge normiert und als E-Feld über dem Strom als E-I-Kennlinie aufgetragen. Der Stromwert, bei dem das E-Feld über dem gesamten Bandleiter das kritische E-Feld E_c erreicht, wird als kritischer Strom I_c definiert. In Abb. 3.3a ist schematisch eine E-I-Kennlinie zur Bestimmung des kritischen Stromes mit der Transportmethode und dem $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -Kriterium dargestellt.

Der charakteristische n-Wert einer untersuchten Bandleiterprobe wurde grafisch bestimmt. Durch den exponentiellen Zusammenhang von E-Feld und Strom nach Gl. 2.1, lässt sich der charakteristische n-Wert als Steigung der E-I-Kennlinie in einem doppelt logarithmisch skalierten Diagramm ermitteln (siehe Abb. 3.3b) [Kom95].

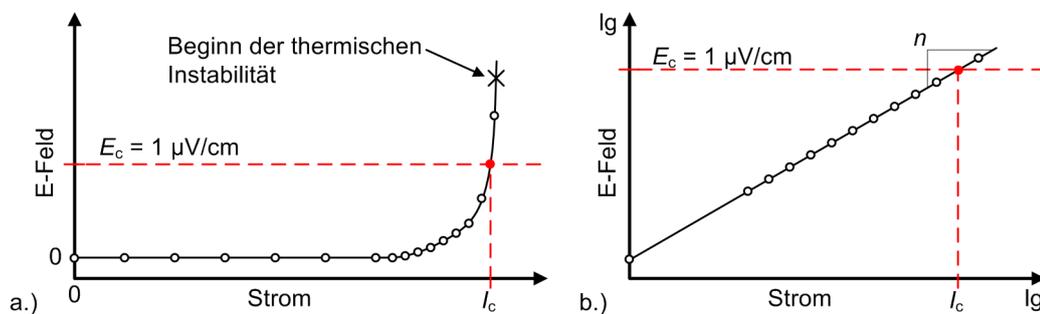


Abb. 3.3: Messablauf und Methode zur Bestimmung des kritischen Stromes – a.) Nach jeder Stromerhöhung wird das E-Feld über dem Bandleiter gemessen. Um den Anstieg des E-Feldes besser aufzulösen, verkleinern sich die Erhöhungsschritte des Stromes vor dem Anstieg des E-Feldes. b.) Der n-Wert lässt sich grafisch als Steigung der E-I-Kennlinie in einem doppelt logarithmisch skalierten Diagramm bestimmen.

Durch die positive Kopplung der erzeugten Wärme und dem Spannungsanstieg im stromstabilisierten Betrieb des Netzgerätes gibt es einen kritischen thermischen Stromwert. Oberhalb des kritischen thermischen Stromwertes überschreitet die umgesetzte Leistung im Bandleiter die Kühlleistung des umgebenden Stickstoffbades und es kommt zu einem unkontrollierten Anstieg des Widerstandes im Bandleiter. Bei ausreichender Leistung der stromstabilisierten Gleichstromquelle wird der Bandleiter nach dem Überschreiten des kritischen thermischen

Stromwertes thermisch zerstört. Zum Schutz des Bandleiters vor thermischer Zerstörung wurde die zulässige Leistung der Gleichstromquelle während der Messungen begrenzt.

Die Inhomogenität δ eines Bandleiters beschreibt Schwankungen des kritischen Stromes entlang des Bandleiters. In dieser Arbeit ist als Wert für die Inhomogenität eines Bandleiters die größte prozentuale Abweichung des kritischen Stromes in einer Sektion vom arithmetischen Mittelwert \bar{I}_c der kritischen Ströme aller Sektionen nach Gl. 3.2 definiert.

$$\bar{I}_c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{c,i} \quad [3.1]$$

$$\delta = 100 \cdot \left(1 - \left| \frac{I_{c,\max/\min}}{\bar{I}_c} \right| \right) \quad [3.2]$$

Bei der Bestimmung des kritischen Stromes kann der Strom durch den Bandleiter idealerweise soweit erhöht werden, bis das E-Feld in allen Sektionen E_c erreicht. Bei einem stark inhomogenen Bandleiter ist dies nicht möglich, ohne den Bandleiter durch einen Quench zu gefährden. Um auch bei stark inhomogenen Bandleitern eine Aussage über die Inhomogenität treffen zu können, wurde der kritische Strom in Sektionen, die E_c nicht erreichen, über das Potenzgesetz von Gl. 2.1 aus dem letzten Messwert errechnet. Die Angaben der Inhomogenität von Bandleitern, bei denen in einzelnen Sektionen kein Anstieg des E-Feldes zu messen war, bevor das E-Feld über dem gesamten Bandleiter E_c erreichte, sind mit > (größer als) gekennzeichnet.

Die aufgenommenen Spannungswerte zeigten im supraleitenden Bereich einen für jede Sektion charakteristischen Spannungsoffset. Um den Spannungsoffset zu kompensieren, wurde die Aufnahme der Spannungswerte bei umgekehrter Strompolarität wiederholt und der arithmetische Mittelwert aus beiden Spannungswerten berechnet. Die Unsicherheit bei der Bestimmung des kritischen Stromes wurde unter Berücksichtigung des Spannungsoffsets, der Messlänge und der Messgenauigkeit des Nanovoltmeters in Verbindung mit dem Multiplexer auf unter 1 % abgeschätzt. Für die Bestimmung der charakteristischen Größen ist die Messgenauigkeit ausreichend für aussagekräftige Ergebnisse.

3.1.2 Allgemeine charakteristische Größen

Zur Bestimmung des Widerstandsbelags wurde der Widerstand des Bandleiters mit einem Widerstandsmessgerät und dem Vierleitermessverfahren gemessen. Die Kontakte zur Spannungsmessung wurden auf der Silberdeckschicht des Bandleiters im Abstand von 10 cm festgeklemmt. Der Strom wurde mit 1,5 cm Abstand von den Spannungskontakten in den Bandleiter eingekoppelt. Auf der Gegenseite der beiden Spannungskontakte wurde am Substratband des Bandleiters mit jeweils einem PT-1000 Temperatursensor die Temperatur gemessen. In Abb. 3.4 ist die Kontaktierung zur Messung des Widerstandsbelags und der Temperatur des Bandleiters im Schema dargestellt.

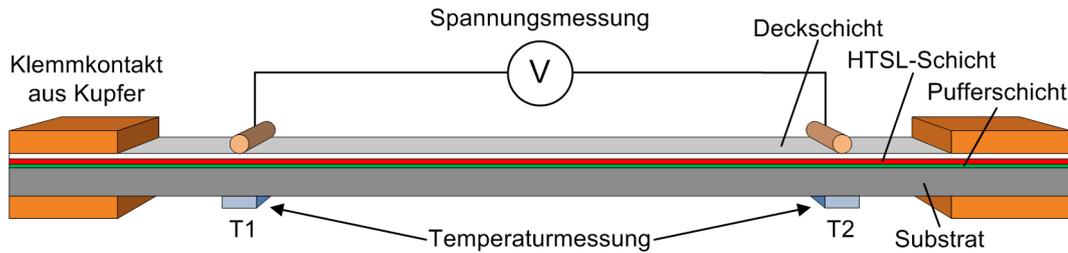


Abb. 3.4: Schema der Bandleiterkontaktierung zur Messung des temperaturabhängigen Widerstandsbelags

In regelmäßigen Zeitabständen wurden der Widerstandswert und die Temperaturwerte von einem Datenaquisitionsprogramm ausgelesen und gespeichert. Der gemessene Widerstand wurde auf die Messlänge normiert und dem Mittelwert der beiden Temperaturmessungen zugeordnet und gespeichert. In Abb. 3.5 ist die Messeinrichtung zur Messung des temperaturabhängigen Widerstandsbelags zu sehen. Der experimentell bestimmte temperaturabhängige Widerstandsbelag im Temperaturbereich von 92...600 K ist aus zwei Teilmessungen zusammengesetzt. Die Messwerte wurden im unteren Temperaturbereich während der Aufwärmphase und im oberen Temperaturbereich während der Abkühlphase aufgenommen. Die Teilmessung im oberen Temperaturbereich von 295...600 K erfolgte in einem Ofen mit regelbarer Temperatur. Um ein Oxidieren der Bandleiteroberfläche während der Messung zu verhindern, wurde der Innenraum des Ofens mit einer Schutzatmosphäre gefüllt. Die Teilmessung im unteren Temperaturbereich von 92...295 K erfolgte in einem Kryostaten aus Kunststoff. Die Bandleiterprobe wurde durch Eintauchen in flüssigen Stickstoff auf 77 K abgekühlt. Nach dem Verdunsten des Stickstoffs erwärmte sich die Bandleiterprobe im Stickstoffgas auf Raumtemperatur, während der Bandleiterwiderstand in regelmäßigen Zeitabständen gemessen wurde.

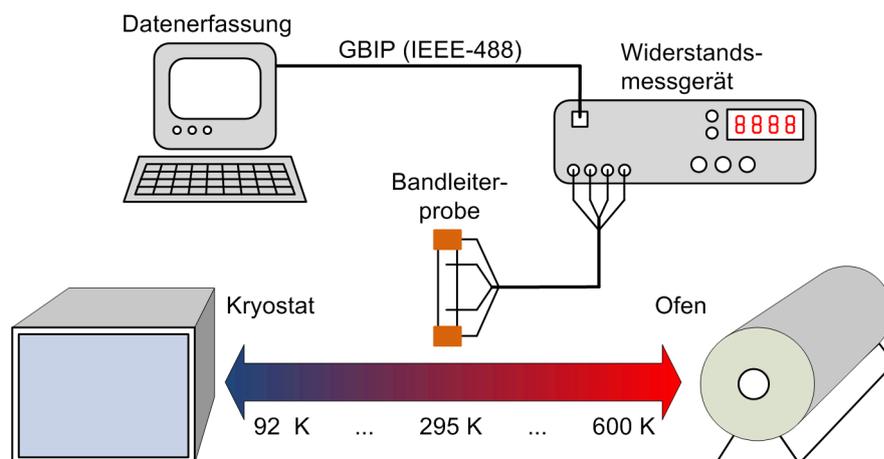


Abb. 3.5: Schema der Messeinrichtung zur Messung des temperaturabhängigen Widerstandsbelags

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die charakteristischen Eigenschaften eines Bandleitertyps lassen eine Aussage über eine Verwendung als strombegrenzendes Element in einem Strombegrenzer zu und dienen als Grundlage für die weiteren Untersuchungen und der Verifizierung von Modellierungen des Erwärmungsverhaltens (siehe Kapitel 4.3). Im Folgenden werden die erhaltenen Ergebnisse jeder untersuchten charakteristischen Größe ausführlich diskutiert und deren Bedeutung für den Entwurf eines supraleitenden resistiven Strombegrenzers erörtert.

3.2.1 Kritischer Strom und n-Wert

Der kritische Strom I_c definiert die supraleitende Stromtragfähigkeit eines Bandleiters und ist als charakteristische Größe für den Entwurf eines supraleitenden Strombegrenzers sowohl von technischer als auch von ökonomischer Bedeutung (vgl. Kapitel 5.1). Der kritische Strom I_c bestimmt in Verbindung mit dem vorgegebenen Nennstrom eines Strombegrenzers die nötige Anzahl an parallelgeschalteten Bandleitern. Zudem beeinflusst die Höhe des kritischen Stromes indirekt die Begrenzungseigenschaften des Strombegrenzers. Mit steigendem kritischem Strom steigt der Transportstrom eines Bandleiters im Nennbetrieb. Um lokale Defekte in der supraleitenden Schicht im Nennbetrieb zu überbrücken, wird mit steigendem Transportstrom eine bessere Stabilisierung des Bandleiters notwendig, die wiederum das Begrenzungsverhalten des Bandleiters über den geringeren Widerstandsbelag beeinflusst (vgl. Kapitel 4.1.2).

Der n-Wert ist, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ein Maß für den Anstieg des E-Feldes bzw. des Widerstandes der supraleitenden Schicht bei Stromwerten um I_c . Gleich wie I_c ist der n-Wert unabhängig von der Stabilisierung der supraleitenden Schicht. Für die Anwendung von Bandleitern in resistiven Strombegrenzern besitzt der genaue n-Wert als charakteristische Eigenschaft eine untergeordnete Bedeutung. Gründe dafür sind die hohen n-Werte der untersuchten Bandleiter und die begrenzte Gültigkeit des n-Wertes auf den Beginn des E-Feldanstiegs um I_c . Nur bei sehr geringen n-Werten ist eine bessere Stabilisierung der supraleitenden Schicht erforderlich und das auch nur beim Auftreten von geringen Überströmen in sehr inhomogenen Bandleitern. Die n-Werte der untersuchten Bandleiter sind ausreichend hoch, so dass dem n-Wert bei vergleichsweise homogenen Bandleitern keine besondere Bedeutung zukommt. In dieser Arbeit ist der n-Wert lediglich für die Berechnung des kritischen Stromes bei sehr inhomogenen Bandleitern von Bedeutung, da bei diesen inhomogenen Bandleitern das kritische E-Feld nicht in allen Sektionen erreicht werden kann ohne den Bandleiter zu gefährden (vgl. Kapitel 3.1.1).

Bei der Bestimmung des kritischen Stromes und des n-Wertes an mehreren Proben eines Bandleiters ergaben sich unterschiedliche Werte für jede Probe. In Tab. 3.2 sind die minimalen und maximalen Werte bei der Bestimmung des kritischen Stromes und des n-Wertes für jeden Bandleiter angegeben.

	A500	B16	B25	B30	C5	C44
Kritischer Strom (A)	50...62	266...282	139...146	211...220	90...99	78...108
Spez. krit. Strom (A/cm)	118...147	221...235	112...114	176...183	91...100	79...109
n-Wert (-)	20...35	36...43	46...51	39...42	35...42	32...45

Tab. 3.2: Streuung in den Ergebnissen des experimentell bestimmten absoluten und auf die Bandleiterbreite bezogenen kritischen Stromes und n-Wertes

3.2.2 Bandleiterhomogenität

Die Homogenität des kritischen Stromes entlang eines Bandleiters besitzt eine besondere Bedeutung für die Verwendung von Bandleitern in resistiven Strombegrenzern. Sie eignet sich sehr gut, für eine Beurteilung der Qualität eines Bandleiters. Bei einer zu großen Inhomogenität des Bandleiters kann es durch lokale Defekte in der supraleitenden Schicht zu Beschädigungen kommen. Ideal für einen supraleitenden Bandleiter als strombegrenzendes Element wäre eine perfekt homogene Verteilung des kritischen Stromes über die gesamte Länge des Bandleiters. Besonders geringe und langsam ansteigende Überströme führen in einem inhomogenen Bandleiter zu einem ungleichmäßigen Aufbau des Widerstands, der thermisch-mechanische Spannungen oder die thermische Zerstörung des Bandleiters zur Folge haben kann.

Selbst sehr homogene Bandleiter können in der Anwendung durch die Verarbeitung in Spulen ein inhomogenes Verhalten zeigen. Aufgrund des Transportstroms ist der Bandleiter per se einem Eigenmagnetfeld ausgesetzt. Je nach Verarbeitung und Position des Bandleiters in einer Spule ist das Magnetfeld in Richtung und Stärke nicht gleich. Durch die Abhängigkeit des kritischen Stromes vom Vektor des Magnetfeldes entsteht so eine inhomogene Verteilung des kritischen Stromes.

Der Wert der Inhomogenität eines Bandleiters ist zudem von der Messlänge, über die der kritische Strom bestimmt wird, abhängig, da entlang eines Bandleiters Veränderungen des kritischen Stroms mit unterschiedlicher Länge auftreten. Schwankungen über kleine Bandleiterlängen resultieren aus der unterschiedlichen Stromtragfähigkeit der Kristallite und deren supraleitende Kopplung untereinander. Sie sind gleichmäßig über die Bandleiterlänge verteilt. Bei Schwankungen über kurze Längen wirkt der Bandleiter über große Messlängen als homogen. Schwankungen über große Längen resultieren aus Veränderungen der Herstellungsparameter während der Bandleiterherstellung. Bei derartigen Schwankungen wirkt der Bandleiter über kurze Messlängen homogen.

Als Ergebnis zeigen die untersuchten Bandleitertypen deutliche Unterschiede bei der Bandleiterinhomogenität. In Abb. 3.6 sind für jeden Bandleitertyp die E-I-Kennlinien aller Sektionen zu sehen.

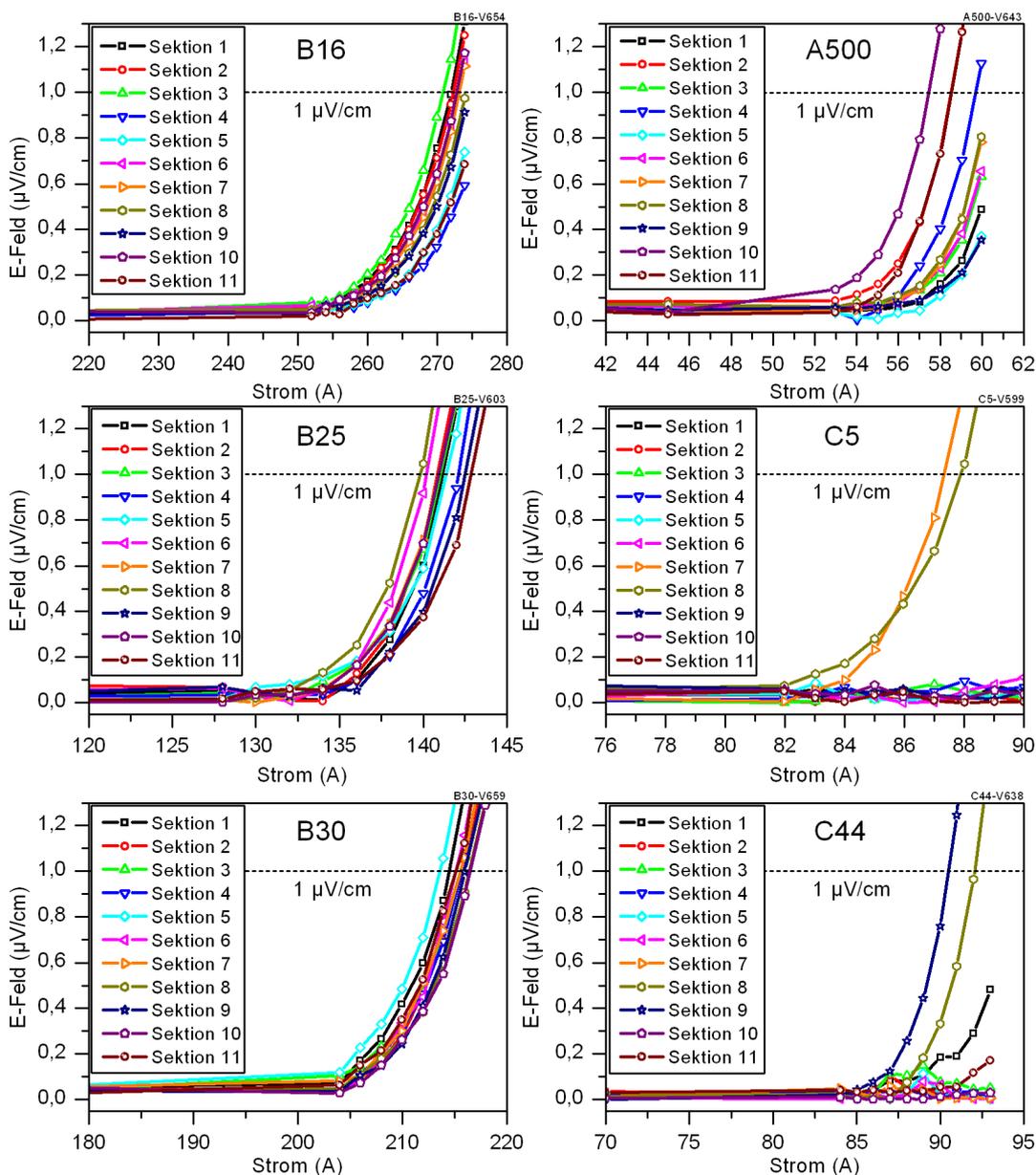


Abb. 3.6: E-I-Kennlinien zur Bestimmung der Inhomogenität der untersuchten Bandleiter – Die Diagramme zeigen die typische sektionsweise Verteilung des E-Feldes für jeden Bandleitertyp. Das kritische E-Feld E_c zur Bestimmung des kritischen Stromes ist als gestrichelte Linie eingetragen.

Jede Probe zeigt einen individuellen Anstieg des E-Feldes in den einzelnen Sektionen, unabhängig von der Position auf dem Bandleiter. Somit kann ein systematischer Einfluss der Probenhalterung oder der Messeinrichtung auf die Ergebnisse bei der Charakterisierung der supraleitenden Größen ausgeschlossen werden. Aufgrund der geringen Bandleiterhomogenität bei den Proben des Bandleitertyps C5 und C44 konnte der Strom nicht soweit erhöht werden, dass in allen Sektionen ein Anstieg des E-Feldes messbar war ohne den Bandleiter zu gefährden. Die Proben des Bandleitertyps B zeigten alle einen gleichmäßigen Anstieg des E-Feldes. Trotz der

geringen Bandleiterhomogenität des Bandleitertyps A konnte aufgrund der guten Stabilisierung der Strom erhöht werden, bis in allen Sektionen ein Anstieg des E-Feldes gemessen werden konnte.

Die Bestimmung der Bandleiterinhomogenität δ aus den kritischen Strömen in den einzelnen Sektionen soll am Beispiel der Bandleiter B25 und C44 aus Abb. 3.6 ausführlich vorgestellt werden. Nach Gl. 3.1 ist der arithmetische Mittelwert des kritischen Stromes \bar{I}_c der dargestellten Messung von Bandleiter B25 141,4 A. Der geringste kritische Strom von 140,1 A wurde in Sektion 8 gemessen und der höchste kritische Strom von 142,9 A in Sektion 11. Nach Gl. 3.2 ist die Bandleiterinhomogenität δ dieser Probe von Bandleiter B25 1,1 %. Der kritische Strom in Proben, bei denen der Strom nicht so weit erhöht werden konnte bis in allen Sektionen ein Spannungsanstieg messbar war, wurde ausgehend vom letzten Messwert mit Gl. 2.1 berechnet. Mit Einbeziehung der berechneten Werte für den kritischen Strom beträgt der arithmetische Mittelwert aller kritischen Ströme, der in Abb. 3.6 dargestellten Messung einer Probe des Bandleiters C44, ca. 97 A mit einer Bandleiterinhomogenität $> 6,4$ %. Bei dem arithmetischen Mittelwert unter Berücksichtigung berechneter kritischer Ströme handelt es sich um eine untere Abschätzung, da die Werte für die kritischen Ströme in den Sektionen ohne messbaren Spannungsanstieg höher liegen können als die berechneten Werte. Der tatsächliche arithmetische Mittelwert kann somit ebenfalls höher liegen als der mit den berechneten Werten bestimmte Mittelwert. Zusammenfassend wird in Tab. 3.3 für alle Bandleiter die, an einer Probe des jeweiligen Bandleiters bestimmte, minimale und maximale Bandleiterinhomogenität δ angegeben.

	A500	B16	B25	B30	C5	C44
Minimale Bandleiterinhomogenität δ (%)	3,1	0,5	2	0,3	$> 7,7$	$> 5,8$
Maximale Bandleiterinhomogenität δ (%)	$> 19,6$	6,2	2,2	0,8	$> 8,6$	> 10

Tab. 3.3: Ergebnisse der experimentell bestimmten Bandleiterinhomogenität – Bei den mit ' $>$ ' gekennzeichneten Werten musste die Messung zur Bestimmung der Bandleiterinhomogenität abgebrochen werden, um den Bandleiter nicht zu beschädigen. Die Bandleiterinhomogenität wurde bei diesen Bandleitern aus dem letzten Messwert berechnet.

3.2.3 Allgemeine physikalische Größen

Alle allgemeinen physikalischen Größen – elektrischer Widerstand, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und mechanische Stabilität – lassen sich bei Kenntnis der verwendeten Werkstoffe und der Geometrie der Schichten für einen Bandleiter mit spezifischen Werten aus der Literatur berechnen. Die spezifischen physikalischen Größen der für die physikalischen Eigenschaften relevanten Werkstoffe eines Bandleiters sind in Anhang A zusammengefasst. Die Pufferschichten können wegen ihrer geringen Schichtdicke für die elektrothermischen Untersuchungen dieser Arbeit vernachlässigt werden [SSWJ08].

Der elektrische temperaturabhängige Widerstand bestimmt grundlegend das Verhalten des Bandleiters und ist neben dem Aufbau eines Widerstandes bei hohen Temperaturen zur Kurzschlussstrombegrenzung für die elektrische Überbrückung von lokalen Defekten der supraleitenden Schicht im supraleitenden Zustand von Bedeutung. Zudem ist der temperaturabhängige Widerstandsbelag ein Indikator für die mittlere Bandleitertemperatur während der Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung. Aus den gemessenen elektrischen Größen kann über den Bandleiterwiderstand die mittlere Bandleitertemperatur bestimmt werden. Der Widerstandsbelag eines Bandleiters kann mit Kenntnis der Breite, Dicke und des spezifischen temperaturabhängigen Widerstandes jeder Schicht, über die Parallelschaltung der Schichten nach Gl. 3.3 berechnet werden.

$$R'(T) = \frac{1}{b} \cdot \frac{1}{\frac{d_S}{\rho_S(T)} + \frac{d_{HTSL}}{\rho_{HTSL}(T)} + \frac{d_D}{\rho_D(T)}} \quad [3.3]$$

Zur Vereinfachung ist für alle Schichten die gleiche Schichtbreite b angenommen. Die Schichtdicke d_S des Substratbandes und die Bandleiterbreite b wurden mit einer Bügelmessschraube gemessen. Die Schichtdicke der supraleitenden Schicht d_{HTSL} und der Silberschicht d_D wurden aus Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops entnommen. Für den temperaturabhängigen spez. Widerstand $\rho(T)$ der supraleitenden Schicht und der Silber-Deckschicht wurden Literaturwerte verwendet [Mat79, ROD05].

Wegen seiner besonderen Bedeutung wurde der temperaturabhängige Widerstandsbelag als einzige charakteristische normalleitende Größe gemessen und mit dem berechneten Widerstandsverlauf auf Übereinstimmung verglichen. Der Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Widerstandsbelag wird am Beispiel des Bandleiters B16 ausführlich vorgestellt. In Abb. 3.7 ist der gemessene temperaturabhängige Widerstandsbelag und dessen Fit-Funktion mit dem berechneten Widerstandsbelag in einem Diagramm dargestellt.

Die Abweichung zwischen der Fit-Funktion des gemessenen Widerstandsbelags und des berechneten Widerstandsbelags ist dabei sehr gering und liegt innerhalb der Messtoleranz der Widerstandsmessung und der Schichtdickemessung. Im Temperaturbereich von 120...250 K war die zeitliche Temperaturänderung im Bandleiter sehr groß und lag über 3 K/min. Die Temperaturänderung im Bereich von 77 K auf ca. 120 K lag typischerweise unter 3 K/min und während der Messung im oberen Temperaturbereich typischerweise weniger als 2 K/min. Zudem ist eine verzögerte Erwärmung des Bandleiters und dessen Stromkontakte aus Kupfer im Vergleich zum Kryostaten mit seiner geringen Kaltmasse im Temperaturbereich von 120...250 K zu erwarten. Daher wurden Messwerte im Temperaturbereich von 120...250 K oder Messwerte, bei denen die Temperaturänderung 3 K/min überschritt für die Bestimmung der Widerstandsfunktion nicht berücksichtigt.

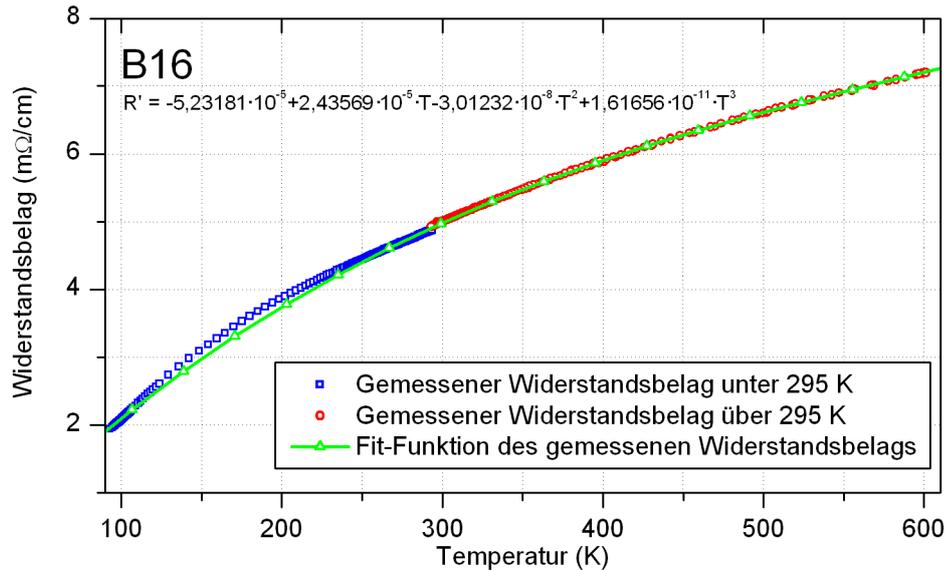


Abb. 3.7: Beispiel eines gemessenen temperaturabhängigen Widerstandsbelags eines Bandleiters mit Fit-Funktion der Messdaten.

Der berechnete Widerstandsbelag aus der Parallelschaltung der einzelnen Bandleiterschichten ist in Abb. 3.8 zum Vergleich mit der Fit-Funktion des gemessenen Widerstandsbelags in einem Diagramm eingetragen. Beide Widerstandsverläufe zeigen eine gute Übereinstimmung. Lediglich bei Temperaturen knapp über dem Übergang in die Normalleitung zeigt der berechnete Widerstandsbelag des Bandleiters eine erkennbare Abweichung von der Fit-Funktion des gemessenen Widerstandsbelags. Die Diskrepanz bei tiefen Temperaturen kann auf eine Abweichung zwischen den verwendeten Literaturwerten und dem tatsächlichen Wert für den temperaturabhängigen spezifischen Widerstand der Deckschicht aus Silber zurückgeführt werden, da der geringe Widerstand der Deckschicht aus Silber den Bandleiterwiderstand bei niedrigen Temperaturen dominiert. Der spezifische Widerstand von HASTELLOY C276 variiert mit den Legierungsbestandteilen und deren genauen Gewichtung.

Um verlässliche Daten für die theoretische Bestimmung des Widerstands aus der Parallelschaltung der einzelnen Schichten nach Gl. 3.3 zu erhalten, wurde zusätzlich der Widerstandsbelag des Substrats gemessen. Hierfür wurde die Deckschicht und die supraleitende Schicht des Bandleiters chemisch entfernt. Aus der Fit-Funktion des gemessenen spezifischen Widerstandsbelags des Bandleiters und der übrigen Schichten wurde der erwartete spezifische Widerstandsbelag der Deckschicht aus Silber nach Gl. 3.3 zurückberechnet und mit dem, aus Literaturwerten [Mat79], berechneten Widerstandsbelag verglichen. Abweichungen zwischen Literaturwerten und dem zurückberechneten spezifischen Widerstand für Silber der Deckschicht liegen innerhalb erklärbarer Grenzen. Reine Metalle wie Silber zeigen einen starken temperaturabhängigen Widerstandsverlauf, der sich über den RRR-Wert (Residual Resistance Ratio) defi-

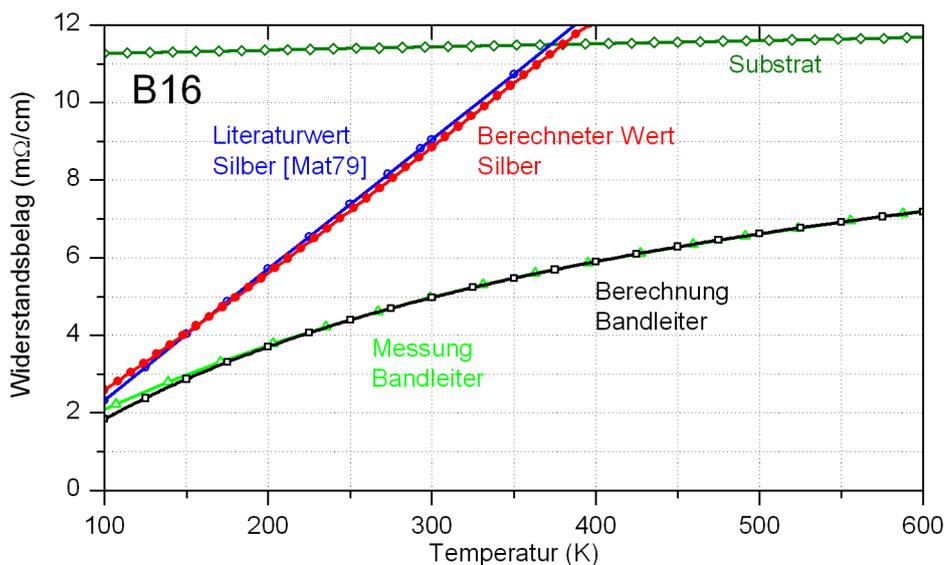


Abb. 3.8: Theoretisch bestimmter temperaturabhängiger Widerstandsbelag – Der temperaturabhängige Widerstandsbelag des Bandleiters ergibt sich durch die Parallelschaltung der einzelnen Schichten des Bandleiters.

niert². Der RRR-Wert ist nach der Matthiesensche Regel [KGL99] ein Indikator für die Anzahl der Defekte im Kristallgitter eines Werkstoffs. In Veröffentlichungen finden sich Widerstands-Temperaturkurven für reines, defektarmes Silber mit einem RRR von mehreren tausend bis zu einstelligen RRR von Silber mit defektem Kristallgitter [Mat79, SF95, RC83, Lin98]. Das Silber der Deckschicht besitzt ein RRR von 30. Es handelt sich somit um ein Silber mit vergleichsweise vielen Defekten. Ein derart geringes RRR ist durch den Auftragsprozess des Silbers auf den Bandleiter und die anschließende Oxidation des Silbers während der Lagerung zu erklären.

In Abb. 3.9 sind die temperaturabhängigen Widerstandsbeläge aller Bandleitertypen im normalleitenden Zustand von 92...600 K zu sehen. Die übrigen normalleitenden Größen sind für die verwendeten Werkstoffe im Anhang A aufgeführt.

Im Wesentlichen bestimmen die Deckschicht aus Silber und das Substrat den temperaturabhängigen Widerstand des Bandleiters. Neben dem absoluten Widerstandsbelag des Bandleiters beeinflusst die Parallelschaltung der normalleitenden Schichten die Änderung des Widerstandsbelags mit der Temperatur. Entscheidend für den temperaturabhängigen Widerstandsverlauf ist der Schnittpunkt des Widerstandsverlaufs, der Deckschicht und des Substrats. In Abb. 3.8 liegt der Schnittpunkt bei ca. 380 K. Die Folge ist ein nichtlinearer Widerstandsverlauf in Abhängigkeit der Temperatur. Mit zunehmender Dicke der Silberschicht sinkt neben dem Widerstandswert die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes der Deckschicht. Durch den hohen Widerstand des Substrats liegt der Schnittpunkt bei Bandleiter B30 oberhalb der Schmelztemperatur von Silber. Die Folge ist ein nahezu linearer Verlauf des Bandleiterwiderstands in Abhängigkeit der Temperatur. Im Vorgriff auf die Ergebnisse der weiteren Kapitel ist für das Begrenzungs-

²RRR = $R_{273K}/R_{4,2K}$ – Quotient aus Restwiderstand bei 273,15K und dem intrinsischen Widerstand bei 4,2K

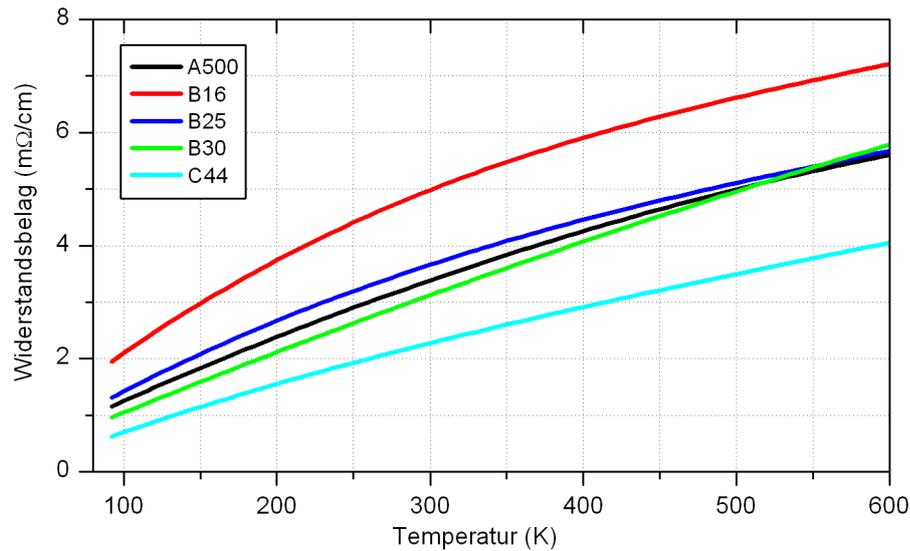


Abb. 3.9: Übersicht der ermittelten temperaturabhängigen Widerstandsbeläge aller untersuchter Bandleitertypen – Dargestellt sind die berechneten Widerstandsbeläge in Abhängigkeit der Temperatur.

verhalten eines Bandleiters grundsätzlich eine im Verhältnis zur Dicke des Substrats möglichst dünne Deckschicht vorteilhaft. Die Gefahr von transienten Überspannungen durch eine starke Stromänderung während des S-N-Überganges zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung mindert ein geringer Widerstand des Bandleiters. Hingegen reduziert ein hoher Widerstand bei hohen Temperaturen im Verlauf der Kurzschlussstrombegrenzung die Stromkräfte im Kurzschlusspfad und die umgesetzte Energie im Bandleiter. Zusammenfassend ist für die Verwendung eines Bandleiters als strombegrenzendes Element in einem resistiven Strombegrenzer bei tiefen Temperaturen ein geringer Bandleiterwiderstand mit einer starken, positiven und nichtlinearen Temperaturabhängigkeit vorteilhaft.

3.3 Zusammenfassung

Die Werte der ermittelten charakteristischen Größen variieren unter den verschiedenen Proben eines Bandleitertyps. Die Ursache dieser Variation von Probe zu Probe bzw. entlang eines Bandleiters ist die gleiche wie für die Inhomogenität der Bandleiter – eine Veränderung von Herstellungsparametern. Die komplexen Herstellungsverfahren für eine Textur und der supraleitenden Schicht selbst führt zu einer inhomogenen Verteilung des kritischen Stromes entlang des Bandleiters.

Trotz der Variation unter den Proben eines Bandleitertyps sind typische charakteristische Eigenschaften für jeden Bandleitertyp festzustellen, die ihn von den übrigen Bandleitertypen unterscheiden. Um die Bandleitertypen miteinander vergleichen zu können, wurde von den Ergebnissen jeder Probe eines Bandleitertyps der Mittelwert gebildet. In Tab. 3.4 sind die erhaltenen

Mittelwerte der charakteristischen supraleitenden Größen aller Bandleitertypen zusammengefasst dargestellt. Der kritische Strom eines Bandleiters ist auf die jeweilige Bandleiterbreite normiert, um den kritischen Strom der unterschiedlichen Bandleiter direkt miteinander vergleichen zu können. Als Einzelergebnis des temperaturabhängigen Widerstandsbelags ist der Wert bei 295 K für jeden Bandleitertyp angegeben.

Der für das Begrenzungsverhalten entscheidende temperaturabhängige Widerstandsbelag eines Bandleiters lässt sich mit der Parallelschaltung der einzelnen normalleitenden Schichten mit Literaturwerten³ für den spezifischen Widerstand und den Schichtgeometrien berechnen. Gleiches gilt für die übrigen allgemeinen charakteristischen Größen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und mechanische Festigkeit. Die Abweichungen der Werte für die allgemeinen charakteristischen Größen entlang des Bandleiters sind praktisch zu vernachlässigen.

Bandleitertyp	A500	B16	B25	B30	C5	C44
Kritischer Strom (A)	58	272	142	215	93	94
Spez. kritischer Strom (A/cm)	138	227	114	179	95	96
n-Wert (-)	29	40	49	41	39	41
Bandleiterinhomogenität (%)	8,2	2,5	1,5	0,6	> 8,1	> 7,9
Widerstandsbelag bei 295 K (mΩ/cm)	3,3	4,9	3,6	3,0	12,1	2,5

Tab. 3.4: Experimentell ermittelte supraleitende charakteristische Größen eines Bandleiters – Die Angaben zum Widerstandsbelag beziehen sich auf 295 K. Die Angaben zu den charakteristischen supraleitenden Größen sind Mittelwerte aus allen Messungen eines Bandleitertyps bei 77 K, nur bei der Bandleiterhomogenität sind die größten Abweichungen angegeben.

³In Anhang A sind die verwendeten Literaturwerte für jeden Werkstoff angegeben.

4 Begrenzungsverhalten von YBCO-Bandleitern

Das Begrenzungsverhalten eines YBCO-Bandleiters wird generell von seinen charakteristischen Größen bestimmt. Während die supraleitenden Größen maßgeblich für das Verhalten während des Übergangs in den normalleitenden Zustand sind, bestimmen die allgemeinen Größen das Begrenzungsverhalten des Bandleiters [SKN07]. Neben den charakteristischen Größen sind für das Begrenzungsverhalten des Bandleiters zudem die Anschlussbedingungen (Energiequelle und äußere Beschaltung) von Bedeutung [SSWJ08].

In diesem Kapitel wird das Begrenzungsverhalten von Bandleitern mit unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Anschlussbedingungen, theoretisch und experimentell, untersucht. Ziel der Untersuchungen ist das Erarbeiten der grundlegenden theoretischen Zusammenhänge zur Erstellung eines physikalischen Bandleitermodells. Mit diesem Modell wird das Begrenzungsverhalten des Bandleiters durch konstruktive und schaltungstechnische Maßnahmen für den Einsatz in supraleitenden resistiven Strombegrenzern optimiert. Zunächst werden die notwendigen, grundlegenden theoretischen Zusammenhänge zur Beschreibung des Begrenzungsverhalten eines Bandleiters vorgestellt. Anschließend werden die erarbeiteten, theoretischen Zusammenhänge mit den experimentell gewonnenen Ergebnissen verglichen und diskutiert. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Vorstellung von ausgewählten Möglichkeiten zur Optimierung des Begrenzungsverhaltens.

Für die folgenden Ausführungen wird von adiabatischen Bedingungen während der Kurzschlussstrombegrenzung ausgegangen. Änderungen der Wärmekapazität und der Dichte aufgrund einer Volumen- oder Druckänderung im Bandleiter werden vernachlässigt [DF96, Fis99, SSWJ08].

4.1 Grundlagen

Das Begrenzungsverhalten eines Bandleiters kann nur unter Berücksichtigung des Zusammenspiels der charakteristischen Eigenschaften mit den Anschlussbedingungen verstanden werden. Die Anschlussbedingungen umfassen die Quellenspannung und den Quelleninnenwiderstand. Die Nachbildung eines Energieversorgungsnetzes mit Induktivitäten und Kapazitäten ist für die Erörterung der allgemeinen, grundlegenden Zusammenhänge in diesem Kapitel nicht erforderlich. Zur Vereinfachung wird für die folgenden grundlegenden Betrachtungen ein rein Ohmsches Netzwerk angenommen, wie im Ersatzschaltbild in Abb. 4.1 dargestellt. Zudem werden für eine bessere Übersichtlichkeit die einzelnen normalleitenden Schichten zu einer Stabilisie-

rungsschicht zusammengefasst. Zusätzliche Widerstände parallel zum Bandleiter werden nicht berücksichtigt¹. Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigen, wie das grundsätzliche Verhalten des Bandleiters vom Widerstandsverhältnis aus Bandleiterwiderstand und Quelleninnenwiderstand beeinflusst wird. Außerdem werden in einem einfachen Modell die Auswirkungen der Bandleiterhomogenität auf das Begrenzungsverhalten von YBCO-Bandleitern beschrieben und mit einem vereinfachten Beispiel verdeutlicht.

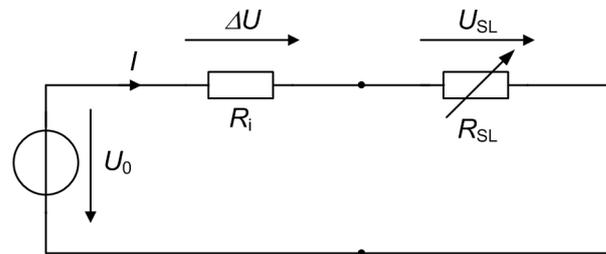


Abb. 4.1: Allgemeines Ersatzschaltbild eines Netzwerks mit einem resistiven Strombegrenzer – Für eine übersichtliche Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge wird auf eine komplexe Darstellung des Netzwerks mit einer Ohmsch-induktiven Quelleninnenimpedanz verzichtet.

Der Quelleninnenwiderstand R_i und der temperaturabhängige normalleitende Gesamtwiderstand eines Bandleiters $R_{SL}(T)$ bilden nach dem Übergang in den normalleitenden Zustand einen Spannungsteiler an einer idealen Spannungsquelle mit der Quellenspannung U_0 . Der unbegrenzte Kurzschlussstrom wird in dem vereinfachten Ersatzschaltbild vom Quelleninnenwiderstand bestimmt, während der begrenzte Kurzschlussstrom von der Summe aus normalleitenden Bandleiterwiderstand und Quelleninnenwiderstand bestimmt wird. Die vom Bandleiter aufgenommene Energie W_{SL} während der Kurzschlussstrombegrenzung im Zeitraum von t_a bis t_A wird von dem Widerstandsverhältnis des Spannungsteilers bestimmt. Allgemein gilt für die in Wärme umgesetzte Energie im Bandleiter:

$$W_{SL} = \int_{t_a}^{t_A} \frac{R_{SL}(T(t))}{(R_{SL}(T(t)) + R_i)^2} \cdot U_0^2 dt \quad [4.1]$$

Die umgesetzte Energie im Bandleiter nach Gl. 4.1 lässt sich mit dem Widerstandsverhältnis x aus Bandleiterwiderstand $R_{SL}(T)$ und Quelleninnenwiderstand R_i ausdrücken zu:

$$W_{SL} = \int_{t_a}^{t_A} \frac{U_0^2}{R_i} \cdot \frac{x}{(x+1)^2} dt \quad [4.2]$$

Das Maximum von Gl. 4.2 liegt bei $x = 1$, woraus sich bei einem gegebenen Quelleninnenwiderstand die maximal umsetzbare Energie im Bandleiter zu

$$W_{SL,max} = \int_{t_a}^{t_A} \frac{U_0^2}{R_i \cdot 4} dt \quad [4.3]$$

¹Der Einfluss eines Parallelwiderstands wird in Kapitel 4.3.2 erörtert.

ergibt. Für die Abhängigkeit der im Bandleiter umgesetzten Energie vom Bandleiterwiderstand und Quelleninnenwiderstand gilt nach Gl. 4.1 an den beiden Extremen $R_{SL} \gg R_i$ und $R_{SL} \ll R_i$ in guter Näherung:

$$\frac{R_{SL}}{(R_{SL} + R_i)^2} \rightarrow \begin{cases} \frac{1}{R_{SL}} & \text{für } R_{SL} \gg R_i \\ \frac{R_{SL}}{R_i^2} & \text{für } R_{SL} \ll R_i \end{cases} \quad [4.4]$$

In Abb. 4.2 ist der allgemeingültige Zusammenhang aus Gl. 4.1 von umgesetzter Energie im Bandleiter W_{SL} und dem Widerstandsverhältnis x schematisch mit dem näherungsweise Verhalten an den Extremen nach 4.4 aufgetragen.

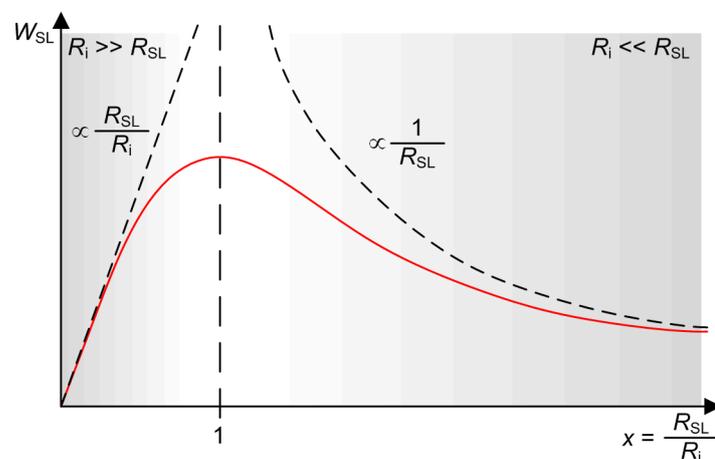


Abb. 4.2: Umgesetzte Energie in Abhängigkeit des Widerstandsverhältnisses – Schematischer Verlauf der im Bandleiter umgesetzten Energie in Abhängigkeit des Verhältnisses von Bandleiterwiderstand und Quelleninnenwiderstand. Die gestrichelten Kurven beschreiben das näherungsweise Verhalten an den beiden extremen Widerstandsverhältnissen $R_{SL} \gg R_i$ und $R_{SL} \ll R_i$.

Die Temperaturerhöhung eines Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung ist unter adiabatischen Bedingungen nur von der umgesetzten Energie (Stromwärme) und den physikalischen Eigenschaften des Bandleiters abhängig. Der Zusammenhang von umgesetzter Energie, physikalischen Eigenschaften und der Temperaturerhöhung im Bandleiter ist durch die Wärmekapazität $C(T)$ in Gl. 4.5 definiert.

$$\Delta W = C(T) \cdot \Delta T \quad [4.5]$$

Die Wärmekapazität $C(T)$ ist die Summe der Wärmekapazitäten aller Schichten des Bandleiters. Mit Einsetzen von Gl. 4.1 in Gl. 4.5 ergibt sich der allgemeine Zusammenhang

$$\Delta T = \int_{t_a}^{t_A} \frac{U_0^2}{C(T(t))} \cdot \frac{R_{SL}(T(t))}{(R_{SL}(T(t)) + R_i)^2} dt \quad [4.6]$$

für die Temperaturerhöhung eines Bandleiters unter adiabatischen Bedingungen während einer Kurzschlussstrombegrenzung. Durch Ersetzen der absoluten Größen in Gl. 4.6 mit den spezifischen Größen $\rho(T)$ (mittlere spez. Widerstand), Γ (mittlere Dichte) und $c(T)$ (mittlerer spez. Wärmekapazität) des Bandleiters und der geometrischen Größen Bandleiterdicke d , -breite b und -länge l erhält man:

$$\Delta T = \int_{t_a}^{t_A} \frac{\rho(T(t)) \cdot U_0^2}{c(T(t)) \cdot \Gamma \cdot (d \cdot b)^2 \cdot \left(\rho(T(t)) \cdot \frac{l}{d \cdot b} + R_i \right)^2} dt \quad [4.7]$$

Durch die geringe Dicke der einzelnen Schichten des Bandleiters kann der Temperaturgradient in c-Richtung (Bandleiternormale) vernachlässigt werden. Ebenso in b-Richtung, da sich ein normalleitender Bereich stets über die gesamte Bandleiterbreite erstreckt. In a-Richtung (entlang des Bandleiters) kann ein Temperaturgradient auftreten durch lokale normalleitende Bereiche aufgrund von Störstellen oder durch einen ungleichmäßigen Übergang in den normalleitenden Bereich nach überschreiten des kritischen Stromes durch einen Kurzschlussstrom im Fehlerfall. Durch die geringe Temperaturleitfähigkeit von YBCO-Bandleitern breitet sich ein lokaler normalleitender Bereich mit nur wenigen cm/s entlang des Bandleiters aus [Sch09b, SSWJ08, PKH06]. Bezogen auf eine zu erwartende maximale Begrenzungszeit eines Strombegrenzers von weniger als 100 ms ist mit einer thermischen Ausbreitung eines normalleitenden Bereiches von wenigen Millimetern zu rechnen. Daher kann die thermische Ausbreitung für die folgenden Betrachtungen vernachlässigt werden, die Temperaturgradienten während der Kurzschlussstrombegrenzung bleiben somit erhalten.

Für die Beschreibung des Begrenzungsverhaltens eines Bandleiters muss das Widerstandsverhältnis x in einem weiten Bereich berücksichtigt werden. Insbesondere bei stark inhomogenen Bandleitern treten während der Kurzschlussstrombegrenzung stark unterschiedliche Widerstandsverhältnisse von sehr gering bis sehr hoch auf. Die beiden Extreme des Widerstandsverhältnisses sind für die Anwendung als Strombegrenzer von besonderer Bedeutung. Das untere Extrem ($R_{SL} \ll R_i$) gilt bei Auftreten von lokalen Fehlstellen in der supraleitenden Schicht, während das obere Extrem ($R_{SL} \gg R_i$) für einen homogenen und hochohmigen Bandleiter während der Strombegrenzung gilt.

4.1.1 Strombegrenzung

Die Aufgabe eines supraleitenden resistiven Strombegrenzers ist es, den Kurzschlussstrom an einer realen Spannungsquelle (unter Berücksichtigung des Quelleninnenwiderstandes) durch das Einbringen eines Widerstandes wirksam zu begrenzen. Um eine übermäßige Erwärmung und damit eine Beschädigung des Bandleiters zu vermeiden, ist der Bandleiterwiderstand wesentlich größer als der Quelleninnenwiderstand ($R_{SL} \gg R_i$ vgl. Kapitel 4.2.3). Bei einem hohen

Bandleiterwiderstand im Vergleich zum Quelleninnenwiderstand kann die Spannung über dem Bandleiter U_{SL} während der Kurzschlussstrombegrenzung in erster Näherung als konstant angenommen werden ($U_{\text{SL}} \approx U_0 \approx \text{konstant}$) [SKN07]. Für die Erwärmung des Bandleiters ergibt sich beim Grenzfall $R_i = 0$ nach Gl. 4.7 die Abhängigkeit der Temperaturerhöhung des Bandleiters an einer konstanten Spannung U_0 zu:

$$\Delta T = \int_{t_a}^{t_A} \frac{U_0^2}{c(T(t)) \cdot \rho(T(t)) \cdot \Gamma \cdot l^2} dt \quad [4.8]$$

Der Temperaturanstieg ΔT des Bandleiters an einer konstanten Spannungsquelle besitzt eine starke Abhängigkeit von der Bandleiterlänge und verringert sich generell mit steigendem spezifischen Widerstand des Bandleiters. Die Dicke d und die Breite b des Bandleiters haben unter den gegebenen Bedingungen ($R_{\text{SL}} \gg R_i$) keinen Einfluss auf die Temperaturerhöhung. Um eine Beschädigung des Bandleiters durch eine zu starke Temperaturerhöhung während der Kurzschlussstrombegrenzung zu vermeiden, muss der Bandleiter deshalb möglichst lang bzw. hochohmig sein und eine hohe absolute Wärmekapazität besitzen.

4.1.2 Fehlstellen

Das andere Extrem eines vergleichsweise geringen Bandleiterwiderstands ($R_{\text{SL}} \ll R_i$) zeigt sich beim Auftreten von Fehlstellen in der supraleitenden Schicht eines Bandleiters. In diesen Fehlstellen ist die supraleitende Schicht durch eine lokale Störung normalleitend und der Strom weicht an der Fehlstelle in die normalleitende Stabilisierung aus [Kom95].

Die räumliche Ausdehnung der eigentlichen Störung in der supraleitenden Schicht, ausgedrückt mit der Länge der Störung entlang des Bandleiters l_S , beträgt wenige Mikrometer [Sch09b, LGFP01, LBB07]. In einem für die Anwendung in einem supraleitenden resistiven Strombegrenzer geeigneten Bandleiter lässt sich die räumliche Ausdehnung der aus der Störstelle resultierenden Fehlstelle über das Verhältnis des spezifischen Übergangswiderstands ρ_{inter} und des spezifischen Widerstandes der Deckschicht ρ_D nach Gl. 4.10 in guter Näherung abschätzen. Der Gesamtwiderstand R_F über der Fehlstelle ist nach Gl. 4.9 die Summe der Übergangswiderstände vor und nach der Störstelle R_{inter} und des Widerstands der Deckschicht bei Übergang R_{interD} und über der Störstelle R_{SD} .

$$R_F = R_{\text{interD}} + R_{\text{inter}} + R_{\text{SD}} = \frac{\rho_D \cdot l_{\text{inter}}}{d_D \cdot b} + \frac{2 \cdot \rho_{\text{inter}}}{l_{\text{inter}} \cdot b} + \frac{\rho_D \cdot l_S}{d_D \cdot b} \quad [4.9]$$

Während der Übergangswiderstand mit steigender Ausdehnung l_F der Fehlstelle abnimmt, steigt der Widerstand der Deckschicht mit der Ausdehnung an. Die anfängliche Ausdehnung $l_{F,a}$ der Fehlstelle stellt sich bei dem kleinstmöglichen Gesamtwiderstand $R_{F,\text{min}}$ über der Fehlstelle ein. Die anfängliche minimale Ausdehnung $l_{F,a}$, bei der die Fehlstelle den geringsten Widerstand aufweist, liegt somit bei der Nullstelle der Ableitungsfunktion $R_F(l)$.

$$l_{F,a} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{inter}}}{\rho_D} \cdot 2 \cdot d_D} + l_S \quad [4.10]$$

Unter Annahme einer typischen Deckschicht aus Silber, mit einer Schichtdicke von $2 \mu\text{m}$ und eines spezifischen Widerstandes von Silber bei 77 K von $2,67 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$ [Mat79] und eines flächenspezifischen Übergangswiderstands ρ_{inter} von $37 \mu\Omega \text{ mm}^2$ [PBL06], ergibt sich nach Gl. 4.10 eine Ausdehnung $l_{F,a}$ von ca. $240 \mu\text{m}$ inklusive der Störstelle selbst. In Abb. 4.3 ist schematisch eine Fehlstelle in einem Bandleiter dargestellt und die abgeschätzte Ausdehnung der Fehlstelle eingetragen.

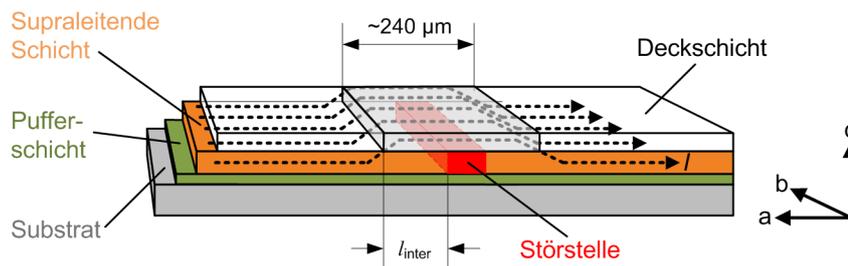


Abb. 4.3: Schematische Darstellung einer Fehlstelle in einem Bandleiter – Mit der Widerstandsverteilung über einer Störstelle lässt sich die räumliche Ausdehnung der Fehlstelle in der Größenordnung von wenigen hundert Mikroohm abschätzen.

Mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. $1 \dots 10 \text{ cm/s}$ [Sch09b, LBR] ist bei einer maximalen Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung von 100 ms mit einer maximalen Ausdehnung der Fehlstelle von $0,1 \dots 1 \text{ cm}$ zu rechnen. Mit steigender Temperatur an der Fehlstelle verteilt sich der Strom um die Fehlstelle auf die normalleitenden Schichten im Bandleiter. Bei einem Widerstandsbelag des Bandleiters von weniger als $7 \text{ m}\Omega/\text{cm}$ (vgl. Kapitel 3.2.3) ergibt sich ein maximaler Widerstand einer Fehlstelle von $7 \text{ m}\Omega$. Die Verlustleistung und der damit verbundene Temperaturanstieg an der Fehlstelle haben für die Kurzschlussstrombegrenzung aufgrund der begrenzten Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung keine besondere Bedeutung.

Unter Einbeziehung des Übergangswiderstands R_{inter} zwischen der supraleitenden Schicht und dem Widerstand der Deckschicht R_D zeigt sich, dass für Bandleiter ohne zusätzliche Stabilisierung z.B. durch eine Kupferschicht und mit einer geringen Dicke der Deckschicht, wie sie für supraleitende resistive Strombegrenzer notwendig sind, eine Fehlstelle thermisch nicht stabil ist. Die räumliche Ausdehnung einer Fehlstelle ist so gering, dass der entstehende Widerstand der Fehlstelle zu keiner signifikanten Strombegrenzung führt. Die Verlustleistung an der Fehlstelle führt ohne ausreichende Stabilisierung zu einem starken Temperaturanstieg und beschädigt den Bandleiter durch einen sog. “Hot-Spot” [PKH06]. Um die Temperaturerhöhung im allgemeinen Fall eines geringen Bandleiterwiderstandes im Vergleich zum Quelleninnenwi-

derstand zu beschreiben, lässt sich mit der vereinfachenden Annahme

$$\left(\rho(T) \cdot \frac{l}{d \cdot b} + R_i \right)^2 \rightarrow R_i^2 \Big|_{R_{SL} \ll R_i} \quad [4.11]$$

Gl. 4.7 umformen zu:

$$\Delta T = \int_{t_a}^{t_A} \frac{I^2 \cdot \rho(T(t))}{c(T(t)) \cdot \Gamma \cdot d \cdot d_D \cdot b^2} dt \quad [4.12]$$

Der Temperaturanstieg ΔT eines Bandleiters an einer Fehlstelle ist unter Vernachlässigung des Übergangswiderstands proportional zum spezifischen Widerstand der Deckschicht und besitzt eine starke Abhängigkeit von der Dicke d , der Breite b und der gesamten Wärmekapazität des Bandleiters. Um eine Beschädigung des Bandleiters durch eine zu starke Temperaturerhöhung an einer Fehlstelle zu vermeiden, muss die Deckschicht zudem möglichst niederohmig sein. Nach Gl. 4.12 kann somit bei gegebener Bandleiterbreite und gegebenem Werkstoff für die Stabilisierung, die Temperaturerhöhung über einer Fehlstelle über die Dicke d_D der Stabilisierung beeinflusst werden. Eine Wärmeabgabe an den flüssigen Stickstoff kann bei einer Fehlstelle in einem hochohmigen Bandleiter ohne zusätzliche Stabilisierung, wie sie für resistive Strombegrenzer notwendig sind, ebenfalls vernachlässigt werden [Sch09b, Fis99].

4.1.3 Bandleiterhomogenität

Bei inhomogenen Bandleitern entspricht die Ausdehnung der normalleitenden Bereiche zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung nicht der gesamten Bandleiterlänge. Beim Anstieg des Kurzschlussstroms gehen zuerst die Segmente des Bandleiters in den normalleitenden Zustand über, deren kritischer Strom am geringsten ist. Anders als bei Fehlstellen kann der Widerstand von wenigen Segmenten des Bandleiters bereits Werte annehmen, die genügen, den Strom signifikant zu begrenzen. Der Widerstand eines Bandleiters zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung wird somit, neben dem temperaturabhängigen Widerstandsbelag, von der Inhomogenität des Bandleiters bestimmt. Durch die ungleiche Verteilung des Widerstandes im Bandleiter besteht die Gefahr der thermischen Überlastung, die zu einer Beschädigung des Bandleiters führt. Um das Verhalten eines Bandleiters mit einer inhomogenen Verteilung des kritischen Stromes an einer realen Spannungsquelle zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung zu beschreiben, soll ein Widerstandsmodell, wie in Abb. 4.4 dargestellt, angenommen werden.

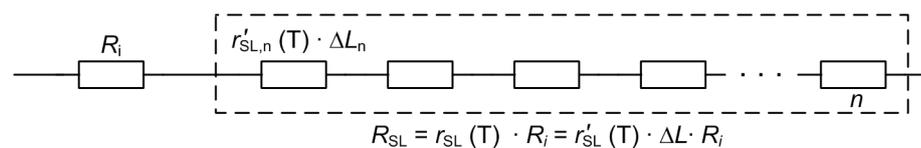


Abb. 4.4: Schematische Darstellung des Widerstandsnetzwerks zur Beschreibung eines inhomogenen Bandleiters an einer realen Spannungsquelle

Der temperaturabhängige Widerstand eines normalleitenden Segments $R_{\text{seg}}(T)$ mit der Länge ΔL bezogen auf den Quelleninnenwiderstand R_i sei der relative, temperaturabhängige Widerstandsbelag $r'_{\text{seg}}(T)$. Wenn die Länge des normalleitenden Segments gleich der Bandleiterlänge ist, kann der Bandleiterwiderstand nur aufgrund einer Erwärmung des Bandleiters weiter ansteigen. Es gilt:

$$\begin{aligned} R_{\text{SL}}(T) &= r_{\text{SL}}(T) \cdot R_i; \\ R_{\text{SL}}(T) &= r'_{\text{seg}}(T) \cdot \Delta L \cdot R_i; \end{aligned} \quad [4.13]$$

Die umgesetzte Energie im gesamten Bandleiter ergibt sich nach Einsetzen der Definitionen aus 4.13 in Gl. 4.1 zu

$$W_{\text{SL}} = \int_{t_a}^{t_A} \frac{U_0^2}{R_i} \cdot \frac{r'_{\text{seg}}(T(t)) \cdot \Delta L}{\left(r'_{\text{seg}}(T(t)) \cdot \Delta L + 1\right)^2} dt \quad [4.14]$$

bei gleichmäßiger Erwärmung des normalleitenden Segments.

Das Begrenzungsverhalten eines stark inhomogenen Bandleiters lässt sich aus dem allgemeinen Verlauf der umgesetzten Energie in dem Bandleiter nach Gl. 4.14 ableiten. In einem stark inhomogenen Bandleiter ändert sich die umgesetzte Energie bei einem gegebenem Quelleninnenwiderstand durch den steigenden Widerstandsaufbau von normalleitender Segmenten in Abhängigkeit deren Ausdehnung entlang des Bandleiters und der Temperatur mit dem Temperaturgradienten innerhalb der normalleitenden Segmenten. Die maximale Verlustleistung eines normalleitenden Bandleiters wird nach Gl. 4.3 bei gegebener Quellenspannung nur vom Quelleninnenwiderstand bestimmt und liegt nach Gl. 4.2 stets bei einem Widerstandsverhältnis von $x = 1$ ($R_i = R_{\text{SL}}(T)$). In Abb. 4.5 ist der Verlauf der Verlustleistung eines normalleitenden Bandleiters mit dem relativen Widerstandsbelag $r'_{\text{seg}}(T)$ an einer Gleichspannungsquelle für unterschiedliche Quelleninnenwiderstände in Abhängigkeit des prozentualen Anteils an der Bandleiterlänge dargestellt. Deutlich wird der Einfluss des Quelleninnenwiderstandes auf die zur Verfügung stehende, absolute Verlustleistung des Bandleiters $P_{\text{v,SL}}$.

Um bei Segmenten, die durch Überschreiten des kritischen Stromes widerstandsbehaftet sind, an einer Wechselspannungsquelle, also auch während eines Stromnulldurchganges, den normalleitenden Zustand dauerhaft zu etablieren, muss die umgesetzte Energie in diesem Segment ausreichen, um die Temperatur des Segments über die kritische Temperatur T_c zu erhöhen. Wird T_c nicht überschritten, geht das Segment im nächsten Stromnulldurchgang wieder in den widerstandsfreien Zustand über, ohne den normalleitenden Zustand erreicht zu haben [EBW01]. Allgemein steht den widerstandsbehafteten Segmenten nach Gl. 4.1 entsprechend den Anschlussbedingungen eine bestimmte maximale Verlustleistung zur Verfügung, um diese über die Zeit zu erwärmen. In einem stark inhomogenen Bandleiter wächst, bei steigendem Strom, die An-

zahl der widerstandsbehafteten Segmente und deren Ausdehnung so lange, bis der Bandleiter über seiner vollständigen Länge widerstandsbehaftet ist.

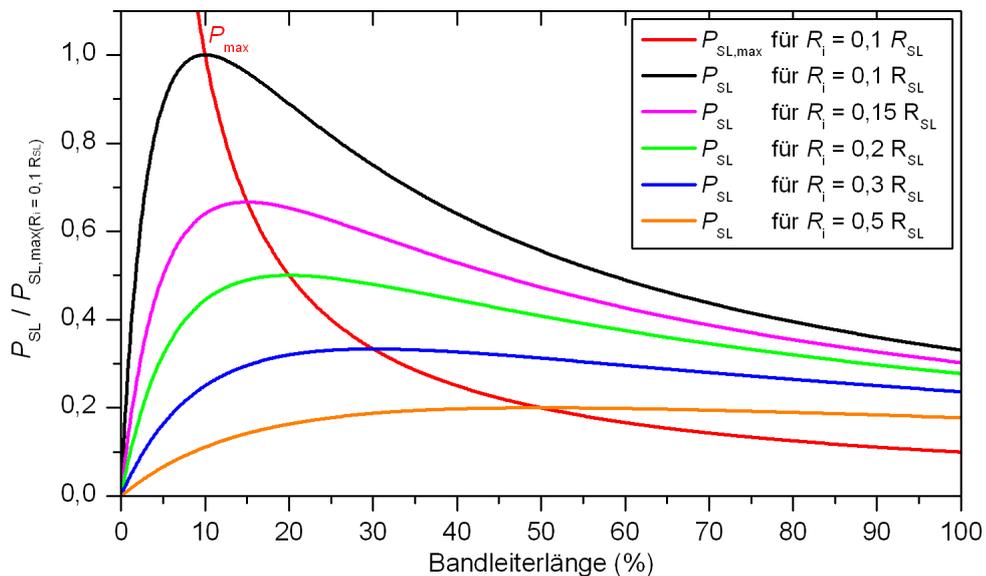


Abb. 4.5: Verlauf der absoluten Verlustleistung P_{SL} eines Bandleiters an unterschiedlichen Quelleninnenwiderständen bei einer fixen Temperatur T – Das Maximum der Verlustleistung liegt stets bei $R_{SL}(T) = R_i$.

An einem geringen Quelleninnenwiderstand steigt die absolute Verlustleistung des Bandleiters mit der Anzahl der normalleitenden Segmente bis zum Maximum beim Widerstandsverhältnis $x = 1$ an (vgl. Abb. 4.5). Danach nimmt die absolute Verlustleistung im Bandleiter mit steigendem Bandleiterwiderstand, respektive mit steigender Länge der normalleitenden Segmente, wieder ab. Die Verlustleistung, die einem Segment zur Verfügung steht, ist von seinem eigenen Widerstandswert, dem Gesamtwiderstand weiterer widerstandsbehafteter Segmente und vom Wert des Quelleninnenwiderstandes abhängig.

Die Bedeutung der Bandleiterhomogenität für die Widerstandsverteilung in einem normalleitenden Bandleiter soll an zwei Beispielen mit unterschiedlichen Quelleninnenwiderständen erörtert werden. In Abb. 4.6a ist der Verlauf der Verlustleistung in Abhängigkeit der Länge widerstandsbehafteter Segmente in Prozent der gesamten Bandleiterlänge für einen inhomogenen Bandleiter an einem geringen Quelleninnenwiderstand als absolute Verlustleistung des Bandleiters $P_{V,SL}$ eingetragen. Die längenspezifische Verlustleistung $p_{V,seg}$ wachsender Segmente ist ohne Berücksichtigung einer Bandleitererwärmung in einer weiteren Kennlinie eingetragen. Bei zu großen Unterschieden bei der verfügbaren Verlustleistung und starker Inhomogenität des kritischen Stromes in den Segmenten kann die zur Verfügung stehende längenspezifische Verlustleistung für die Segmente mit dem höchsten kritischen Strom zu gering sein, um den normalleitenden Zustand vor dem nächsten Stromnulldurchgang dauerhaft zu etablieren. Steigt im Beispiel von Abb. 4.6a die Gesamtlänge widerstandsbehafteter Segmente von 10 % auf 20 % der gesamten Bandleiterlänge an, sinkt die zur Verfügung stehende längenspezifische Verlust-

leistung um ca. 0,4 %. Die Abnahme der längenspezifischen Verlustleistung verstärkt sich mit steigender Temperatur bei fortschreitender Zeit durch den temperaturabhängigen Widerstandsanstieg in den bereits etablierten normalleitenden Segmenten.

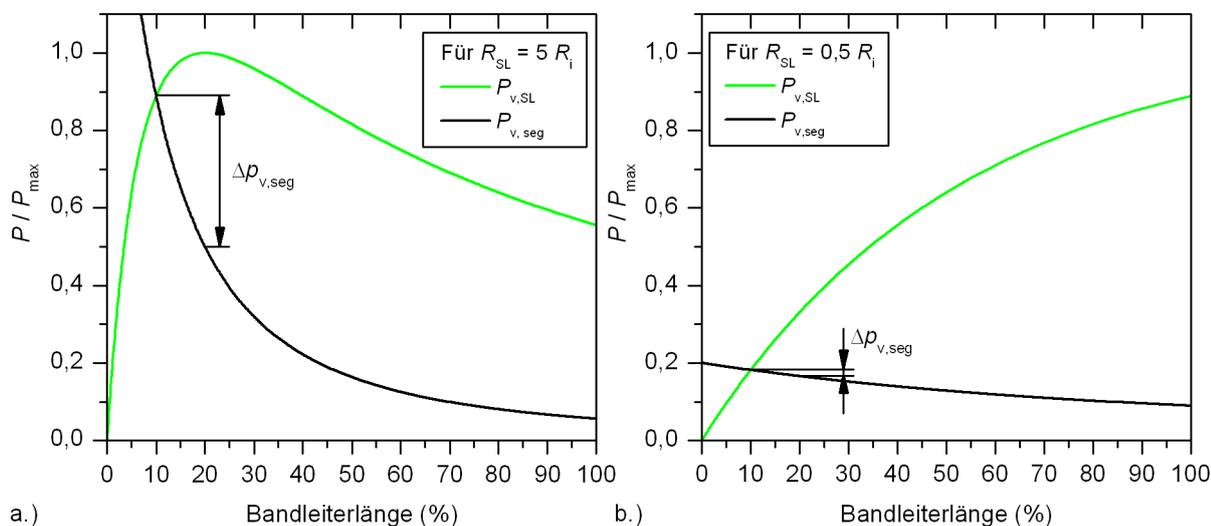


Abb. 4.6: Leistungsverteilung eines stark inhomogenen Bandleiters nach dem Übergang in den normalleitenden Zustand – a.) Ist der absolute Bandleiterwiderstand hoch im Vergleich zum Quelleninnenwiderstand ($R_{SL}(T) > R_i$), nimmt die Verlustleistung mit steigender Größe des normalleitenden Segments stark ab. b.) Bei einem vergleichsweise hohen Quelleninnenwiderstand ($R_{SL}(T) < R_i$) bleibt die Verlustleistung für das wachsende normalleitende Segment vergleichsweise konstant, wenn auch auf niedrigem Niveau.

In Abb. 4.6b ist der Verlauf der absoluten Verlustleistung $P_{v,SL}$ eines inhomogenen Bandleiters und der längenspezifischen Verlustleistung an einem hohen Quelleninnenwiderstand dargestellt. Im Gegensatz zu einem inhomogenen Bandleiter an einem geringen Quelleninnenwiderstand steigt die Verlustleistung eines Bandleiters an einem hohen Quelleninnenwiderstand mit Wachsen der widerstandsbehafteten Segmente kontinuierlich an, bis der gesamte Bandleiter widerstandsbehaftet ist. Mit dem Anstieg der absoluten Verlustleistung des Bandleiters $P_{v,SL}$ nimmt die, für die größer werdenden widerstandsbehafteten Segmente zur Verfügung stehende längenspezifische Verlustleistung $p_{v,seg}$ nur geringfügig ab. So reduziert sich im Beispiel von Abb. 4.6b die zur Verfügung stehende längenspezifischen Verlustleistung um ca. 0,02 % bei einer Änderung der widerstandsbehafteten Bandleiterlänge von 10 % auf 20 %. Die längenspezifische Verlustleistung bei einer steigenden Anzahl und Ausdehnung widerstandsbehafteter Segmente bleibt somit verhältnismäßig konstant und vermindert dadurch die ungleichmäßige Erwärmung widerstandsbehafteter oder normalleitender Segmente. Dadurch wird das Begrenzungsverhalten des Bandleiters im normalleitenden Zustand homogener und die Gefahr einer thermischen Überlastung der zuerst normalleitenden Segmente nimmt ab.

Die theoretischen Untersuchungen zur Bandleiterinhomogenität zeigen, wie inhomogene Bandleiter mit einer niederohmigen Stabilisierung vor einer lokalen thermischen Überlastung

geschützt werden können. In dem, nicht mit einem Beispiel vorgestellten, Fall eines sehr hohen Bandleiterwiderstandes ist der Bandleiter ebenfalls gering thermisch belastet. Der höchsten lokalen thermischen Belastung sind inhomogene Bandleiter bei einem, im Vergleich zum Bandleiterwiderstand hohen Wert des Quelleninnenwiderstandes ausgesetzt.

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Um den Einfluss der Bandleiterstabilisierung und der Bandleiterinhomogenität auf das Begrenzungsverhalten eines Bandleiters experimentell zu untersuchen, wurden Bandleiter mit unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften und Geometrie bei gleicher Quellenspannung, gleicher Länge und bei gleichem Kurzschlussstromverhältnis² k_p getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Zudem dienen die experimentellen Ergebnisse zur Überprüfung des theoretischen Bandleitermodells zur Optimierung des Begrenzungsverhaltens in Kapitel 4.3.

Beim Begrenzungsverhalten eines Bandleiters kann zwischen dem nach außen wirksamen Verhalten (Gesamtwiderstandsverhalten) und der Wirkung des Bandleiters auf sich selbst (innere Widerstandsverteilung) unterschieden werden. Das Gesamtwiderstandsverhalten beschreibt die Wirkung des gesamten Bandleiterwiderstandes auf das angeschlossene Netzwerk während der Kurzschlussstrombegrenzung. Die innere Widerstandsverteilung entlang des Bandleiters während und nach dem Übergang in den normalleitenden Zustand hat, wie in Kapitel 4.1.3 bereits beschrieben, entscheidenden Einfluss auf das Erwärmungsverhalten des Bandleiters während der gesamten Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung. Die für die Beschreibung des Begrenzungsverhaltens nötigen elektrischen Größen und Verhältnisse sind in Abb. 5.3 definiert.

4.2.1 Messeinrichtungen und Probenhalterungen

Das Begrenzungsverhalten von Bandleitern wurde an Wechselspannungsquellen mit einer Frequenz mit 50 Hz untersucht. Als Wechselspannungsquelle für die Untersuchung des Einflusses der Bandleiterstabilisierung und des prospektiven Kurzschlussstroms wurde ein Einphasentransformator mit einer Sekundärspannung von 7,7 V eingesetzt. Zur Bestimmung der Leistungsgrenzen von Kurzproben und für Bandleiterproben mit einer Länge von mehr als 11 cm diente ein Einphasentransformator mit einer stufenweise verstellbaren Sekundärspannung von 29...1000 V. Primärseitig waren beide Transformatoren an den 400 V Niederspannungsanschlüssen eines 20 kV/1,6 MVA Netztransformators angeschlossen. Alle Untersuchungen fanden, wie bei der Bandleitercharakterisierung, bei ca. 77 K in siedendem Stickstoff bei normalem Umgebungsdruck statt.

Der zu untersuchende Bandleiter wurde über einen verstellbaren, rein Ohmschen Vorwiderstand R_V mit der Wechselspannungsquelle verbunden. Als Schaltelement zum Zu- und Abschalt-

²Verhältnis aus Stoßkurzschlussstrom und Nennstrom, vgl. Abb. 5.3

ten des Kurzschlusses diente ein Thyristorschalter mit zwei antiparallelgeschalteten Thyristoren. Die Dauer des Kurzschlussstromes konnte über eine Steuereinrichtung als Vielfaches einer Halbwelle (10 ms bei 50 Hz) vorgegeben werden, während die Amplitude des prospektiven Kurzschlussstroms i_p im elektrischen Kreis über den Vorwiderstand R_v eingestellt wurde. Das Ersatzschaltbild der Versuchsanordnung zur Untersuchung des Begrenzungsverhaltens ist in Abb. 4.7 zu sehen.

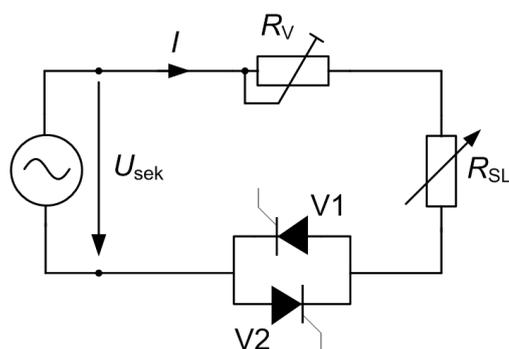


Abb. 4.7: Ersatzschaltbild der Versuchsanordnung zur Untersuchung des Begrenzungsverhaltens.

Der Strom und die Spannungen in der Versuchsanordnung und an der Bandleiterprobe wurden mit einem Mehrkanal-Transientenrekorder aufgezeichnet. Die Triggerung des Thyristorschalters und des Transientenrekorders erfolgte synchronisiert über ein Signal. Zum Schutz vor Überspannung wurde der Transientenrekorder über differentielle Spannungsmessproben vom Testkreis isoliert. Für die vergleichsweise geringen Spannungen während der Untersuchung an der 7,7 V Spannungsquelle wurden differentielle Spannungsmessproben mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1, im Spannungsbereich von 29...200 V mit einem Übersetzungsverhältnis von 50:1 und bei Spannungen über 200 V mit einem Übersetzungsverhältnis von 500:1 verwendet. Der Kurzschlussstrom wurde während den Untersuchungen an Kurzproben mit einem Pearson™ Current Monitor und bei den Untersuchungen an den 1-m-Proben mit Rogowski-Spulen gemessen.

Das Begrenzungsverhalten von Kurzproben aller Bandleitertypen wurde in der gleichen Probenhalterung untersucht, die bereits zur Bestimmung der charakteristischen Größen diente (vgl. Kapitel 3.1.1). Für die Untersuchungen an einzelnen 1-m-Proben wurde eine Probenhalterung nach dem Vorbild der Probenhalterung für Kurzproben verwendet. Um das Begrenzungsverhalten von parallel geschalteten 1-m-Proben zu untersuchen, wurde eine weitere Probenhalterung konstruiert, die es erlaubte, den Strom in jedem parallelgeschalteten Bandleiter separat zu messen. Die Anschlüsse aller Probenhalterungen sind so konstruiert, dass die charakteristischen Größen des Bandleiters und das Begrenzungsverhalten untersucht werden konnten, ohne den Bandleiter aus dem Stickstoffbad zu entnehmen oder die Probenhalterung wechseln zu müssen. Für die Untersuchung an den 1-m-Proben wurden aus Edelstahldraht gefertigte Klammern

als Spannungskontakte verwendet und im Abstand von 20 cm mittig auf der Deckschicht des Bandleiters angebracht. Die Klammern waren so geformt, dass zwei Klammern an der gleichen Position angebracht werden konnten, um die Spannung an parallelgeschalteten Bandleitern zu messen. Durch das Festklemmen der Spannungskontakte wurde keine Zugbelastung auf den Bandleiter ausgeübt.

Die charakteristischen Größen eines Bandleiters wurden vor und nach der Untersuchung des Begrenzungsverhaltens bestimmt und miteinander verglichen, um eine Beschädigung des Bandleiters festzustellen. Die Methode zur Bestimmung einer Beschädigung des Bandleiters war die selbe, wie sie zur Bestimmung der charakteristischen supraleitenden Größen (vgl. Kapitel 3.1.1) über die Veränderung des kritischen Stromes vor und nach einer Kurzschlussstrombegrenzung angewendet wurde. Da sich mit den größeren Messlängen bei den 1-m-Proben die Unsicherheit bei der Bestimmung des kritischen Stromes im Vergleich zur Unsicherheit bei der Bestimmung des kritischen Stromes an Kurzproben verringert, wird sie in den folgenden Ausführungen ebenfalls nicht weiter berücksichtigt.

4.2.2 Stabilisierung und Bandleiterhomogenität

Das Begrenzungsverhalten der Bandleitertypen wurde bei unterschiedlichen Kurzschlussstromverhältnissen k_p untersucht und miteinander verglichen. In Abb. 4.8 ist das Begrenzungsverhalten ausgewählter Bandleiter mit unterschiedlichen Stabilisierungen bei unterschiedlichen Kurzschlussstromverhältnissen im Vergleich zu sehen. Für eine bessere Darstellung sind die Skalen der E-Felder invertiert aufgetragen. Zum Vergleich mit den hochohmigen Bandleitern wurde ein, mit zusätzlich aufgelöteten Kupferbändern stabilisierter und damit sehr niederohmiger Bandleiter A1300 in die Untersuchung aufgenommen.

Entsprechend dem Ohmschen Gesetz wird, nach dem Übergang in die Normalleitung, der Kurzschlussstrom von der Reihenschaltung aus Quelleninnenwiderstand und Bandleiterwiderstand bestimmt. Bei einem geringen Kurzschlussstromverhältnis von 2,8, respektive einem hohen Quelleninnenwiderstand, zeigen alle Bandleiter nur eine geringe Begrenzungswirkung (Abb. 4.8 oben). Die Begrenzungswirkung der Bandleiter steigt bei sinkendem Quelleninnenwiderstand und dem damit verbundenen steigenden Kurzschlussstromverhältnis an. Bei einem Kurzschlussstromverhältnis von 5,6 zeigen die hochohmigen Bandleiter B25 und C5 bereits eine signifikante Begrenzungswirkung, die den Stoßkurzschlussstrom auf die Hälfte des unbegrenzten Stoßkurzschlussstroms i_p reduziert. Bei einem Kurzschlussstromverhältnis von 11,3 zeigen alle Bandleiter eine signifikante Begrenzungswirkung, mit Ausnahme des sehr niederohmigen Bandleiters A1300. Selbst bei einem hohen Kurzschlussstromverhältnis und dem damit verbundenen geringen Quelleninnenwiderstand ist eine wirksame Begrenzung mit diesem hochstabilisierten, niederohmigen Bandleiter bei einer vergleichbaren Bandleiterlänge nicht zu erreichen.

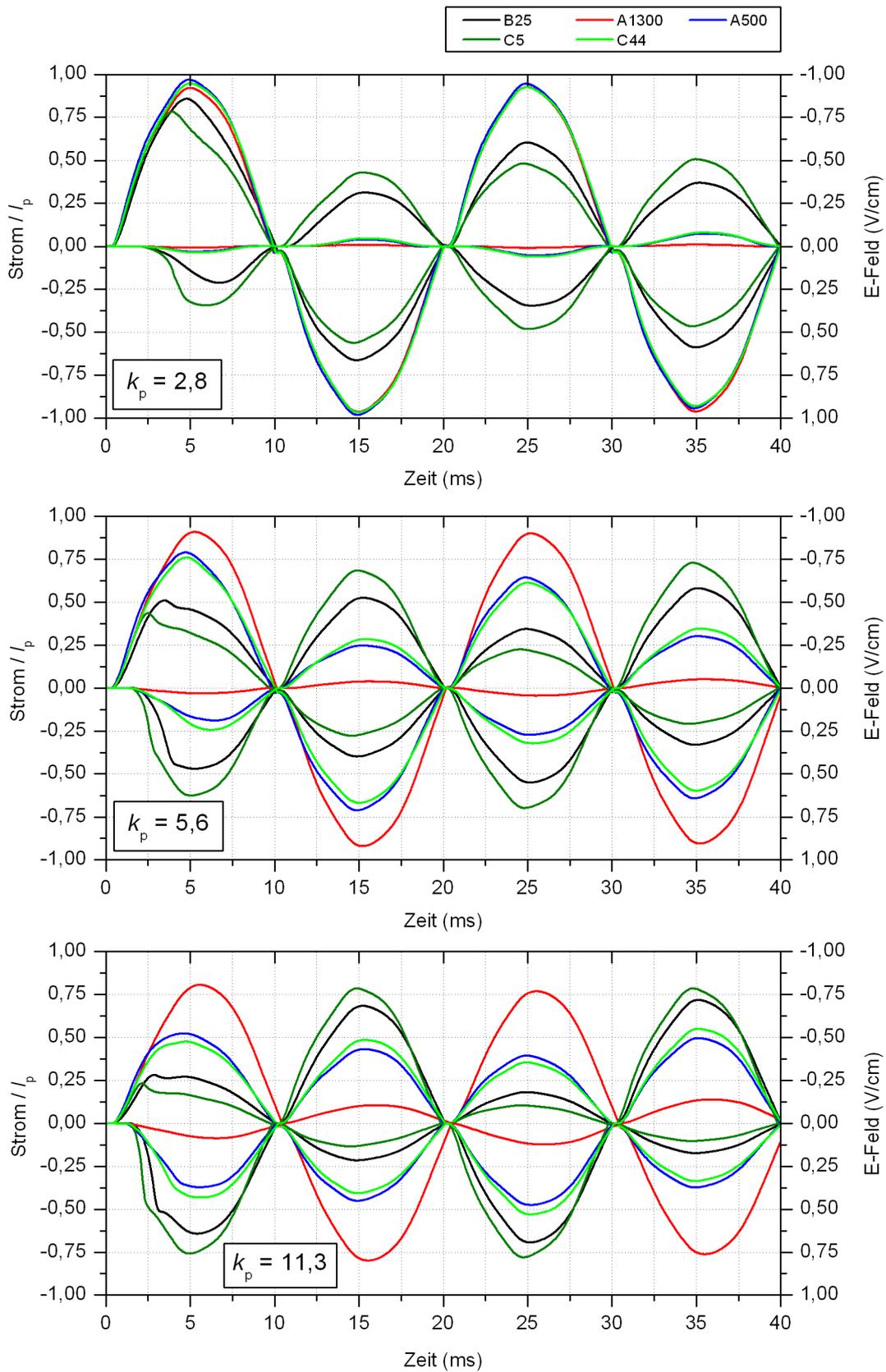


Abb. 4.8: Begrenzungsverhalten von Kurzproben bei unterschiedlichen Anschlussbedingungen – Um die Begrenzungswirkung zu verdeutlichen, ist der begrenzte Kurzschlussstrom auf den unbegrenzten Stoßkurzschlussstrom i_p normiert.

Ausgehend von der nach außen wirksamen Begrenzung ist nur bedingt eine Aussage über die innere Widerstandsverteilung des Bandleiters zu treffen. Während das äußere Begrenzungsverhalten vom Gesamtwiderstand des Bandleiters bestimmt wird, wird nach den Ausführungen in Kapitel 4.1.3 die innere Widerstandsverteilung von dem Zusammenspiel aus der Bandleiterhomogenität, des Widerstandsbelags und den Anschlussbedingungen bestimmt. Bei einem inhomogenen Bandleiter kann der Gesamtwiderstand aufgrund der stärkeren Erwärmung weniger Segmente, die sich im normalleitenden Zustand befinden, den gleichen Wert annehmen, wie bei einem homogenen Bandleiter, bei dem alle Segmente, allerdings bei einer geringeren Temperatur, im normalleitenden Zustand sind.

Ebenso wie bei dem nach außen wirksamen Begrenzungsverhalten wurde das innere Begrenzungsverhalten bzw. der Einfluss der Bandleiterinhomogenität und der Bandleiterstabilisierung auf das innere Begrenzungsverhalten bei unterschiedlichen Kurzschlussstromverhältnissen untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden stellvertretend an den Ergebnissen der Bandleiter C5, C44 und B25 vorgestellt und diskutiert. Die Bandleiter C5 und C44 besitzen eine ähnliche hohe Bandleiterinhomogenität bei stark unterschiedlich dicker Stabilisierung, während es sich bei Bandleiter B25 um einen vergleichsweise homogenen Bandleiter handelt (vgl. Tab. 3.3).

Abb. 4.9 zeigt das Begrenzungsverhalten und die innere Widerstandsverteilung des stark inhomogenen Bandleiters C44. Durch den geringen Widerstandsbelag ist die Begrenzungswirkung und die Verlustleistung der zuerst normalleitenden Sektionen verhältnismäßig gering. Das Widerstandsverhältnis x aus Bandleiterwiderstand und Quelleninnenwiderstand betrug bei allen untersuchten Kurzschlussstromverhältnissen in der ersten Halbwelle weniger als 0,03 und stieg trotz der Bandleitererwärmung während der Kurzschlussstrombegrenzung nicht über 0,5. Die damit verbundene gleichmäßige Verteilung der Verlustleistung (vgl. Abb. 4.6b) führte zu einer vergleichsweise gleichmäßigen Temperaturverteilung im gesamten Bandleiter. In Abb. 4.9a ist zu sehen, dass trotz der geringen Bandleiterhomogenität bereits in der ersten Halbwelle alle Sektionen zum Widerstandsaufbau beitragen. Die resultierende innere Widerstandsverteilung des Bandleiters C44 ist durch die gleichmäßige Verteilung der Verlustleistung vergleichsweise homogen. Allerdings ist unter diesen Anschlussbedingungen die Verlustleistung für alle Sektionen zu gering, um durch eine Temperaturerhöhung den normalleitenden Zustand dauerhaft zu etablieren. Bei den folgenden Nulldurchgängen des Stromes werden alle Sektionen wieder supraleitend, bis sie bei erneutem Überschreiten des kritischen Stromes beim nächsten Stromanstieg wieder einen Widerstand aufbauen.

Bei einem Kurzschlussstromverhältnis von $k_p = 11,3$ zeigt der Bandleiter eine praktisch homogene innere Widerstandsverteilung, begünstigt durch den schnellen Stromanstieg und das weiterhin geringe Widerstandsverhältnis x . Die Sektionen erwärmen sich nahezu gleichmäßig und die umgesetzte Energie ist bereits in der ersten Halbwelle ausreichend, um in allen Sektio-

nen die kritische Temperatur zu überschreiten und den normalleitenden Zustand dauerhaft zu etablieren.

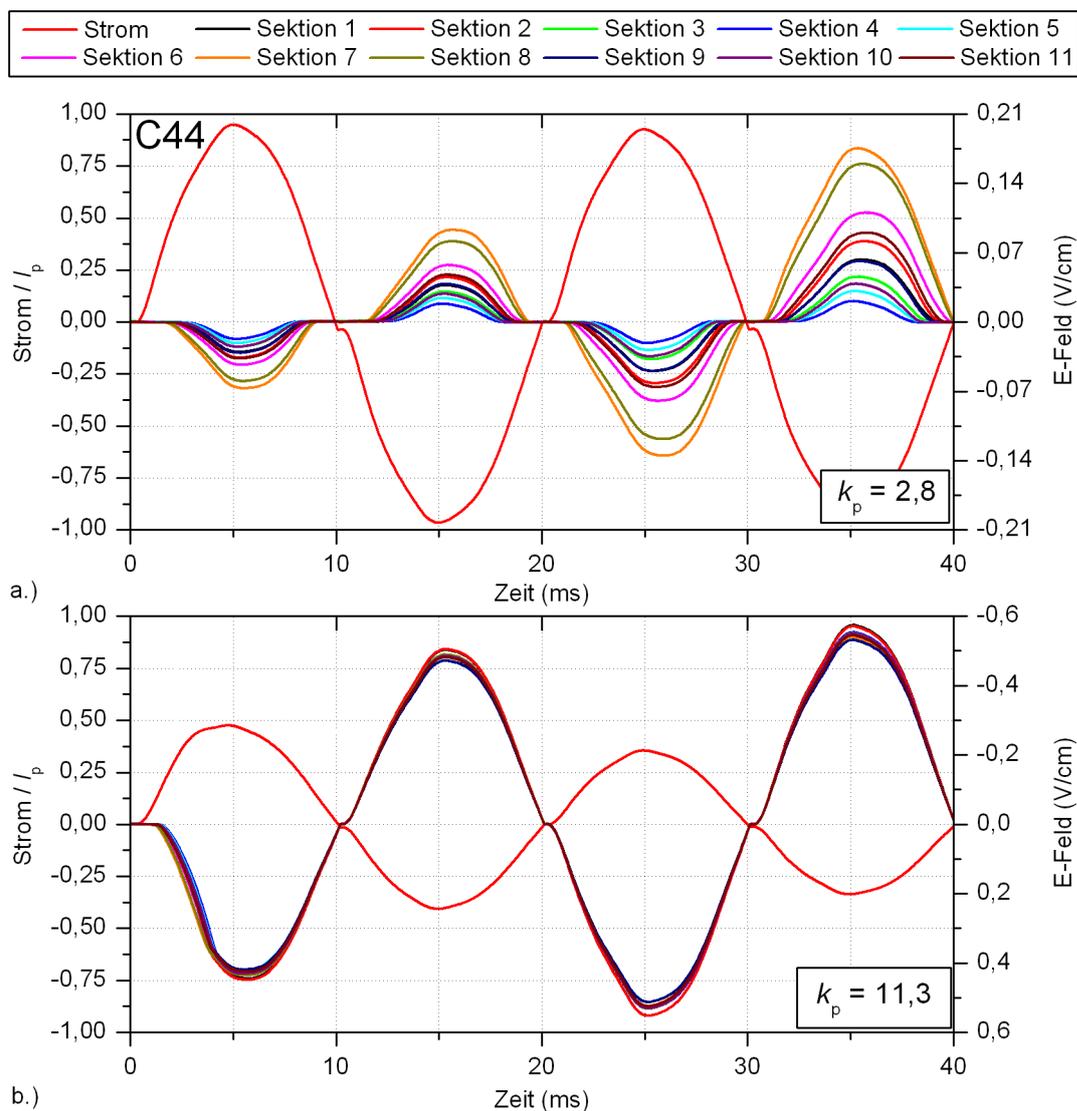


Abb. 4.9: Begrenzungsverhalten des Bandleiters C44 bei einem Kurzschlussstromverhältnis von 2,8 und 11,3

Das Begrenzungsverhalten von Bandleiter C5 zeigt trotz einer, im Vergleich zum Bandleiter C44 ähnlich starken Inhomogenität, eine andere innere Widerstandsverteilung. Aufgrund des größeren normalleitenden Bandleiterwiderstandes ist das Widerstandsverhältnis x bei allen Kurzschlussstromverhältnissen höher als bei Bandleiter C44. In Abb. 4.10a ist die innere Widerstandsverteilung des stark inhomogenen Bandleiters C5 bei einem geringen Kurzschlussstromverhältnis von $k_p = 2,8$ zu sehen. Obwohl nur knapp die Hälfte der Sektionen einen signifikanten Widerstandsaufbau vorweisen, liegt das Widerstandsverhältnis bereits in der ersten Halbwelle bei ca. 0,5. Durch den hohen Widerstandsbelag sind bei den gegebenen Anschlussbedingungen der Widerstandsaufbau und die damit verbundene Verlustleistung P_v der ersten

normalleitenden Sektionen 3, 4, 9 und 10 ausreichend, um diese so weit zu erwärmen, dass sich der normalleitende Zustand dauerhaft etabliert. Für die übrigen Sektionen ist die zur Verfügung stehende Verlustleistung zu gering, um den normalleitenden Zustand durch Überschreiten von T_c dauerhaft zu etablieren.

Abb. 4.10b zeigt einen Ausschnitt um die Null-Linie des E-Feldes von Abb. 4.10a. In der gespreizten Darstellung ist zu erkennen, dass alle Sektionen während der ersten Stromhalbwelle einen Widerstand aufbauen, ohne jedoch die kritische Temperatur zu übersteigen. Mit sinkendem Strom vor dem ersten Stromnulldurchgang fallen wieder mehr als die Hälfte der Sektionen in den supraleitenden Zustand ohne messbaren Widerstand zurück.

Trotz des schnellen Stromanstiegs bei einem hohen Kurzschlussstromverhältnis von $k_p = 11,3$ in Abb. 4.10c gehen die Sektionen entsprechend ihrem kritischen Strom nacheinander in den normalleitenden Zustand über und erwärmen sich ungleichmäßig. Durch die gestiegene allgemeine maximale Verlustleistung des Bandleiters übersteigt die Bandleitertemperatur in mehreren Sektionen selbst bei einem geringeren Kurzschlussstromverhältnis zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung die kritische Temperatur und etabliert den normalleitenden Zustand. Durch die gestiegene maximale absolute Verlustleistung $P_{SL,max}$ und die gestiegene Anzahl an dauerhaft etablierten normalleitenden Sektionen kommt es zu einer gleichmäßigeren und damit für einen inhomogenen Bandleiter günstigeren Verteilung der Verlustleistung auf die Sektionen (vgl. Abb. 4.6a). Als Folge der günstigeren Verteilung überschreiten alle Sektionen in der zweiten Halbwelle die kritische Temperatur und etablieren dauerhaft den normalleitenden Zustand.

Bandleiter B25 kommt im Vergleich zu den Bandleitern C5 und C44 durch seine geringe Inhomogenität einem idealen Bandleiter als strombegrenzendes Element in einen supraleitenden resistiven Strombegrenzer am nächsten. Selbst bei einem geringen Kurzschlussstromverhältnis von $k_p = 2,8$ zeigt der Bandleiter in allen Sektionen einen vergleichsweise gleichmäßigen Übergang in den normalleitenden Zustand. Durch die gleichmäßige Erwärmung der einzelnen Sektionen etabliert sich in allen Sektionen der normalleitende Zustand entsprechend gleichzeitig nach der zweiten Halbwelle durch Überschreiten der kritischen Temperatur. Bei einem Kurzschlussstromverhältnis von $k_p = 11,3$ ist der Übergang in den normalleitenden Zustand in allen Sektionen gleichmäßig. Bereits in der ersten Halbwelle ist die umgesetzte Energie in allen Sektionen ausreichend, um die kritische Temperatur zu überschreiten und damit den normalleitenden Zustand dauerhaft zu etablieren. In Abb. 4.11 ist die innere Widerstandsverteilung des Bandleiters B25 bei einem geringen und einem hohen Kurzschlussstromverhältnis zu sehen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass bei einem Bandleiter mit einer inhomogenen Verteilung des kritischen Stromes durch das Aufbringen einer niederohmigen Stabilisierung eine praktisch homogene Widerstandsverteilung zu erreichen ist. Trotz der stark unterschiedlichen Bandleiterinhomogenität von Bandleiter C44 und Bandleiter B25 zeigen beide Bandleiter ein praktisch homogenes inneres Begrenzungsverhalten. Der Grund hierfür ist der geringe

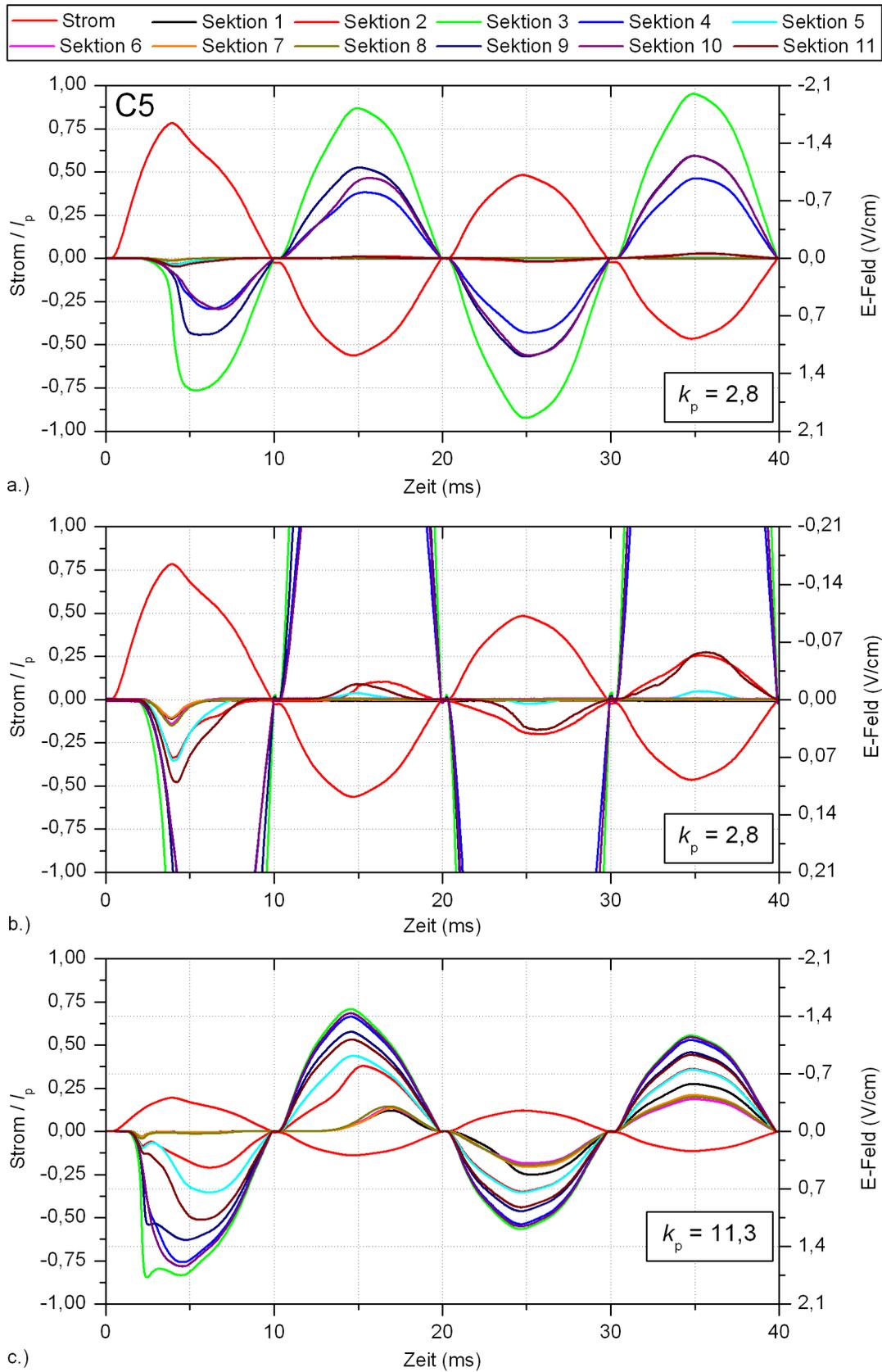


Abb. 4.10: Begrenzungsverhalten des Bandleiters C5 mit geringer Stabilisierung bei einem Kurzschlussstromverhältnis von 2,8 und 11,3

Widerstandsbelag von Bandleiter C44, der eine schnelle Erwärmung der zuerst normalleitenden Sektionen und damit eine ungleiche Erwärmung des Bandleiters verhindert. Der Nachteil der niederohmigen Stabilisierung ist die geringere Kurzschlussstrombegrenzung von Bandleiter C44 im Vergleich zu Bandleiter B25.

Erst bei einem Widerstandsverhältnis von $x > 1$ wird der Kurzschlussstrom signifikant begrenzt (vgl. Definition Kapitel 5.1.1). Um ein gefordertes Widerstandsverhältnis für eine wirkungsvolle Kurzschlussstrombegrenzung zu erhalten, lässt sich ein geringer Widerstandsbelag eines Bandleiters durch eine größere Bandleiterlänge kompensieren. Die Homogenisierungseffekte einer niederohmigen Stabilisierung für die Widerstandsverteilung eines inhomogenen Bandleiters gehen jedoch durch eine größere Bandleiterlänge wieder verloren.

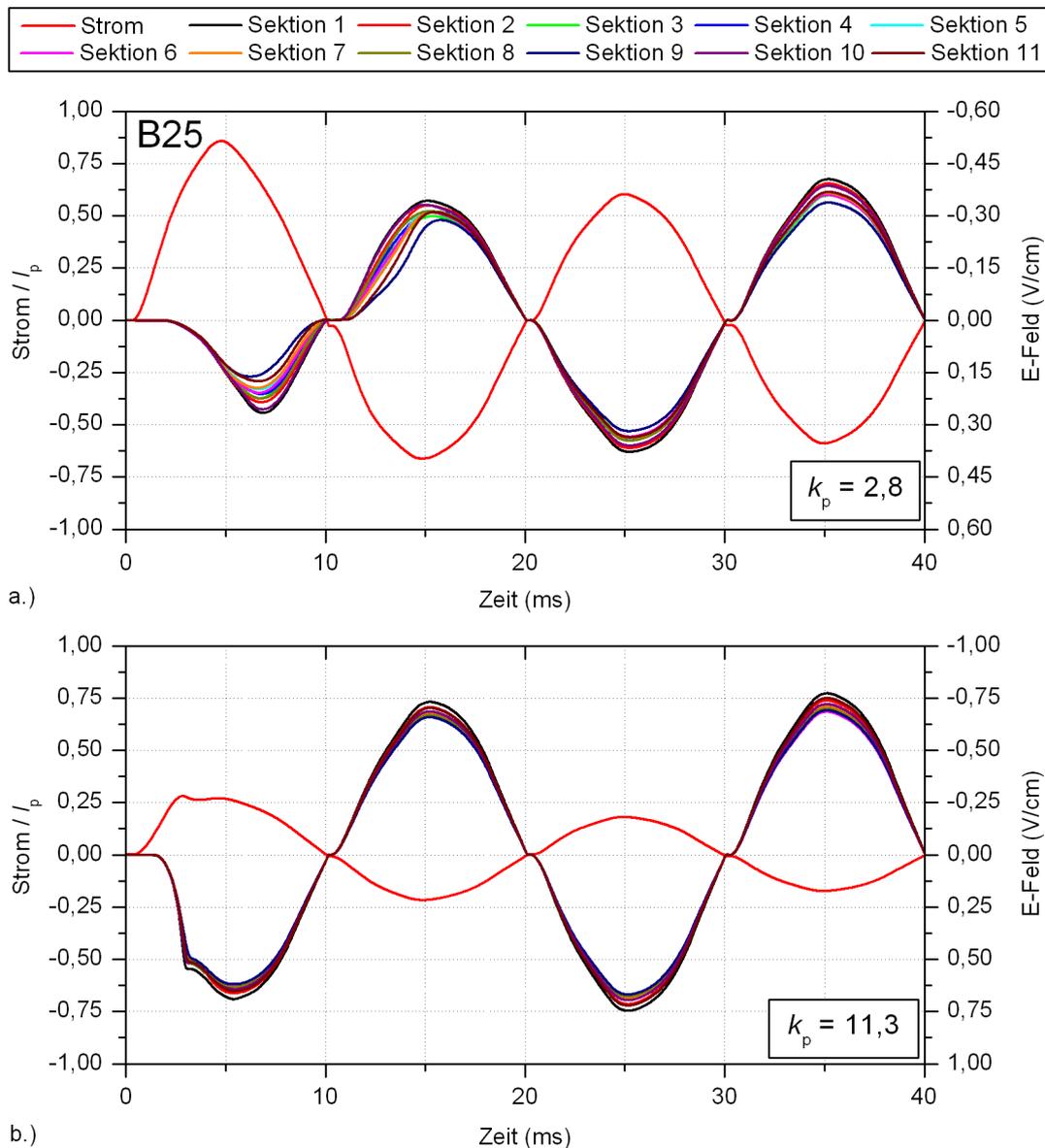


Abb. 4.11: Begrenzungsverhalten des Bandleiters B25 bei einem Kurzschlussstromverhältnis von 2,8 und 11,3

4.2.3 Belastungsgrenzen supraleitender Bandleiter

Für die Konstruktion und Auslegung eines Strombegrenzers ist die maximal mögliche Belastung des Bandleiters von besonderer Bedeutung. Als die, für die Kurzschlussstrombegrenzung relevante, Belastungsgrenze wurde die Temperatur des Bandleiters identifiziert [SKN]. Um die verschiedenen Bandleiter miteinander zu vergleichen, wurde eine Degradation des kritischen Stromes um 4 %, bezogen auf den Referenzwert vor der ersten Kurzschlussstrombegrenzung des Bandleiters, als Vergleichswert für die Belastungsgrenze gewählt. Mit der Bandleitertemperatur ist die umgesetzte Energie während der Kurzschlussstrombegrenzung über die allgemeinen charakteristischen Größen des Bandleiters nach Gl. 4.5 verbunden. Die Belastungsgrenze kann somit für jeden Bandleiter als individuelle Energiegrenze ausgedrückt werden. Die Energiegrenzen der Bandleiter wurden in Abhängigkeit von der Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung in einem Belastungstest an einer Kurzprobe von 11 cm bestimmt. Der Ablauf des Belastungstests ist in Abb. 4.12 in einem Ablaufdiagramm dargestellt.

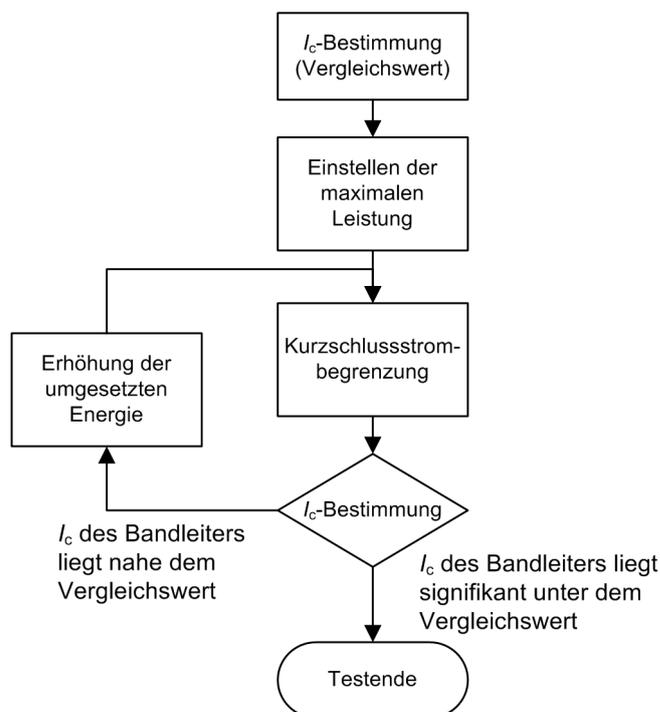


Abb. 4.12: Testablauf zur Bestimmung der Belastungsgrenze eines YBCO-Bandleiters.

Zu Beginn des Belastungstests wurde der kritische Strom des Bandleiters als Referenzwert für die Überwachung des Bandleiters auf Beschädigung bestimmt. Bei festgelegten Anschlussbedingungen wurde ein Kurzschluss mit einer kurzen Begrenzungsdauer auf einen Bandleiter zugeschaltet. Um den Bandleiter auf eine Beschädigung hin zu überprüfen, wurde nach jeder Kurzschlussstrombegrenzung der kritische Strom des Bandleiters erneut gemessen und mit dem Referenzwert verglichen. Konnte keine Beschädigung des Bandleiters festgestellt werden, wurde die umgesetzte Energie im Bandleiter durch Verlängern der Begrenzungsdauer weiter erhöht,

bis der Bandleiter eine Beschädigung aufwies. Die Anschlussbedingungen wurden so gewählt, dass der Bandleiter bei einer Begrenzungsdauer von 40 ms, 60 ms, 80 ms und 100 ms nicht beschädigt wurde. Dieser Ablauf wurde für jeden Bandleitertyp durchgeführt.

In Tab. 4.1 sind die Ergebnisse aller im Belastungstest untersuchter Bandleiter zusammengefasst und in Abb. 4.13 am Beispiel jeweils eines Bandleiters der drei Bandleitertypen A, B und C in einem Diagramm dargestellt.

Jedes Kurvenpaar in einem Diagramm ist der Verlauf der umgesetzten Energie, bezogen auf das Bandleitervolumen bei einem bestimmten Quelleninnenwiderstand. Allen Bandleitertypen ist gemein, dass die Belastungsgrenze individuell und unabhängig von der Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung bzw. den Anschlussbedingungen konstant ist. Die geringste Energiedichte, bei der eine Beschädigung festgestellt wurde, lag immer über der höchsten Energiedichte ohne eine Beschädigung des Bandleiters. Unter adiabatischen Bedingungen ist nach Gl. 4.5 die umgesetzte Energie in einem Bandleiter proportional zur mittleren Bandleitertemperatur und damit zum Widerstand des Bandleiters. Die durchschnittliche Bandleitertemperatur beim Überschreiten der Belastungsgrenze wurde über die entsprechenden temperaturabhängigen Widerstandskurven³ ermittelt. Es konnte keine Korrelation zwischen der erreichten Bandleitertemperatur respektive des Bandleiterwiderstands an der Belastungsgrenze und der Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung festgestellt werden, womit die Annahme einer nahezu adiabaten Erwärmung des Bandleiters bestätigt wird.

	A500	B16	B25	B30	C44
max. Energiedichte (J/cm ³)	1231	1837	2494	2227	773
max. Energie (J)	84	252	353	158	90
max. Temperatur (K)	459	588	732	694	338

Tab. 4.1: Belastungsgrenzen der untersuchten Bandleiter – Die angegebenen Werte sind die Maximalwerte für jeden Bandleitertyp ohne Beschädigung.

Unterhalb der Belastungsgrenze wurde bei allen Bandleitertypen selbst nach mehrmaliger Kurzschlussstrombegrenzung keine Beschädigung oder Degradation des kritischen Stromes festgestellt. Nach Überschreiten der Belastungsgrenze zeigten die Bandleitertypen zwei prinzipielle Verhaltensweisen. Bei Bandleitertyp A versagte die supraleitende Stromtragfähigkeit beim Überschreiten der Belastungsgrenze plötzlich und vollständig. Bei den Bandleitertypen B und C degradierte der kritische Strom der supraleitenden Schicht nach Überschreiten der Belastungsgrenze.

Das plötzliche Versagen der supraleitenden Schicht bei Bandleitertyp A lässt sich auf das Ablösen der zusätzlichen Stabilisierung des Bandleiters zurückführen, wodurch die supralei-

³vgl. Kapitel 3.2.3 - Normalleitende Größen

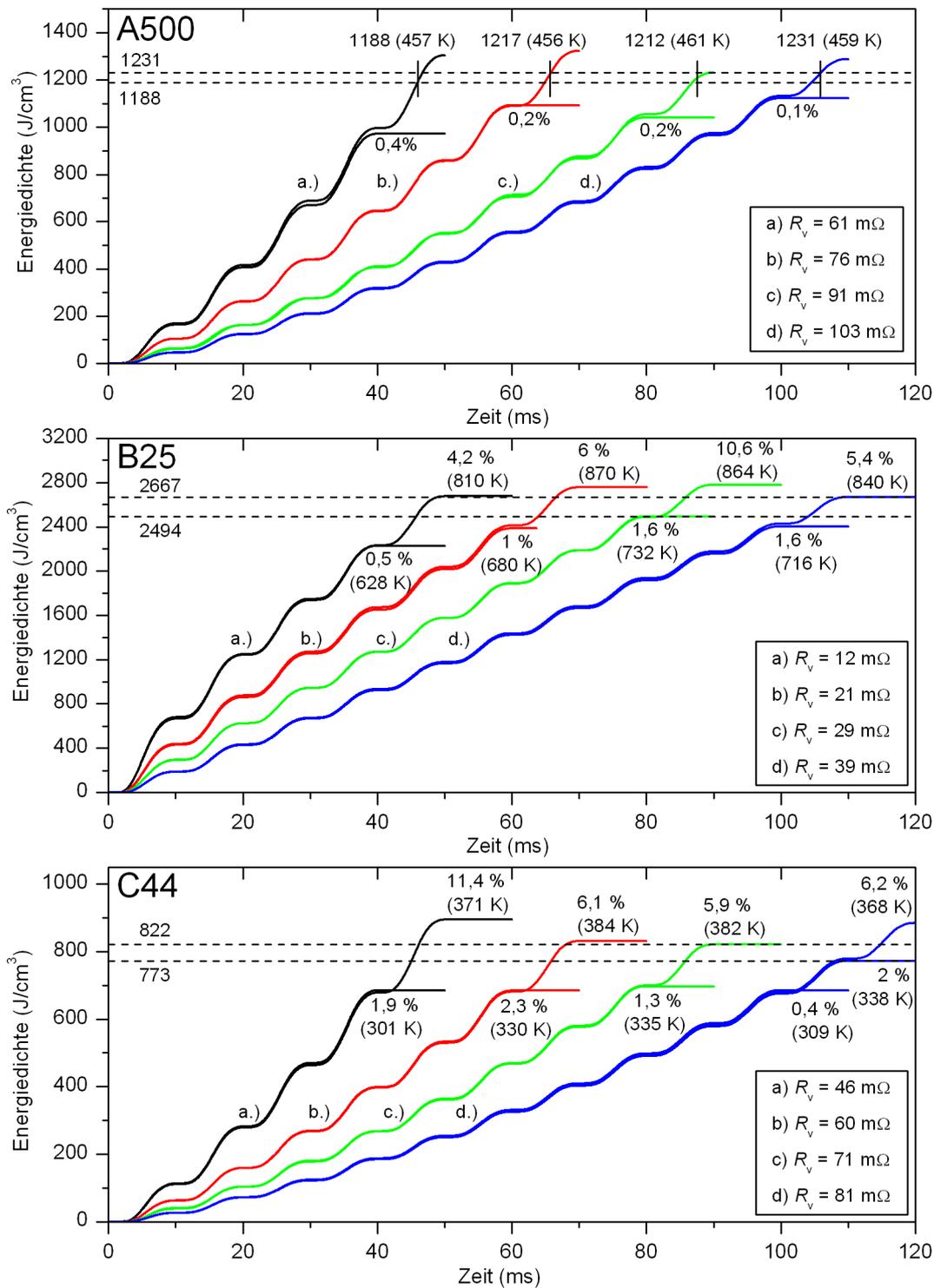


Abb. 4.13: Bestimmung der Belastungsgrenze von YBCO-Bandleiter – Für jeden Bandleitertyp wurde die Belastungsgrenze in Abhängigkeit von der Begrenzungszeit bestimmt.

tende Schicht zerstört wird. Die Schmelztemperatur des Lots, mit dem die zusätzliche Stabilisierungsschicht angelötet wurde, beträgt nach Herstellerangaben 446 K (173 °C) [Ame06]. Bei Erreichen der Belastungsgrenze ist die mittlere Temperatur des Bandleiters über der Schmelztemperatur des Lots. Durch intrinsische mechanische Spannungen im Bandleiter löst sich die zusätzliche Stabilisierung nach Überschreiten der Schmelztemperatur ab und die supraleitende Schicht bricht. Eine Beschädigung der supraleitenden Schicht wurde ausschließlich in den Sektionen festgestellt, in denen der Bandleiter delaminiert wurde. In Abb. 4.14 ist ein beschädigter Bandleiter nach dem Belastungstest zu sehen. Zu erkennen ist die abgelöste Stabilisierung auf der Unterseite des Bandleiters und die dadurch verursachte Verformung der Bandleiterhälfte mit der supraleitenden Schicht.

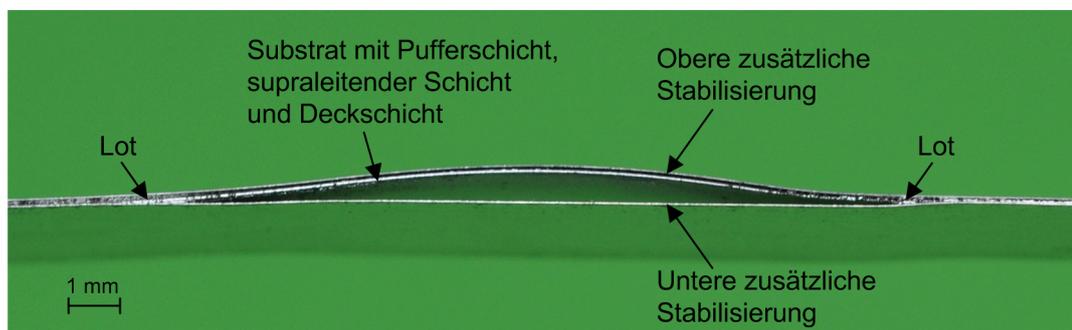


Abb. 4.14: Seitenansicht des beschädigten Bandleiters A500 nach dem Belastungstest – Mit Überschreiten der Schmelztemperatur des Lotes löst sich durch intrinsische Spannungen im Bandleiter eine Stabilisierung ab und verformt die Bandleiterhälfte mit der supraleitenden Schicht.

Die Degradation des kritischen Stromes bei den Bandleitertypen B und C war ein schleicher Prozess wie an den Beispielen in Abb. 4.13 zu sehen. Solange die umgesetzte Energie im Bandleiter die Belastungsgrenze nicht überschritt, konnte praktisch keine Degradation des kritischen Stromes festgestellt werden. Mit Erreichen der Belastungsgrenze begann der kritische Strom im Vergleich zur Referenzmessung abzunehmen. Nach der ersten signifikanten Abnahme des kritischen Stromes von wenigen Prozent, vergrößerte sich die Abnahme sukzessive mit der Anzahl der weiteren Kurzschlussstrombegrenzungen bis zum vollständigen Versagen der supraleitenden Stromtragfähigkeit. Dabei war es ohne Bedeutung, ob bei den weiteren Kurzschlussstrombegrenzungen die Belastungsgrenze des Bandleiters abermals überschritten wurde oder nur eine geringe Energie im Bandleiter umgesetzt wurde.

Für die sukzessive Degradation der supraleitenden Schicht nach Erreichen der Belastungsgrenze kommen mehrere Ursachen in Betracht, von denen keine eindeutig als alleinige Ursache identifiziert werden konnte. Eine Diffusion von Legierungsbestandteilen des Substrats durch die Pufferschicht oder von der Deckschicht in die supraleitende Schicht ist auszuschließen, da die maximale Temperatur bzw. das Zeitintegral der Temperatur während der Kurzschlussstrombegrenzung geringer ist als während des Herstellungsprozesses. Ein partieller Verlust der Sauer-

stoffbelastung⁴ an den Rändern des Bandleiters durch Diffusion während der Kurzschlussstrombegrenzung und der folgenden Rückkühlphase ist hingegen durchaus möglich [Wei04, Lei03]. Am wahrscheinlichsten für den Verlust der supraleitenden Stromtragfähigkeit erscheint bei allen Bandleitertypen, A, B und C eine mechanische Beschädigung der supraleitenden Schicht aufgrund der mit der Temperatur verbundenen unterschiedlichen Längenänderung der verschiedenen Werkstoffe im Bandleiter [CEC03, CET05, SDK07]. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, sind die supraleitende Schicht und die Pufferschicht in einem Bandleiter empfindlich gegen mechanische Spannungen. Die vergleichsweise niedrige Belastungsgrenze des Bandleitertyps C kann dabei auf die besonders poröse Pufferschicht dieses Bandleitertyps zurückgeführt werden [SOP05]. Bei Bandleitertyp A kann die Delamination der zusätzlich aufgelöteten Stabilisierung durch Überschreiten der Schmelztemperatur des Lotes als Ursache für den Verlust der supraleitenden Stromtragfähigkeit angenommen werden, da die Beschädigung der supraleitenden Schicht ausschließlich an den delaminierten Sektionen des Bandleiters auftrat.

4.2.4 Skalierung und Parallelschaltung

Als Zwischenschritt bei der Skalierung der Bandleiterlänge wurden nach der Untersuchung von Kurzproben die Bandleiterlänge von zunächst 11 cm auf 1 m vergrößert. Die einzigen, bei einer Probenlänge von 1 m untersuchten Bandleiter B16 und A500, zeigten durch die Vergrößerung der Bandleiterlänge keine signifikanten Unterschiede im allgemeinen Begrenzungsverhalten, beim inneren Widerstandsaufbau und bei der Belastungsgrenze. Das thermische Verhalten und das Begrenzungsverhalten eines Bandleiters lassen sich somit von Kurzproben mit einer Bandleiterlänge von 11 cm auf Bandleiterproben mit 1 m skalieren.

Um die gegenseitige Beeinflussung von benachbarten, parallelgeschalteten Bandleitern zu untersuchen, wurden Proben mit 1 m Bandleiterlänge in einer Parallelschaltung untersucht. Eine Parallelschaltung von Bandleitern in supraleitenden resistiven Strombegrenzern ist zum Einen notwendig, da die derzeitige Stromtragfähigkeit eines einzelnen YBCO-Bandleiters im Bereich von $200 \dots 250 A_{rms}$ für Nennströme von energietechnischen Anwendungen zu gering ist. Um die geforderten Nennströme von mehreren hundert bis über tausend Ampere zu erreichen, müssen mehrere Bänder parallel geschaltet werden. Zum Anderen werden Bandleiter in supraleitenden resistiven Strombegrenzern zu Spulen gewickelt, um die nötige Bandleiterlänge für die hohen Spannungen platzsparend in einem Kryostaten unterzubringen. Um die Fertigungs- und Betriebskosten für die Kälteanlage zu minimieren und eine, für supraleitende resistive Strombegrenzer, günstige Magnetfeldverteilung an den Bandleitern zu erreichen, ist eine kompakte Anordnung der Bandleiter zu wählen⁵. Um den Einfluss der Wechselwirkung auf das Begrenzungsverhalten zweier benachbarter, stromdurchflossener Bandleiter während der Kurzschluss-

⁴vgl. Kapitel 2

⁵Die Anordnung der Bandleiter beeinflusst maßgeblich die AC-Verluste des supraleitenden Strombegrenzers im Nennbetrieb (vgl. Kapitel 6.3).

strombegrenzung zu untersuchen, wurden zwei Bandleiter in einer Back-to-Back-Anordnung parallelgeschaltet. In der Back-to-Back-Anordnung werden die Bandleiter mit der Substratseite flach aneinander gedrückt und durch eine 50 µm dicke Kaptonfolie voneinander elektrisch isoliert. Diese Bandleiteranordnung wurde gewählt, um die Spannung an beiden Bandleitern auf der Seite ihrer Deckschicht messen zu können. Die Anordnung der Bandleiter besitzt für Bandleiter mit einer gut magnetisierbaren Stabilisierung eine besondere Bedeutung für die Höhe der Wechselstromverluste im Nennbetrieb. Für Bandleiter mit einer überwiegend nicht magnetischen Stabilisierung besitzt die Bandleiteranordnung einen geringen Einfluss [NGAW09]. Für das allgemeine Begrenzungsverhalten aller Bandleiter ist der Einfluss der Bandleiteranordnung zu vernachlässigen. In Abb. 4.15 ist die Anordnung der parallelgeschalteten Bandleiter schematisch dargestellt.

Das Ersatzschaltbild des elektrischen Kreises zur Untersuchung des Begrenzungsverhaltens von parallelgeschalteten Bandleitern ist identisch mit dem in Abb. 4.7 dargestellten Ersatzschaltbild für die Untersuchung des Begrenzungsverhaltens von Kurzproben. Der Vorwiderstand wurde auf den kleinstmöglichen Wert eingestellt, zwei Größenordnungen unter dem Bandleiterwiderstand während der Kurzschlussstrombegrenzung. Der Strom und die Spannungen wurden für jeden Bandleiter separat gemessen.

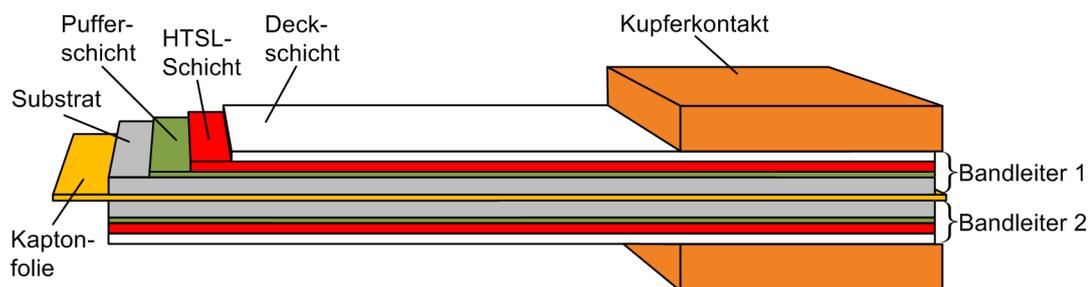


Abb. 4.15: Schematische Darstellung der Back-to-Back-Anordnung zur Untersuchung des Begrenzungsverhaltens parallelgeschalteter Bandleiter.

Die Verteilung des Stromes zwischen den beiden parallelen Bandleitern wird im supraleitenden Zustand durch den normalleitenden Widerstand der Bandleiterkontaktierung und der Stromzuführung bestimmt. Durch die symmetrische Anordnung der Kontakte und der Stromzuführungen ist der Strom in den beiden supraleitenden Bandleitern identisch.

Nach dem S-N-Übergang verteilt sich der Strom entsprechend den normalleitenden Bandleiterwiderständen auf die beiden parallelgeschalteten Bandleiter. In Abb. 4.16 ist das Gesamtwiderstandsverhalten zweier parallelgeschalteter Bandleiter B16 zu sehen. Zum Vergleich ist der Verlauf des Kurzschlussstroms eines einzelnen Bandleiters mit aufgetragen. Der Anstieg des Gesamtstroms ist sowohl bei dem einzelnen als auch bei den parallelgeschalteten Bandleitern im supraleitenden Zustand gleich und wird durch die Impedanz des Transformators und des Testkreises bestimmt. Aus der gleichmäßigen Verteilung des Stromes auf die beiden parallelge-

geschalteten Bandleiter resultiert ein zeitlich verzögerter Stromanstieg in jedem Bandleiter, und damit ein zeitlich verzögerter Übergang in den normalleitenden Zustand.

Im weiteren Verlauf der Kurzschlussstrombegrenzung, nach dem Übergang in den normalleitenden Zustand, tritt kein signifikanter Unterschied zwischen dem Strom eines einzelnen Bandleiters und den Teilströmen in den einzelnen, parallelgeschalteten Bandleitern auf. Daraus lassen sich die gleiche Verlustleistung und damit ein gleichmäßiger Temperaturanstieg in beiden parallelgeschalteten Bandleitern ableiten. Bezüglich der inneren Widerstandsverteilung beeinflusst eine Parallelschaltung aus mehreren Bandleitern den ungleichmäßigen S-N-Übergang von inhomogenen Bandleitern. Eine Aussage über das konkrete Verhalten ist abhängig von den Anschlussbedingungen und der Homogenität des kritischen Stromes entlang eines Bandleiters und zwischen den parallelgeschalteten Bandleitern.

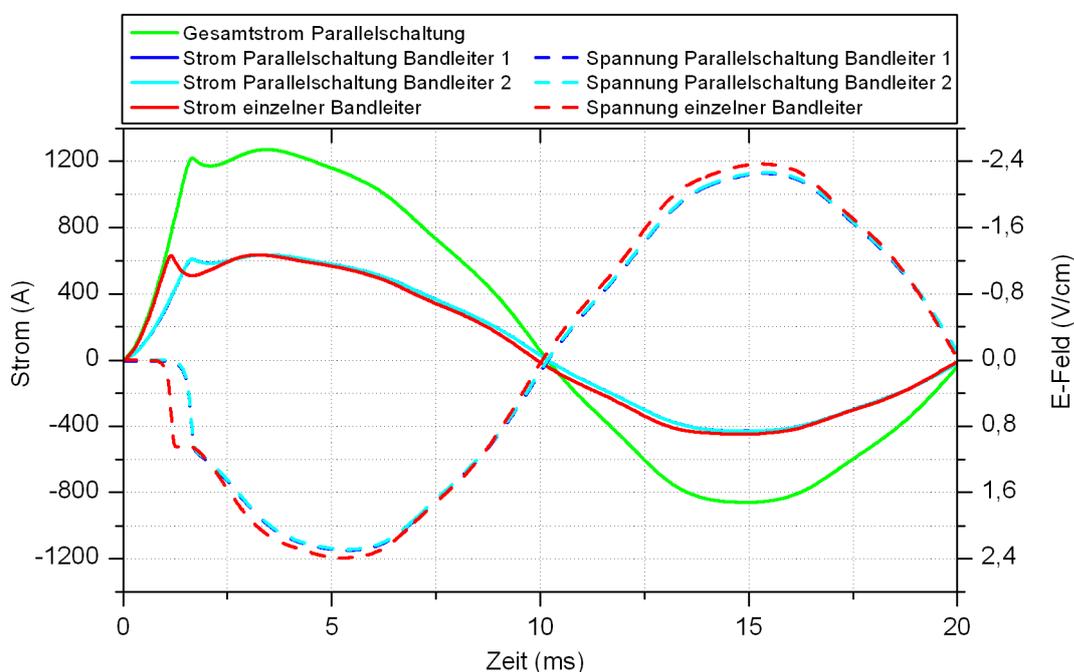


Abb. 4.16: Äußeres Begrenzungsverhalten zweier parallelgeschalteter Bandleiter B16 in Back-to-Back-Anordnung im Vergleich mit einem Einzelleiter

4.2.5 Einfluss des Kühlmediums

Die bisherige Annahme einer praktisch adiabaten Erwärmung des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung wird durch die experimentellen Untersuchungen zum allgemeinen Begrenzungsverhalten von YBCO-Bandleitern bestätigt [EBW01, DFI08]. Das Kühlmedium ist neben der physikalischen Notwendigkeit zur Unterschreitung der kritischen Temperatur T_c in YBCO-Bandleitern von großer ökonomischer Bedeutung für einen supraleitenden Strombegrenzer. Die vordergründig einfachste Art, YBCO-Bandleiter auf eine Temperatur unter der kritischen Temperatur zu kühlen, ist das Eintauchen in flüssigen Stickstoff. Die Verwendung

von flüssigem Stickstoff als Kühlmedium stellt jedoch hohe Ansprüche an die Sicherheit des Kryostats, da dieser als Druckbehälter ausgelegt werden muss⁶. Mit gasförmigem Stickstoff als Kühlmedium kann auf eine Auslegung des Kryostaten als Druckbehälter verzichtet werden, wodurch sich die Konstruktions-, Fertigungs-, Prüf- und Wartungskosten für den Kryostaten bedeutend verringern.

Um den Einfluss des Kühlmediums auf das Begrenzungsverhalten zu untersuchen, wurde Bandleiter B16 mit 1 m Bandleiterlänge in flüssigem Stickstoff unter Normaldruck bei 77 K, wie bei allen übrigen experimentellen Untersuchungen, und in gasförmigem Stickstoff bei ca. 78 K getestet. In Abb. 4.17 sind die Strom- und Spannungsverläufe während der Kurzschlussstrombegrenzung zum direkten Vergleich in einem Diagramm eingetragen. Die Begrenzungsversuche haben gezeigt, dass sich das Begrenzungsverhalten bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei 77 K kaum vom Begrenzungsverhalten bei Kühlung mit gasförmigem Stickstoff bei etwas über 77 K unterscheidet. Der identische Verlauf der Strom- und Spannungskurve untermauert ebenfalls die Annahme eines praktisch adiabaten Verhaltens während der Kurzschlussstrombegrenzung. Weder beim Verlauf des Stromes noch beim Verlauf der Spannung konnte ein signifikanter Unterschied im normalleitenden Zustand festgestellt werden. Lediglich während des S-N-Übergangs, in dem der Strom durch den starken Anstieg des Bandleiterwiderstandes abnimmt, kann ein leicht unterschiedliches Begrenzungsverhalten festgestellt werden. In Abb. 4.17 ist der Stromverlauf während des S-N-Übergangs in einem Ausschnitt vergrößert dargestellt.

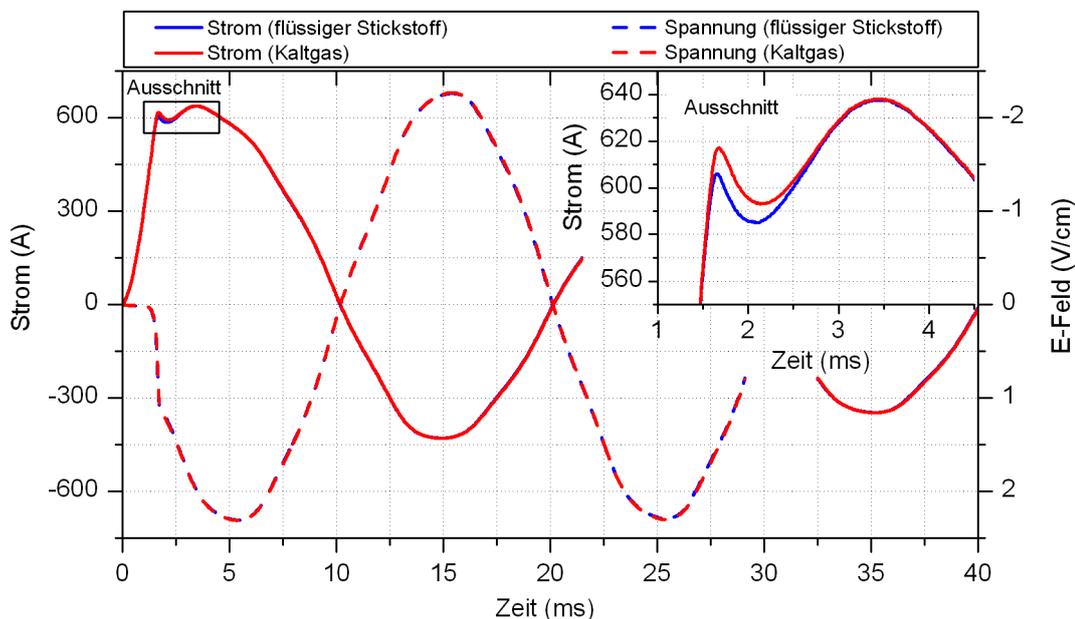


Abb. 4.17: Vergleich des Begrenzungsverhaltens eines Bandleiters mit flüssigem und gasförmigem Stickstoff als Kühlmedium

⁶vgl. Kapitel 6

Für das Rückkühlverhalten ist die Wahl des Kühlmediums von großer Bedeutung. Mit einem gasförmigen Kühlmedium dauert die Rückkühlzeit des Bandleiters nach der Kurzschlussstrombegrenzung um ein Vielfaches länger als bei einem flüssigen Kühlmedium. Durch den Übergang von der flüssigen zur gasförmigen Phase wird mehr Wärme an das Kühlmedium abgegeben. Wenn keine Anforderungen an die Rückkühlzeit gestellt sind, ist die Verwendung eines gasförmigen Kühlmediums vorteilhaft gegenüber einem flüssigen Kühlmedium, bei dem der Phasenübergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand genutzt wird. Bei einem gasförmigen Kühlmedium steigt der Druck im Innern des Kryostaten nicht so sehr an wie bei einem Kühlmedium mit einem Phasenübergang von flüssig zu gasförmig.

4.3 Optimierung des Begrenzungsverhaltens

Entscheidend für die Verwendung eines YBCO-Bandleiters in einem supraleitenden resistiven Strombegrenzer ist das Begrenzungsverhalten und das thermische Verhalten während der Kurzschlussstrombegrenzung des Bandleiters. Mit den grundlegenden Zusammenhängen aus Kapitel 4.1 – Grundlagen – lässt sich ein YBCO-Bandleiter durch Anpassung der allgemeinen charakteristischen Größen speziell für die Verwendung in einem supraleitenden resistiven Strombegrenzer optimieren. Während das Begrenzungsverhalten nur vom elektrischen Widerstand beeinflusst wird, wird das thermische Verhalten von der absoluten Wärmekapazität und dem elektrischen Widerstand des Bandleiters bestimmt.

Um das thermische Verhalten des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung zu optimieren, wurde ein physikalisches Bandleitermodell erstellt, wobei die Temperatur des Bandleiters nach der Kurzschlussstrombegrenzung als relevante Größe für die Optimierung des thermischen Verhaltens identifiziert wurde (vgl. Kapitel 4.2.3). Aus dem allgemeinen Zusammenhang für die Temperaturerhöhung ΔT nach Gl. 4.6 und dem Gesamtwiderstand aus der Parallelschaltung der normalleitenden Schichten nach Gl. 3.3 ergibt sich das physikalische Bandleitermodell

$$\Delta T = \int_{t_a}^{t_A} \frac{U_0^2 \cdot \left(\frac{d_D}{\rho_D(T(t))} + \frac{d_S}{\rho_S(T(t))} \right)}{\left[l + Z_i \cdot b \left(\frac{d_D}{\rho_D(T(t))} + \frac{d_S}{\rho_S(T(t))} \right) \right]^2 \cdot (c_D(T(t)) \cdot \Gamma_D \cdot d_D + c_S(T(t)) \cdot \Gamma_S \cdot d_S)} dt \quad [4.15]$$

zur Modellierung des thermischen und elektrischen Verhaltens des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung. Mit diesem physikalischen Modell lässt sich der Verlauf der Bandleitertemperatur und des elektrischen Widerstandes mit einer zeitdiskreten Iteration über die gesamte Begrenzungszeit berechnen ⁷.

⁷Die maximale Temperatur des Bandleiters nach der Kurzschlussstrombegrenzung kann mit der Methode der "Trennung der Variablen" direkt, ohne ein Iterationsverfahren, berechnet werden [SSWJ08].

Das thermische und elektrische Verhalten des Bandleiters im normalleitenden Zustand wird hauptsächlich von der Deckschicht und dem Substrat bestimmt. Für ein Bandleitermodell ist es daher ausreichend, nur die physikalischen Eigenschaften dieser beiden Bandleiterschichten und die Anschlussbedingungen des elektrischen Kreises zu berücksichtigen. Die Pufferschichten und die supraleitende Schicht können für die Modellierung des normalleitenden Bandleiters aufgrund ihrer geringen Schichtdicken vernachlässigt werden. Der nichtlineare Übergang des Bandleiters in den normalleitenden Zustand ist ebenfalls für die Modellierung des thermischen Verhaltens des Bandleiters vernachlässigbar, da die umgesetzte Energie während des S-N-Übergangs sehr gering ist im Vergleich zur insgesamt umgesetzten Energie während des Begrenzungsvorgangs.

Berechnungsbeispiel

Der mit dem physikalischen Bandleitermodell berechnete Widerstandsverlauf ist in Abb. 4.18 mit dem experimentell bestimmten Widerstandsverlauf des Bandleiters B16 verglichen. Der experimentell bestimmte Widerstandsverlauf des Bandleiters B16 stammt von einer 1 m Probe, getestet an einer Quellenspannung von 168 V und einem Quelleninnenwiderstand von ca. 10 m Ω über eine Begrenzungsdauer von 60 ms. Für die allgemeinen charakteristischen Größen im physikalischen Bandleitermodell des Bandleiters B16 wurden Literaturwerte aus Anhang A verwendet. Die Iterationschritte erfolgten mit einer festen zeitlichen Schrittweite von 10 μ s. Trotz der Vereinfachungen durch Vernachlässigung der Pufferschichten und der supraleitenden Schicht sowie des S-N-Übergangs in dem physikalischen Bandleitermodell stimmt das Ergebnis des berechneten Widerstandsverlaufs während der Kurzschlussstrombegrenzung sehr gut mit dem experimentell bestimmten Widerstandsverlauf überein.

Mit der Möglichkeit der Vorhersage des thermischen Verhaltens und des Begrenzungsverhaltens des Bandleiters mittels des physikalischen Bandleitermodells nach Gl. 4.15, ergeben sich die Parameter zur Optimierung eines Bandleiters für die Verwendung in einem supraleitenden resistiven Strombegrenzer: Länge l und Breite b des Bandleiters, Dicken der Deckschicht d_D und des Substrats d_S sowie die allgemeinen spezifischen charakteristischen Größen spezifischer Widerstand $\rho(T)$, spezifische Wärmekapazität $c(T)$ und Dichte Γ der einzelnen Schichten eines YBCO-Bandleiters.

Der Variation der Parameter zur Optimierung der physikalischen Eigenschaften sind allerdings Grenzen gesetzt durch die Anforderungen an die Werkstoffe während des Herstellungsprozesses oder durch Anforderungen an die Handhabbarkeit während der Verarbeitung des Bandleiters. So begrenzt z.B. die Methode zur Erzeugung der Texturierung die Auswahl an Werkstoffen für das Substrat. Das gleiche gilt für die Auswahl an Werkstoffen für die Deckschicht, die durch den Herstellungsprozess der supraleitenden Schicht eingeschränkt wird (vgl. Kapitel 2.2). Die Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Bandleiters durch Variie-

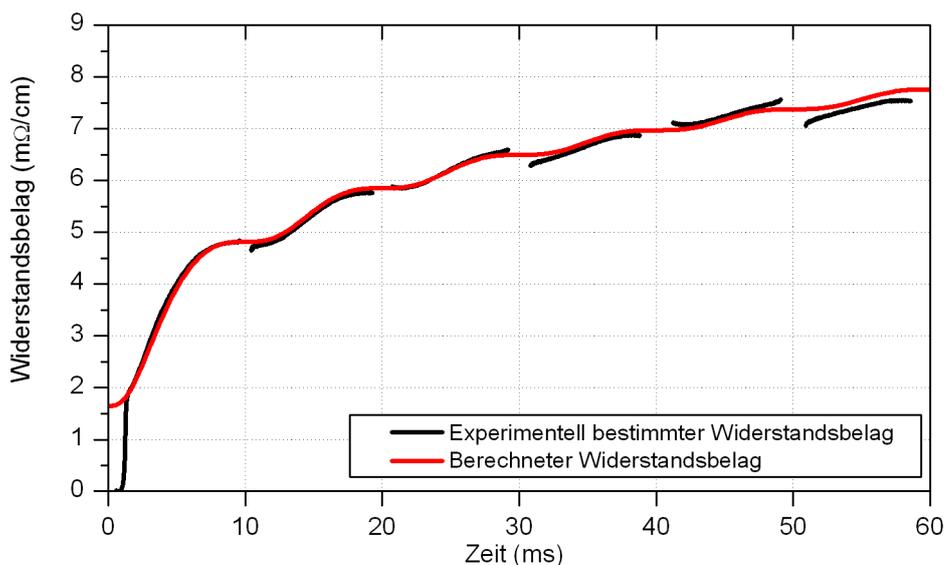


Abb. 4.18: Vergleich zwischen experimentell bestimmten und berechneten Widerstandsverlauf während der Kurzschlussstrombegrenzung – Bei dem berechneten Widerstandsbelag wurde der S-N-Übergang des YBCO-Bandleiters nicht berücksichtigt. Die Unstetigkeit des Widerstandsbelages bei dem experimentell bestimmten Widerstandsbelag um den Stromnulldurchgang wurden entfernt für eine übersichtlichere Darstellung.

ren der Geometrie der einzelnen Schichten ist aus praktischen Gründen begrenzt. Die Breite des Bandleiters ist durch die Produktionsanlagen vorgegeben. Ein Zerschneiden des Bandleiters in Längsrichtung für eine geringere Bandleiterbreite ist über große Längen nicht praktikabel. Die Dicke des Substratbandes darf eine untere Grenze nicht unterschreiten, um die mechanische Stabilität des Bandleiters während der Herstellung, Verarbeitung und während der späteren Anwendung nicht zu gefährden und eine obere Grenze nicht überschreiten, um die Flexibilität des Bandleiters zu erhalten. Praktikable Parameter, mit deren Variation sich die physikalischen Eigenschaften eines typischen YBCO-Bandleiters für den Entwurf und die Konstruktion eines supraleitenden Strombegrenzers optimieren lassen, sind:

- die Länge des Bandleiters l
- die Dicke der Deckschicht d_D

Die Bandleiterlänge l ist für den Entwurf eines supraleitenden Strombegrenzers ein leicht anpassender konstruktiver Parameter. Bei einer ausreichenden Bandleiterqualität ist die maximale Bandleiterlänge für den Entwurf eines Strombegrenzers nur durch die von dem Herstellungsprozess verfügbaren Bandleiterlängen beschränkt. Die Anpassung der Dicke der Deckschicht d_D muss im Vorfeld, bei der Herstellung des Bandleiters, erfolgen. Nachträglich kann die Dicke der Deckschicht, durch weiteres Beschichten, lediglich vergrößert werden.

4.3.1 Einfluss der Deckschichtdicke

Das Begrenzungsverhalten und das thermische Verhalten des Bandleiters wird vom normalleitenden Bandleiterwiderstand und der effektiven Wärmekapazität des Bandleiters bestimmt. Bei einer vorgegebenen Dicke des Substrats lässt sich nach Gl. 4.15 das thermische und elektrische Verhalten des Bandleiters gut über die Dicke der Deckschicht beeinflussen. In Abb. 3.8 ist der starke Einfluss einer Deckschicht aus Silber auf den gesamten Bandleiterwiderstand zu sehen. Besonders bei geringen Bandleitertemperaturen zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung wird der Bandleiterwiderstand von der Deckschicht, aufgrund des geringen spezifischen Widerstandes und der hohen Temperaturabhängigkeit von Silber oder anderen reinen Metallen mit einem hohen RRR-Wert (vgl. Kapitel 3.2.3), bestimmt.

Das thermische Verhalten und damit der Temperaturanstieg im Bandleiter während der Kurzschlussstrombegrenzung wird bei einem geringen Quelleninnenwiderstand nach Gl. 4.15 durch den spezifischen Widerstand, die spezifische Wärmekapazität, die Dichte und die Dicke der Deckschicht beeinflusst.

Über die Dicke der Deckschicht verändern sich die mittleren spezifischen Größen des Bandleiters und damit der Temperaturanstieg des Bandleiters. Um den Einfluss der Deckschichtdicke zu untersuchen, wurde, ausgehend von den Eigenschaften des Bandleiters B16, die Deckschicht aus Silber von 0...3 μm variiert und die Endtemperatur nach einer Begrenzungszeit von 100 ms bei einer Bandleiterlänge von 1 m, einer Spannung von 100 V_{rms} und einem Quelleninnenwiderstand von 10 $\text{m}\Omega$ berechnet. In Abb. 4.19 ist der Temperaturanstieg des Bandleiters in Abhängigkeit der Dicke der Deckschicht zu sehen. Das nichtlineare Erwärmungsverhalten resultiert aus dem unterschiedlichen Einfluss der Schichtdicke auf das thermische und das elektrische Verhalten des Bandleiters über die spezifische Wärmekapazität, Dichte und den spezifischen Widerstand. Mit der Dicke der Deckschicht steigt die Temperatur des Bandleiters nach der Kurzschlussstrombegrenzung stark an. Eine minimale Dicke der Deckschicht im Bereich von 1 μm ist aus Gründen der elektrischen Stabilität zur Vermeidung von Beschädigungen des Bandleiters durch Fehlstellen und während des S-N-Übergangs der supraleitenden Schicht notwendig und bildet somit in Bezug auf die Dicke der Deckschicht das Optimum zur Minimierung des Temperaturanstiegs. Ohne Berücksichtigung des gesamten Bandleiterwiderstands lässt sich durch eine Reduktion der Dicke der Deckschicht der Temperaturanstieg im Bandleiter wirksam vermindern.

Die zweite Möglichkeit, den Temperaturanstieg im Bandleiter zu minimieren, ist nach Gl. 4.15 ein möglichst hoher Wert für das Produkt der spezifischen Größen der Deckschicht. Nach dem Wiedemann-Franzschen Gesetz sind die spezifischen Größen eines Metalls über die Lorenz-Zahl L miteinander verknüpft [Kop89, KGL99]. Bei hohen Temperaturen ($> 70 \text{ K}$) ist die Lorenz-Zahl von reinen elementaren Metallen praktisch konstant, wodurch das Produkt aus spezifischen Widerstand $\rho_D(T)$, spezifischer Wärmekapazität $c_D(T)$ und Dichte Γ_D ebenfalls

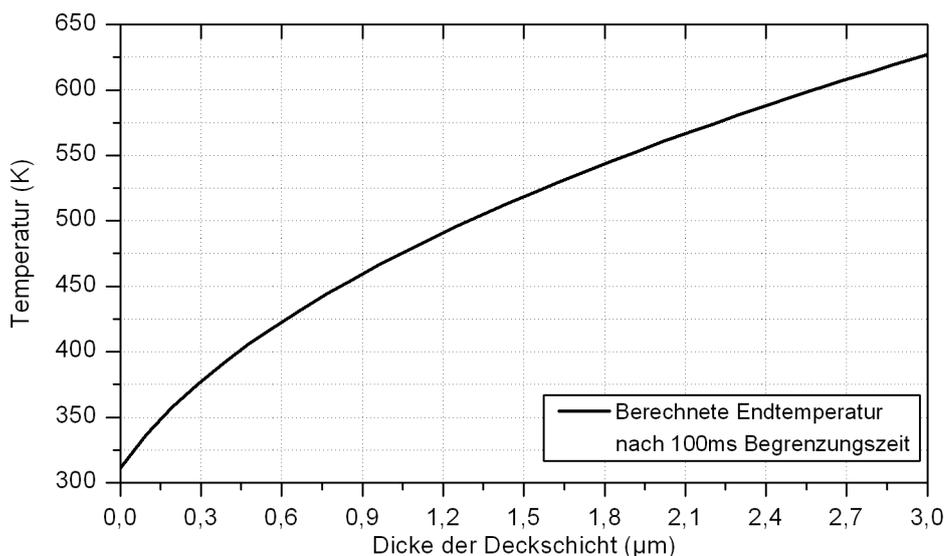


Abb. 4.19: Berechnete Endtemperatur eines YBCO-Bandleiters nach einer Kurzschlussstrombegrenzung in Abhängigkeit der Dicke der Deckschicht

praktisch konstant ist. Die Variation des Werkstoffs der Deckschicht durch verschiedene elementare und reine Metalle hat somit praktisch keine Auswirkung auf den Temperaturanstieg in einem supraleitenden resistiven Strombegrenzer. Der Temperaturanstieg einer Deckschicht aus Silber ist vergleichbar mit dem Temperaturanstieg einer Deckschicht aus Kupfer.

Für Legierungen ist die Lorenz-Zahl und damit das Produkt aus den spezifische Größen nicht konstant und liegt bei Raumtemperatur meist etwas höher als bei reinen Metallen [RC83, HS73], was eine leichte Reduktion des Temperaturanstiegs im Bandleiter bedeutet. Allerdings ist die Verwendung einer Legierung als Deckschicht kaum möglich, ohne die supraleitende Schicht durch Verunreinigungen zu zerstören⁸. Außerdem ist der spezifische Widerstand von Legierungen zu hoch, um als Deckschicht den Bandleiter elektrisch und thermisch zu stabilisieren.

4.3.2 Einfluss eines Parallelwiderstandes und zusätzlicher Schichten

Eine weitere Möglichkeit, das Begrenzungsverhalten und das thermische Verhalten des Bandleiters zu beeinflussen und zu optimieren, ist das Aufbringen zusätzlicher Schichten und/oder eine zusätzliche Beschaltung des Bandleiters mit einem Parallelwiderstand. Eine konstruktive Maßnahme, die thermischen Eigenschaften des Bandleiters zu optimieren, ohne die Begrenzungseigenschaften des Bandleiters zu verändern, ist das Aufbringen einer zusätzlichen Schicht. Das Aufbringen einer zusätzlichen Schicht aus einem reinen Metall wie Kupfer hat somit die gleiche Wirkung wie eine Vergrößerung der Deckschichtdicke. Um den Temperaturanstieg deutlich zu minimieren, ist die zusätzliche Schicht, idealerweise elektrisch isolierend, mit einer hohen Wärmekapazität und Dichte auf den Bandleiter aufzubringen. Elektrisch isolierende Werkstoffe

⁸Bei einer Legierung als Deckschicht besteht die Gefahr, dass Legierungsbestandteile durch Diffusionsprozesse in die supraleitende Schicht gelangen (vgl. Kapitel 2.2).

mit einer hohen Wärmekapazität und Dichte sind vor allem Oxide von Metallen, Alkalien und Erdalkalien sowie der Seltenen Erden [Fis99, PCL].

Eine weitere Möglichkeit, das Begrenzungsverhalten des Bandleiters zu beeinflussen, ist eine zusätzliche Beschaltung des Bandleiters mit einem Parallelwiderstand. Im Gegensatz zu einer zusätzlich aufgetragenen Schicht auf dem Bandleiter kann der Parallelwiderstand thermisch vom Bandleiter durch eine räumliche Trennung entkoppelt werden. Wie bereits ausgeführt, ist der Temperaturanstieg in einem Bandleiter während der Kurzschlussstrombegrenzung an einem geringen Quelleninnenwiderstand umgekehrt proportional zum Bandleiterwiderstand. Um das thermische Verhalten des Bandleiters zu optimieren, ist daher prinzipiell ein hoher Bandleiterwiderstand zu wählen. Gleichzeitig müssen die vom Energieversorgungsnetz gestellten Anforderungen an das äußere Begrenzungsverhalten des Bandleiters erfüllt werden. So darf der nach außen wirksame Widerstand des resistiven Strombegrenzers einen bestimmten Wert nicht überschreiten⁹. Die Widersprüchlichkeit eines geforderten hohen Bandleiterwiderstands für ein optimiertes thermisches Verhalten bei gleichzeitig geringem wirksamen Bandleiterwiderstand zur Erfüllung des geforderten Begrenzungsverhaltens kann durch einen vom Bandleiter thermisch entkoppelten, parallelen Widerstand aufgehoben werden. Die Verlustleistung und damit der Temperaturanstieg des Bandleiters wird mit der zusätzlichen niederohmigen und thermisch unabhängigen Beschaltung des Bandleiters vermindert (vgl. Kapitel 5.3.4 Abb. 5.22). Der Bandleiter wirkt als Schaltelement, nach dessen Übergang in die Normalleitung der Strom nahezu vollständig auf den Parallelwiderstand kommutiert. Im supraleitenden Zustand ist der Parallelwiderstand für das Energieversorgungsnetz "unsichtbar". In Abb. 4.20 ist das erweiterte Ersatzschaltbild mit Parallelwiderstand zum Bandleiterwiderstand zu sehen. Das Ersatzschaltbild entspricht einem, mit dem Bandleiterwiderstand R_{SL} belasteten Spannungsteiler aus Quelleninnenwiderstand R_i und Parallelwiderstand R_p .

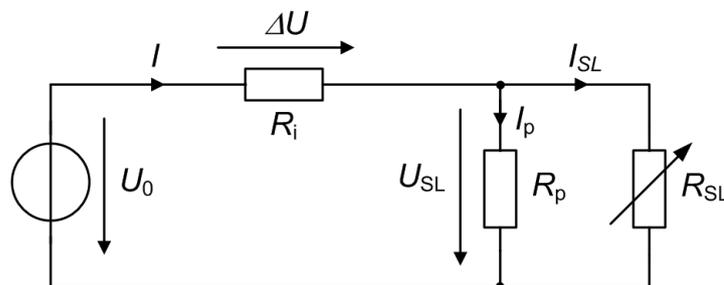


Abb. 4.20: Ersatzschaltbild mit thermisch vom Bandleiter getrennten Parallelwiderstand – Durch die thermische Trennung des Bandleiters vom Parallelwiderstand lassen sich die Anforderungen an das thermische Verhalten und das Begrenzungsverhalten erfüllen.

⁹Die Vorgaben des Energieversorgungsnetzes sind in Kapitel 5.1.1 aufgeführt.

4.4 Zusammenfassung

YBCO-Bandleiter, hergestellt mit unterschiedlicher elektrischer und thermischer Stabilisierung sowie mit unterschiedlichen Texturierungsverfahren, wurden systematisch für die Verwendung in supraleitenden resistiven Strombegrenzern untersucht und charakterisiert. Die experimentellen Untersuchungen des Begrenzungsverhaltens demonstrieren die Leistungsfähigkeit der untersuchten Bandleiter. Die experimentellen Untersuchungen des Begrenzungsverhaltens bestätigen, dass stark inhomogene Bandleiter eine niederohmige Stabilisierung benötigen, um während der Kurzschlussstrombegrenzung oder bei einer fehlerhaft auftretenden Störstelle eine Beschädigung des Bandleiters zu vermeiden. Andererseits darf der Widerstandsbelag des Bandleiters nicht zu gering werden, um eine ausreichende Begrenzungswirkung nicht zu verlieren. Der nötige Widerstand des Bandleiters kann über die Länge des Bandleiters vergrößert werden. Nachteilig für den Einsatz von größeren Bandleiterlängen sind die hohen Investitionskosten für den Bandleiter selbst.

Das Zusammenspiel von Bandleiterinhomogenität und Stabilisierung ist neben dem Begrenzungsverhalten und ökonomischen Gesichtspunkten vor allem für den Schutz des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung von Bedeutung. Der Einfluss der Stabilisierung auf die Homogenität des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung wurde experimentell und theoretisch untersucht.

Mit den vorgestellten theoretischen Zusammenhängen lässt sich das prinzipielle Verhalten eines Bandleiters mit unterschiedlicher Homogenität des kritischen Stromes erklären. Es konnte gezeigt werden, wie die innere Widerstandsverteilung und die Bandleitererwärmung von inhomogenen Bandleitern von den Anschlussbedingungen und von den physikalischen Eigenschaften des Bandleiters abhängig sind. Eine niederohmige Stabilisierung ist prinzipiell eine geeignete Methode um die Homogenität von Bandleitern, bezüglich des inneren Widerstandsbaus, zu verbessern.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen. Das Aufbringen einer niederohmigen Stabilisierung auf die supraleitende Schicht ist eine wirksame Methode, einen inhomogenen Bandleiter vor einer Beschädigung durch eine ungleichmäßige Erwärmung während der Kurzschlussstrombegrenzung zu schützen. Allerdings wird durch das Aufbringen einer niederohmigen Stabilisierung der Bandleiterwiderstand zur wirksamen Kurzschlussstrombegrenzung zu gering und macht damit längere Bandleiterlängen notwendig. Ideal für die Anwendung in supraleitenden Strombegrenzern sind daher Bandleiter mit einer möglichst homogenen Verteilung des kritischen Stromes und ohne lokale Fehlstellen, da diese idealen Bandleiter nur eine minimale Stabilisierung benötigen.

Die bei aktuellen Stromdichten notwendige Parallelschaltung mehrerer Bandleiter in einem supraleitenden Strombegrenzer wurde experimentell an 1 m langen Bandleiterproben untersucht. Die experimentellen Versuche zeigen, dass bei einer Parallelschaltung von zwei Band-

leiten sich der Strom gleichmäßig auf die Bandleiter verteilt und sich somit die Parallelschaltung zur Steigerung des Nennstroms eignet. Die Untersuchungen des Begrenzungsverhaltens mit gasförmigen Stickstoff bestätigen die Annahme einer nahezu adiabaten Erwärmung des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung. Das Begrenzungsverhalten des mit Gas gekühlten Bandleiters war praktisch identisch mit dem Begrenzungsverhalten des mit flüssigem Stickstoff gekühlten Bandleiters. Der unerwünschte Druckanstieg während der Kurzschlussstrombegrenzung durch verdampfendes, flüssiges Stickstoff bleibt bei Modulen die mit Stickstoffgas gekühlt werden aus.

5 Strombegrenzendes Modul

Supraleitende Strombegrenzer mit dem resistiven Begrenzungsprinzip lassen sich modular, aus einer Vielzahl einzelner strombegrenzender Module zusammensetzen. Erfolgreich abgeschlossene Projekte mit supraleitenden Strombegrenzern auf Basis von BSCCO-Massivmaterial wurden modular ausgeführt [EBN03]. Obwohl YBCO-Bandleiter einfacher in großen Längen herzustellen sind als BSCCO-Massivmaterial, wurde beim Übergang auf YBCO-Bandleiter als strombegrenzende Elemente am modularen Aufbau des supraleitenden Strombegrenzers festgehalten. Erste Demonstratoren modular aufgebauter Strombegrenzer mit YBCO-Bandleitern als strombegrenzende Elemente wurden ebenfalls erfolgreich abgeschlossen [KSW08, KYT08, LWH08].

Für die Konstruktion und Herstellung eines supraleitenden resistiven Strombegrenzers ist eine einheitliche Konfektionierung der supraleitenden YBCO-Bandleiter, in Form von vorgefertigten Modulen mit identischen physikalischen Eigenschaften, technisch und ökonomisch vorteilhaft. Unter einem Modul wird in dieser Arbeit eine in sich abgeschlossene Einheit aus einem oder mehreren YBCO-Bandleitern als supraleitendes, resistiv strombegrenzendes Element einschließlich der nötigen Anschlüsse zur Kontaktierung der Bandleiter verstanden. Mit der Parallel- und Reihenschaltung mehrerer Module lassen sich leistungsstarke Strombegrenzer aufbauen. Für einen Strombegrenzer in einer hohen Spannungsebene müssen q Module in Reihe geschaltet werden und für hohe Nennströme müssen p Module parallel geschaltet werden. In Abb. 5.1a ist der prinzipielle, modulare Aufbau eines Strombegrenzers in einem Energieversorgungsnetzwerk zu sehen.

Um das Verhalten eines einzelnen Moduls in einer Matrix aus $p \times q$ Modulen zu untersuchen, kann das Energieversorgungsnetzwerk unter Annahme identischer physikalischer Eigenschaften aller Module auf ein Ersatznetzwerk skaliert werden, ohne die Wirkung der Anschlussbedingungen auf das zu untersuchende Modul zu verändern. Der Entwurfsgang für einen supraleitenden resistiven Strombegrenzer zum Einsatz in einem Energieversorgungsnetzwerk entspricht somit dem Entwurfsgang eines einzelnen Moduls mit den Werten des skalierten Energieversorgungsnetzwerks.

$$U_{0,\text{ers}} = \frac{U_0}{q}; \quad I_{n,\text{ers}} = \frac{I_n}{p} \quad Z_{i,\text{ers}} = \frac{Z_i}{q} \cdot p; \quad [5.1]$$

Mit den Zusammenhängen aus Gl. 5.1 lassen sich die Quellenspannung U_0 , der Nennstrom I_n und externe Impedanzen wie z.B. die Quelleninnenimpedanz Z_i eines Netzwerks mit p parallel-

und q seriellgeschalteten Modulen auf die Spannung $U_{0,ers}$, den Strom $I_{n,ers}$ und die Quelleninnenimpedanz $Z_{i,ers}$ eines Ersatznetzwerks mit einem Modul skalieren. Abb. 5.1b zeigt das Ersatzschaltbild des skalierten Energieversorgungsnetzwerks.

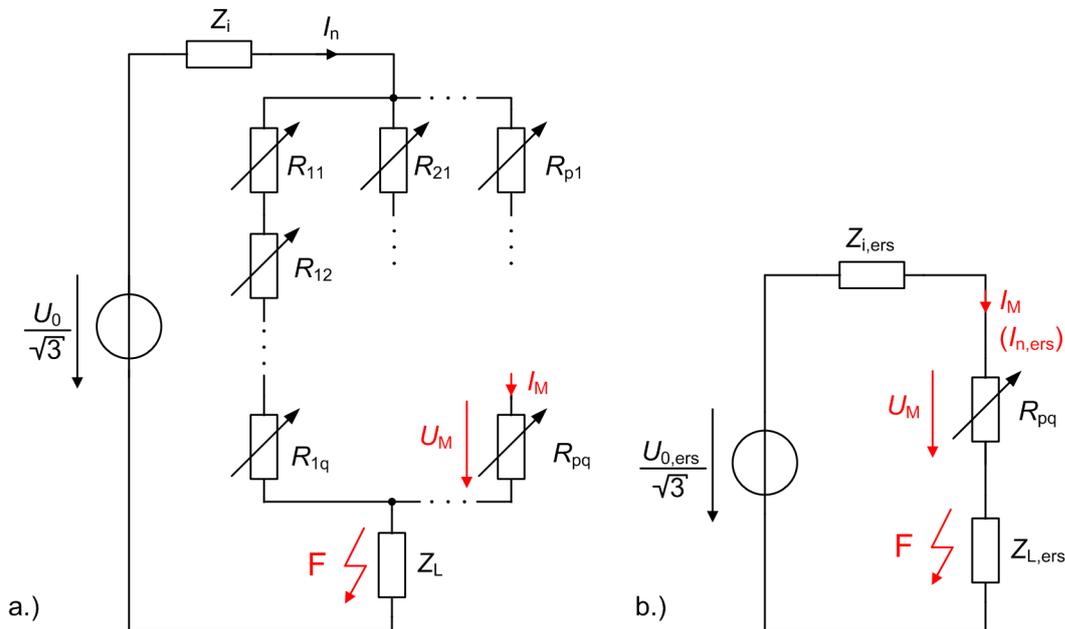


Abb. 5.1: Ersatzschaltbild eines modular aufgebauten Strombegrenzers – Ein modular aufgebauter Strombegrenzer nach a.) lässt sich durch Skalieren der Anschlussbedingungen in eine Ersatzschaltung mit einem Modul umformen wie in b.) dargestellt.

In Kapitel 5.1 wird der Entwurfsgang eines supraleitend, resistiven strombegrenzenden Moduls vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 5.2 werden zwei unterschiedlich konstruierte Module unter Laborbedingungen getestet, um den Einfluss der Bandleiterwicklung auf das Begrenzungsverhalten zu untersuchen. Neben konstruktiven und ökonomischen Vorteilen bietet ein modularer Aufbau eines Strombegrenzers die Möglichkeit, Module mit einer geringeren Leistung anstelle des leistungsstarken Strombegrenzers zu testen. In Kapitel 5.3.4 wird ein viel versprechendes Testverfahren für strombegrenzende Module vorgestellt, mittels dessen einzelne Module mit einer sehr viel höheren Flexibilität getestet werden können, als dies mit konventionellen Testmethoden möglich ist [SLSN09].

5.1 Entwurf eines strombegrenzenden Moduls

In diesem Kapitel wird der Entwurfsgang eines modular aufgebauten supraleitenden Strombegrenzers am Beispiel eines Moduls vorgestellt und diskutiert. Berücksichtigt werden die charakteristischen Größen und das Begrenzungsverhalten von YBCO-Bandleitern, wie sie in Kapitel 3 bestimmt wurden, sowie allgemeine anwendungsspezifische Vorgaben eines Energieversorgungsnetzes der 10 kV-Mittelspannungsebene. Für das allgemeine Begrenzungsverhalten

des Bandleiters wurde von einer hinreichenden Homogenität des kritischen Stromes ausgegangen. Daher werden keine besonderen Schutzmaßnahmen für den Bandleiter berücksichtigt.

Für den Entwurfsgang eines supraleitenden strombegrenzenden Moduls sind die maximal und minimal zu erwartenden Kurzschlussströme zu beachten. Das für den Entwurfsgang zugrunde gelegte Energieversorgungsnetz ist ein typisches 10 kV Mittelspannungsnetz und wurde für die Untersuchungen mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle nachgebildet. Das einphasige Ersatzschaltbild des Energieversorgungsnetzes bei Auftreten eines Kurzschlusses ist in Abb. 5.2 zu sehen.

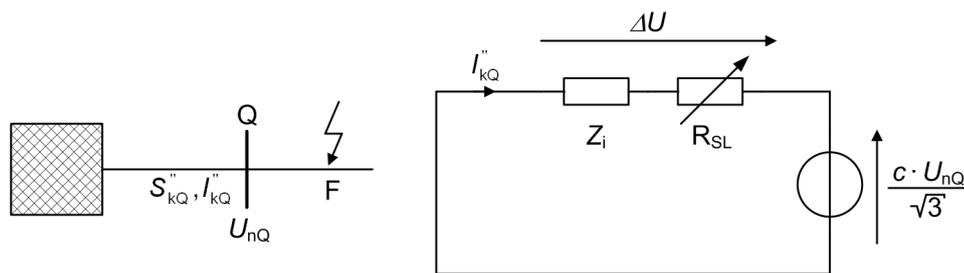


Abb. 5.2: Ersatzschaltbild einer Netzeinspeisung und einphasiges Ersatzschaltbild bei Kurzschluss – Für die Nachbildung des Energieversorgungsnetzes bei Kurzschluss wird das Verfahren der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle verwendet [OO04].

Die Nennlastimpedanz $Z_{L,n}$ berechnet sich aus der Nennspannung U_n und dem Nennstrom I_n , während sich die Quelleninnenimpedanz Z_i der Netzeinspeisung mit Kenntnis der Kurzschlussleistung an der Stelle Q und der Nennspannung berechnen lässt [OO04, Ne01]. Es gilt:

$$Z_i = R_i + jX_i = c_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = c_{\max} \cdot \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad [5.2]$$

Die vereinfachenden Annahmen des Verfahrens der Ersatzspannungsquelle sind erlaubt, da es nicht beabsichtigt ist, den zeitlichen Verlauf eines Kurzschlussstroms an einer spezifischen Stelle im Energieversorgungsnetz zu berechnen. Vielmehr soll durch Vereinfachungen deutlich gemacht werden, wie die allg. anwendungsspezifischen Vorgaben den Entwurf eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls bzw. eines Strombegrenzers beeinflussen. Die grundsätzlichen Überlegungen in diesem Kapitel sind unter Beachtung veränderter Vorgaben des Energieversorgungsnetzes auch für andere Spannungsebenen gültig.

5.1.1 Vorgaben und Entwurfsgleichungen

Durch die allg. anwendungsspezifischen Vorgaben des Energieversorgungsnetzes werden die Freiheitsgrade für die Auslegung und die Konstruktion der strombegrenzenden Module eingeschränkt. Beim Entwurf eines strombegrenzenden Moduls müssen die allg. anwendungsspezifischen Vorgaben sowie die Belastungsgrenzen des Bandleiters eingehalten werden. Mit der

Berücksichtigung der allg. anwendungsspezifischen Vorgaben sind bei der Einbindung eines supraleitenden Strombegrenzers keine weitreichenden Anpassungen der bestehenden Schutzrichtungen notwendig. Zu den allg. anwendungsspezifischen Vorgaben des Energieversorgungsnetzes zählen:

- die Quellenspannung U_0
- die Quelleninnenimpedanz Z_i (X_i/R_i -Verhältnis)
- die Bemessungs-Ausschaltzeit t_b
- der maximale Kurzschlussstrom $I_{lim,max}$
- der Nennstrom I_n
- die minimale Spannung am Verbraucher $U_{n,min}$
- der minimaler Kurzschlussstrom $I_{lim,min}$
- die Pausenzeit t' des Leistungsschalters

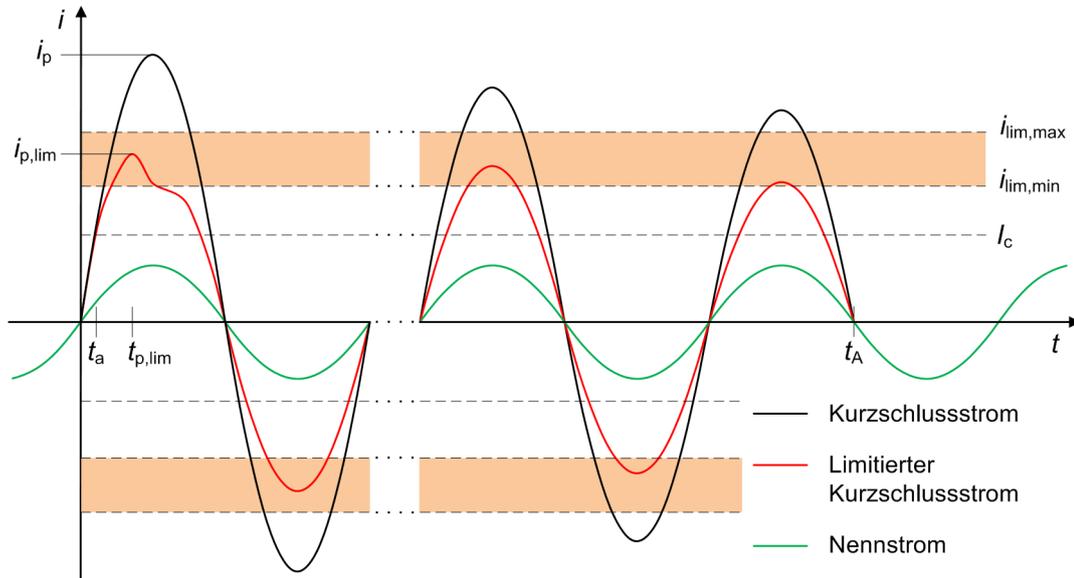
Die Quellenspannung ist durch das Energieversorgungsnetz vorgegeben. Der Nennstrom I_n und die Bemessungs-Ausschaltzeit t_b werden von den Nennwerten der übrigen Betriebsmitteln des Energieversorgungsnetzes bestimmt. Der Quelleninnenwiderstand beeinflusst das Begrenzungsverhalten des Bandleiters (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.3). Der maximale Kurzschlussstrom $I_{lim,max}$ wird durch die mechanische Belastbarkeit der elektrischen Betriebsmittel im Kurzschlusspfad vorgegeben, während der minimale Kurzschlussstrom $I_{lim,min}$ von den Einstellungen des Überstromauslösers bestimmt wird [SFB08].

Die Pausenzeit t' des Leistungsschalters und die minimale Spannung am Verbraucher $U_{n,min}$ sind nur für das Verhalten des Strombegrenzers im normalleitenden Zustand von Bedeutung. Die minimale Spannung am Verbraucher steht in Zusammenhang mit der Erkennung einer Unterspannung durch einen Unterspannungsauslöser. Für die Pausenzeit des Leistungsschalters gelten typische Werte von Leistungsschaltern nach [Ne04].

Die allg. anwendungsspezifischen Vorgaben lassen sich auf wenige, den Bandleiter betreffende Grenzwerte reduzieren. In Abb. 5.3 sind die sich aus den Vorgaben ergebenden elektrischen Größen schematisch dargestellt. Aus den Vorgaben des maximalen und minimalen Kurzschlussstroms ergibt sich ein Toleranzband für den Widerstand des Strombegrenzers, das eingehalten werden muss. Aus der Vorgabe des maximalen begrenzten Kurzschlussstroms $I_{lim,max}$ ergibt sich ein minimaler Modulwiderstand $R_{M,min}$, der während der gesamten Kurzschlussstrombegrenzung nicht unterschritten werden darf. Als minimaler Modulwiderstand $R_{M,min}$ wird der Bandleiterwiderstand $R_{M,Tmin}$ der normalleitenden Schichten bei 77 K angenommen, da im ungünstigsten Fall die Bandleitertemperatur nach dem S-N-Übergang nicht angestiegen ist.

Für den maximalen Modulwiderstand $R_{M,max}$ ergeben sich aus den Vorgaben mehrere Grenzwerte. Während der gesamten Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung darf der begrenzte Kurz-

schlussstrom nicht unter den normativ vorgegebenen Grenzwert $I_{\text{lim,min}}$ sinken. Durch die Erwärmung des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung ist der Bandleiterwiderstand beim Abschalten des Kurzschlussstroms zum Zeitpunkt t_A bei maximaler Bandleitertemperatur T_{max} am höchsten und damit der Kurzschlussstrom am geringsten, woraus sich der erste Grenzwert für den maximalen Modulwiderstand $R_{M,T_{\text{max}}}$ ergibt.



i_p	Stoßkurzschlussstrom	i_n	Nennstrom
$i_{p,\text{lim}}$	Begrenzter Stoßkurzschlussstrom	i_{lim}	Begrenzter Kurzschlussstrom
$i_{\text{lim,min}}$	Minimal zulässiger begrenzter Kurzschlussstrom	$i_{\text{lim,max}}$	Maximal zulässiger begrenzter Kurzschlussstrom
$k_p = \frac{i_p}{i_n}$	Verhältnis des unbegrenzten Kurzschlussstroms	$k_c = \frac{I_c}{i_n}$	Sicherheitsfaktor für den Nennbetrieb
$k_{p,\text{lim}} = \frac{i_{p,\text{lim}}}{i_n}$	Verhältnis des begrenzten Kurzschlussstroms	t_A	Zeitpunkt des Abschaltens des Kurzschlussstromes
t_a	Zeitpunkt des Einsetzens der Kurzschlussstrombegrenzung bei Erreichen des kritischen Stromes	$t_{p,\text{lim}}$	Zeitpunkt des Maximums des begrenzten Kurzschlussstromes

Abb. 5.3: Zusammenfassung verwendeter Bezeichnungen und Verhältnisse elektrischer Größen [Noe98, SFB08]

Die weiteren Grenzwerte für den maximalen Modulwiderstand sind abhängig von den Betriebszuständen nach Abschalten des Kurzschlussstroms. Eine Besonderheit von supraleitenden Strombegrenzern ist die Fähigkeit einen Laststrom auch nach der Kurzschlussstrombegrenzung im normalleitenden Zustand zu tragen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Betriebsmitteln zur Kurzschlussstrombegrenzung, wie mit einem I_s -Begrenzer überbrückte Begrenzungsdrosseln, besitzt ein supraleitender Strombegrenzer die prinzipielle Möglichkeit der selbstständigen Regeneration in den Normalzustand vor der Kurzschlussstrombegrenzung. Nach dem Abschalten

des Kurzschlussstromes zum Zeitpunkt t_A durch einen Leistungsschalter ist zwischen drei Betriebszuständen des normalleitenden Strombegrenzers zu unterscheiden:

1. Tragen eines Laststroms ohne weitere Erwärmung des Bandleiters
2. Rückkühlen des normalleitenden Bandleiters mit Laststrom
3. Rückkühlen des normalleitenden Bandleiters ohne Laststrom.

Um den ersten und zweiten Betriebszustand zu ermöglichen, bei denen der Strombegrenzer nach Abschalten des Kurzschlussstroms nicht vollständig stromlos geschaltet wird, ergeben sich die weiteren Grenzwerte für den maximalen Bandleiterwiderstand. Im ersten Betriebszustand darf der Bandleiter des Moduls die maximale Bandleitertemperatur auch nach längerer Zeit im normalleitenden Zustand und Tragen eines Laststroms nicht überschreiten. Dies bedeutet im Grenzfall ein Gleichgewicht zwischen der Verlustleistung des Moduls $P_{v,M}$ und der abgeführten Leistung an das Kühlmedium bei der Bandleitertemperatur T_A bei Abschalten des Kurzschlussstroms zum Zeitpunkt t_A . Um den Bandleiter im thermischen Gleichgewicht zu halten, darf nach Gl. 5.4 der Widerstand des Moduls $R_M(T_A)$ den Grenzwert $R_{M,TG}$ nicht überschreiten. Entscheidend für den zulässigen Bandleiterwiderstand sind allgemein die Wärmestromdichte $q_w''(T)$ und die Berührungsoberfläche A_K des Bandleiters mit dem Kühlmedium [DSF96, DF96, Fis99].

$$P_{v,M}(T_A) \leq P_{ab}(T_A) \quad [5.3]$$

$$I_M^2 \cdot R_M(T_A) \leq q_w''(T_A) \cdot A \quad [5.4]$$

Für den zweiten Betriebszustand, bei dem der Bandleiter selbst unter Laststrom unter die kritische Temperatur zurückkühlen soll, darf der Widerstand des Moduls nicht über dem Grenzwert $R_{M,TR}$ liegen. Übersteigt die Kühlleistung des Kühlmediums, bei jeder Temperatur T die Verlustleistung des Moduls bei einem Laststrom, sinkt die Temperatur im Bandleiter bis der Bandleiter in den supraleitenden Zustand zurückfällt. Dieser Betriebszustand wird als “Recovery under Load” bezeichnet – das Rückkühlen des strombegrenzenden Moduls unter Laststrom.

Im Gegensatz zum Grenzwert des maximalen Modulwiderstands für das thermische Gleichgewicht $R_{M,TG}$, der nur bei der maximalen Temperatur des Moduls eingehalten werden muss, gilt der Grenzwert des maximalen Modulwiderstandes $R_{M,TR}$ für den gesamten Temperaturbereich zwischen T_{max} und der kritischen Temperatur des Bandleiters T_c . Der maximale Modulwiderstand, bei dem der Bandleiter auch mit einem Laststrom unter T_c rückkühlt, lässt sich nur mit starken Vereinfachungen berechnen, da das Rückkühlverhalten des Bandleiters inhomogen verläuft.

Nach [DSF96, DF96, Fis99] ist die Wärmestromdichte von flüssigem Stickstoff als Kühlmedium, neben der Temperaturdifferenz zwischen dem Bandleiter und dem Kühlmedium, von einer Vielzahl an Randbedingungen, wie Oberflächenbeschaffenheit des Bandleiters und der

zugeführten Verlustleistung, abhängig. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Rückkühlung des Bandleiters des Moduls, wodurch die Kühlleistung am Bandleiter mit beeinflusst wird. Maßgeblich für die Bedingung des Rückkühlens ist damit die Einhaltung des maximalen Widerstandsbelags des Bandleiters, um die Rückkühlung an jedem Abschnitt des Bandleiters eines strombegrenzenden Moduls zu gewährleisten.

$$P_{v,M}(T) < P_{ab}(T) \quad [5.5]$$

$$I_M^2 \cdot R_M'(T) < q_w''(T) \cdot A \quad [5.6]$$

Die allg. anwendungsspezifische Vorgabe der minimalen Spannung $U_{n,min}$ am Verbraucher ist nur für den Betrieb nach der Kurzschlussstrombegrenzung von Bedeutung, solange sich der Bandleiter im normalleitenden Zustand befindet. Die minimale Spannung definiert einen weiteren maximalen Bandleiterwiderstand $R_{M,Umin}$ für die Betriebszustände 1 und 2 nach dem Abschalten des Kurzschlussstroms bei weiter fließendem Laststrom. In Abb 5.4 ist das einphasige Ersatzschaltbild eines Energieversorgungsnetzes mit einem supraleitenden Strombegrenzer zu sehen.

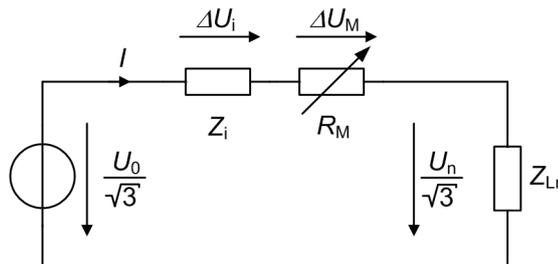


Abb. 5.4: Vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild zur Berechnung von Kurzschlussströmen in Energieversorgungsnetzen – Ohne den Unterspannungsschutz auszulösen, darf der Spannungsfall über dem normalleitenden Strombegrenzer 15 % der Nennspannung nicht überschreiten.

Nach dem Abschalten des Kurzschlussstroms durch einen Leistungsschalter befindet sich der Bandleiter im normalleitenden Zustand. Die Spannung U_L am Verbraucher darf nicht unter 85 % der Nennspannung abfallen ($U_{n,min} \geq 0,85 \cdot U_n$), um den Unterspannungsschutz nicht auszulösen [OO04]. Aus der Maschengleichung der Ersatzschaltung in Abb. 5.4 folgt für den maximalen Spannungsfall über dem normalleitenden Strombegrenzer

$$\Delta U_{SSB} = \frac{U_0}{\sqrt{3}} - \Delta U_i - \frac{0,85 \cdot U_n}{\sqrt{3}} = \frac{0,15 \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad [5.7]$$

und mit Gl. 5.1 skaliert auf ein einzelnes strombegrenzendes Modul

$$\Delta U_M = \frac{U_{0,ers}}{\sqrt{3}} - \Delta U_{i,ers} - \frac{0,85 \cdot U_{n,ers}}{\sqrt{3}} = \frac{0,15 \cdot U_{n,ers}}{\sqrt{3}}. \quad [5.8]$$

Daraus ergibt sich für den maximalen Widerstand $R_{SSB,max}$ des normalleitenden Strombegrenzers

$$R_{SSB,max} = \frac{0,15 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = 0,15 \cdot Z_{L,n} \quad [5.9]$$

und für den maximalen Widerstand $R_{M,Umin}$ des normalleitenden Moduls

$$R_{M,Umin} = \frac{0,15 \cdot U_{n,ers}}{\sqrt{3} \cdot I_{n,ers}} = 0,15 \cdot Z_{L,ners} \quad [5.10]$$

Als Grenzwert für den maximalen Modulwiderstand $R_{M,max}$ ist von den verschiedenen maximalen Modulwiderständen $R_{M,Umin}$, $R_{M,TR}$, $R_{M,TG}$ und $R_{M,Tmax}$ der geringste Widerstandswert für den Entwurf eines strombegrenzenden Moduls zu wählen.

Neben den allg. anwendungsspezifischen Vorgaben muss die Belastungsgrenze des Bandleiters, die sich für jeden Bandleiter als individuelle maximale Bandleitertemperatur während einer Kurzschlussstrombegrenzung ausdrücken lässt, eingehalten werden (vgl. Kapitel 4.2.3). Mit dem theoretischen Bandleitermodell lässt sich die notwendige Bandleiterlänge in Abhängigkeit der Dicke der Deckschicht berechnen, bei der die maximale Bandleitertemperatur noch eingehalten wird. Mit der Festlegung der maximalen Bandleitertemperatur werden die Vorgaben der Anschlussbedingungen Quellenspannung U_0 und Quelleninnenimpedanz Z_i sowie die Bemessungs-Ausschaltzeit t_b berücksichtigt. Als letzte, nicht notwendige Vorgabe ist der ökonomische Aspekt beim Entwurf eines supraleitenden Strombegrenzers zu berücksichtigen. So sollte die Länge des Bandleiters minimiert werden. Kürzere Bandleiter bedeuten geringere Investitionskosten für den Bandleiter selbst und durch minimierte Wechselstromverluste minimierte Investitionskosten für die Kälteanlage des Strombegrenzers (vgl. Kapitel 6.4).

5.1.2 Entwurfsgang

Unter Berücksichtigung der allg. anwendungsspezifischen Vorgaben, sowie der möglichen Betriebszustände nach Abschalten des Kurzschlussstroms, lässt sich ein Entwurfsgang eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls ableiten. Berücksichtigt beim Entwurf eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls sind das Rückkühlverhalten und ökonomische Aspekte. In Abb. 5.5 ist ein allgemeiner Entwurfsgang für ein supraleitendes, resistiv strombegrenzendes Modul zu sehen.

Um die, aus den allg. anwendungsspezifischen Vorgaben, abgeleiteten Grenzwerte für die minimalen und maximalen Bandleiterwiderstände einzuhalten, stehen für den Entwurf und die Konstruktion eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls eine Reihe von Parameter zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.3). Der Entwurfsgang eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls wird im Folgenden am Beispiel eines Moduls für einen Strombegrenzer in der 10 kV-Mittelspannungsebene eines typischen Energieversorgungsnetzes erläutert.

Allgemeine Vorgaben, die nicht konstruktiv beeinflussbar sind

- U_0 = Quellenspannung
- Z_i = Quelleninnenimpedanz
- t_A = Dauer der Begrenzungszeit
- I_n = Nennstrom
- $k_{p,lim}$ = Begrenzungsverhältnis

Konstruktiv beeinflussbare Parameter

(T_{max} = Maximale Bandleiteremperatur)

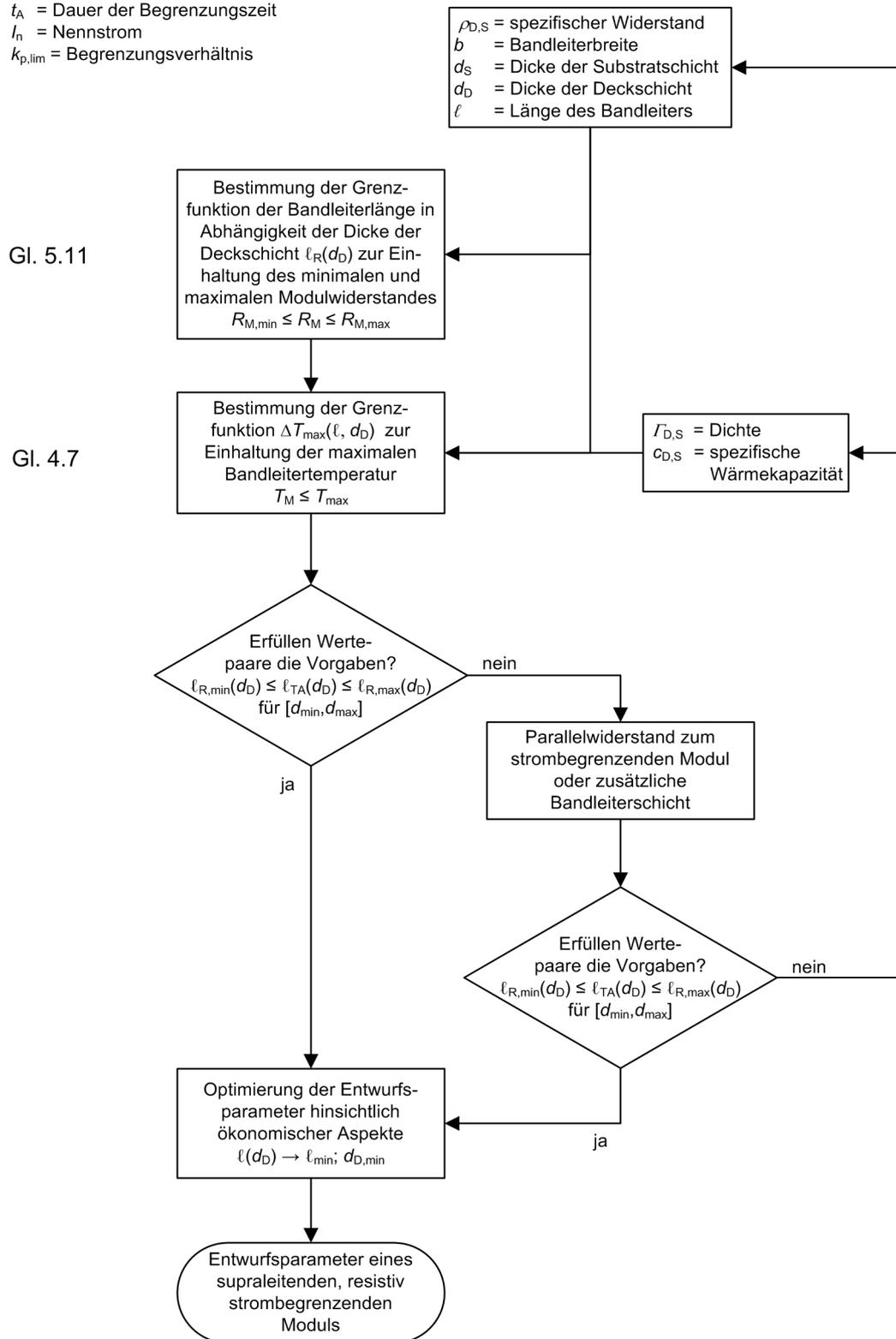


Abb. 5.5: Entwurfsgang eines supraleitenden resistiv strombegrenzenden Moduls unter Berücksichtigung allg. anwendungsspezifischer Vorgaben.

Beispielrechnung und Diskussion

Angenommen wird ein modular aufgebauter supraleitender Strombegrenzer mit 10×10 identischen Modulen¹ in einem 10 kV-Energieversorgungsnetz. Mit der Skalierung des Energieversorgungsnetzes nach Gl. 5.1 bleibt die Quelleninnenimpedanz Z_i unverändert und die Quellenspannung $U_{0,ers}$ beträgt 1/10 von U_0 . Als typischer Wert für ein 10 kV-Energieversorgungsnetz wird eine Quelleninnenimpedanz von Z_i von 300 mΩ angenommen [Bac09]. Die zulässige Bandleitertemperatur T_{max} wird auf 400 K festgelegt. Für die Beispielrechnung wird Betriebszustand 3 – ohne Laststrom – aus Kapitel 5.1.1 angenommen. Die sich aus den allg. anwendungsspezifischen Vorgaben ergebenden Grenzwerte für ein 10 kV-Energieversorgungsnetz sind in Tab. 5.1 zusammengefasst.

Min. Modulwiderstand $R_{M,Tmin}$	300 mΩ	Max. Modulwiderstand $R_{M,Tmax}$	0,53 Ω
Min. Bandleitertemperatur T_{min}	77 K	Max. Bandleitertemperatur T_{max}	400 K
Dauer des Kurzschlusses ($t_0 - t_A$)	80 ms	Quelleninnenimpedanz Z_i	300 mΩ

Tab. 5.1: Allg. anwendungsspezifische Vorgaben für ein supraleitendes, resistiv strombegrenzendes Modul in der 10 kV-Mittelspannungsebene

Die Grenzfunktionen der Bandleitertlänge l in Abhängigkeit der Dicke der Deckschicht d_D lassen sich für die minimalen und maximalen Modulwiderstände $R_{M,Tmin}$ und $R_{M,Tmax}$ mit den, aus den allg. anwendungsspezifischen Vorgaben abgeleiteten Grenzwerten berechnen. Für die Grenzfunktionen des minimalen und maximalen Modulwiderstandes $l_R(d_D)$ gilt:

$$l_{R,min/max}(d_D) = R_{M,Tmin/Tmax} \cdot b \cdot \left(\frac{d_D}{\rho_D(T)} + \frac{d_S}{\rho_S(T)} \right) \quad [5.11]$$

Für einen gültigen Entwurf müssen alle Grenzwerte eingehalten werden. Die möglichen Wertepaare aus der Dicke der Deckschicht und der Bandleitertlänge, die die Grenzwerte einhalten, lassen sich in einem Diagramm grafisch ermitteln. In Abb. 5.6 sind die Grenzwerte für den minimalen und den maximalen Modulwiderstand $R_{M,Tmin}$ und $R_{M,Tmax}$ als Grenzfunktion der Bandleitertlänge und der Dicke der Deckschicht für einen typischen Bandleiter² aufgetragen. Zu bemerken ist, dass der Entwurfsgang bei direkter Betrachtung unabhängig vom Nennstrom des Moduls und damit vom kritischen Strom des Bandleiters ist. Lediglich die allgemeinen charakteristischen Größen (vgl. Kapitel 3) beeinflussen das Begrenzungsverhalten des Bandleiters bei gegebenen Anschlussbedingungen. Besitzt der Bandleiter einen geringen kritischen Strom, müssen mehrere Bandleiter parallelgeschaltet werden, um den Nennstrom zu tragen. Somit ver-

¹Die Modulanzahl in dieser Beispielrechnung wurde gewählt, um mit den Ergebnissen des Tests eines strombegrenzenden Moduls in Kapitel 5.3 vergleichbar zu sein.

²Für die Grenzfunktionen wurden die spezifischen und geometrischen Größen von Bandleiter B16 zugrunde gelegt.

ändert sich das Widerstandsverhältnis zwischen Parallelimpedanz und den strombegrenzenden Modulen. Der Nennstrom beeinflusst als Folge davon indirekt das Begrenzungsverhalten eines strombegrenzenden Moduls.

Die rot schraffierten Bereiche in Abb. 5.6 markieren für jede gewählte Dicke der Deckschicht die möglichen Bandleiterlängen, bei denen mindestens ein geforderter Grenzwert für das strombegrenzende Modul eingehalten wird. Wertepaare im vollständig rot hinterlegten Bereich halten weder die Vorgabe des minimalen noch des maximalen Modulwiderstandes ein. Die unterschiedlichen Steigungen der Grenzfunktionen resultieren aus den unterschiedlichen Bandleitertemperaturen, bei denen der minimale und maximale Bandleiterwiderstand definiert ist, in Verbindung mit dem hohen RRR der Deckschicht aus Silber. Dies führt dazu, dass die Grenzfunktion des minimalen Modulwiderstandes $R_{M,Tmin}$ über der Grenzfunktion des maximalen Modulwiderstandes $R_{M,Tmax}$ liegt. Lediglich bei sehr geringen Dicken der Deckschicht unter 160 nm werden beide Vorgaben erfüllt.

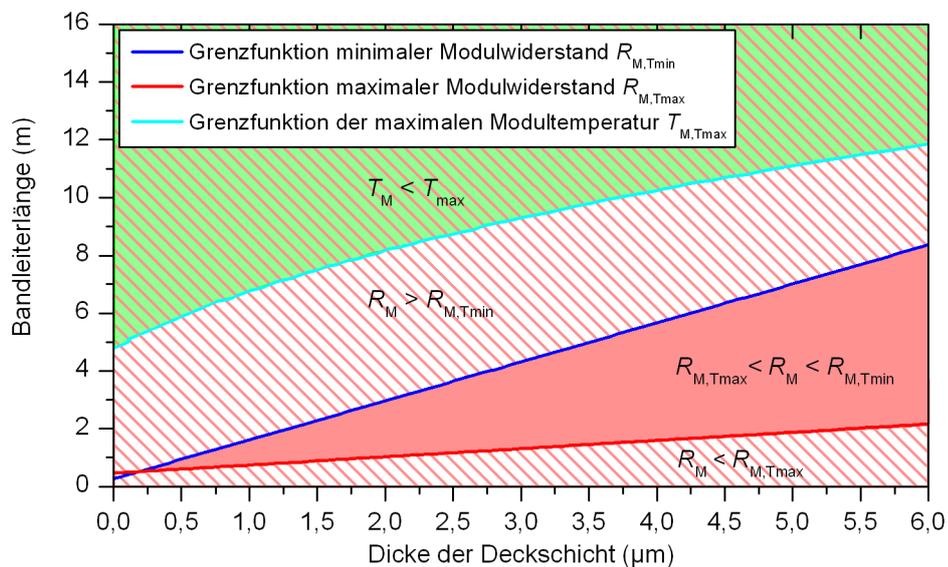


Abb. 5.6: Grenzfunktionen für den Entwurf eines strombegrenzenden Moduls – Ein Modul mit dem Bandleiter B16 kann die allg. anwendungsspezifischen Vorgaben eines typischen Energieversorgungsnetzes ohne zusätzliche Beschaltung nicht erfüllen. Es existiert kein Wertepaar aus Bandleiterlänge und Dicke der Deckschicht, das die Vorgaben der maximalen Bandleitertemperatur und des minimalen und maximalen Bandleiterwiderstands erfüllt.

Als weitere Vorgabe darf die maximale Bandleitertemperatur während der Kurzschlussstrombegrenzung nicht überschritten werden. Wie in Kapitel 4.3 behandelt, beeinflusst die Bandleiterlänge und die Dicke der Deckschicht den Temperaturanstieg des Bandleiters während der Kurzschlussstrombegrenzung. Mit Vorgabe einer maximalen Bandleitertemperatur bzw. maximalen Modultemperatur T_M von 400 K ergänzt sich der Entwurfsgang um eine weitere Grenzfunktion $l_T(d_D)$ der Bandleiterlänge als Funktion der Dicke der Deckschicht. In Abb. 5.6 ist die Grenzfunktion der maximalen Modultemperatur $l_T(d_D)$ aufgetragen. Alle Wertepaare, bei denen die

maximale Modultemperatur nicht überschritten wird, befinden sich in dem grün hinterlegten Bereich oberhalb der Grenzfunktion der maximalen Modultemperatur. Die Grenzfunktionen in Abb. 5.6 zeigen, dass es keine Wertepaare gibt, die alle Vorgaben erfüllen. Mit dem angenommenen Bandleiter B16 ist somit unter Beachtung der allg. anwendungsspezifischen Vorgaben eines 10 kV-Energieversorgungsnetzes kein gültiger Entwurf eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls ohne zusätzliche Beschaltung möglich.

Um die Grenzfunktionen des minimalen und maximalen Modulwiderstandes und damit den gemeinsamen Schnittpunkt hin zu größeren Dicken der Deckschicht zu verschieben und damit den Bereich erlaubter Wertepaare zu vergrößern, existieren mathematisch prinzipiell zwei Möglichkeiten: Verändern der Steigung der Grenzfunktionen und/oder Ändern der Achsenabschnitte. Durch Umformen von Gl. 5.11 in die Achsenabschnittsform von Gl. 5.12 verdeutlicht sich der Einfluss der physikalischen Größen auf die Steigung und den Achsenabschnitt der Grenzfunktionen des minimalen und maximalen Modulwiderstandes. Bei vorgegebenem Modulwiderstand und Bandleiterbreite lässt sich die Steigung der Grenzfunktion nur über den spezifischen Widerstand der Deckschicht $\rho_D(T)$ verändern. Der Achsenabschnitt ist abhängig von der Dicke d_S und dem spezifischen Widerstand des Substrats $\rho_S(T)$.

$$l_R(d_D) = \frac{R_M}{\rho_D(T)} \cdot d_D \cdot b + \frac{R_M \cdot b \cdot d_S}{\rho_S(T)} \quad [5.12]$$

Für einen erlaubten Entwurf müssen die Grenzfunktionen durch konstruktive Maßnahmen verändert werden. Eine praktikable Möglichkeit, die Grenzfunktionen zu verändern, ist das Einführen einer weiteren Schicht auf dem Bandleiter. Besteht die zusätzliche Schicht aus einem reinem Metall mit einem hohen RRR, führt diese zusätzliche Schicht zu einer Anhebung des Achsenabschnitts und verschiebt den Schnittpunkt hin zu größeren Dicken der Deckschicht. Nachteilig ist die notwendig größere Bandleiterlänge, um die Vorgaben des minimalen Modulwiderstandes und der maximalen Bandleitertemperatur mit einer zusätzlichen Schicht einzuhalten. Das Aufbringen einer zusätzlichen Schicht erfordert bei der Herstellung des Bandleiters sein individuelles Anpassen an die unterschiedlichen Vorgaben der Energieversorgungsnetze, wodurch der Vorteil konfektionierter Module mit standardisierten Bandleitern verloren geht.

Mit einer externen Impedanz, parallel geschaltet zum strombegrenzenden Modul, lassen sich ebenfalls die Grenzfunktionen verschieben. Mit einer externen Parallelimpedanz bleiben die Vorteile konfektionierter Module mit standardisierten Bandleitern erhalten. Zudem können über die Parallelimpedanz die Begrenzungseigenschaften des strombegrenzenden Moduls nachträglich an veränderte Vorgaben des jeweiligen Energieversorgungsnetzes angepasst werden. In Abb. 5.7 sind die Grenzfunktionen mit einer Impedanz parallel zum strombegrenzenden Modul zu sehen.

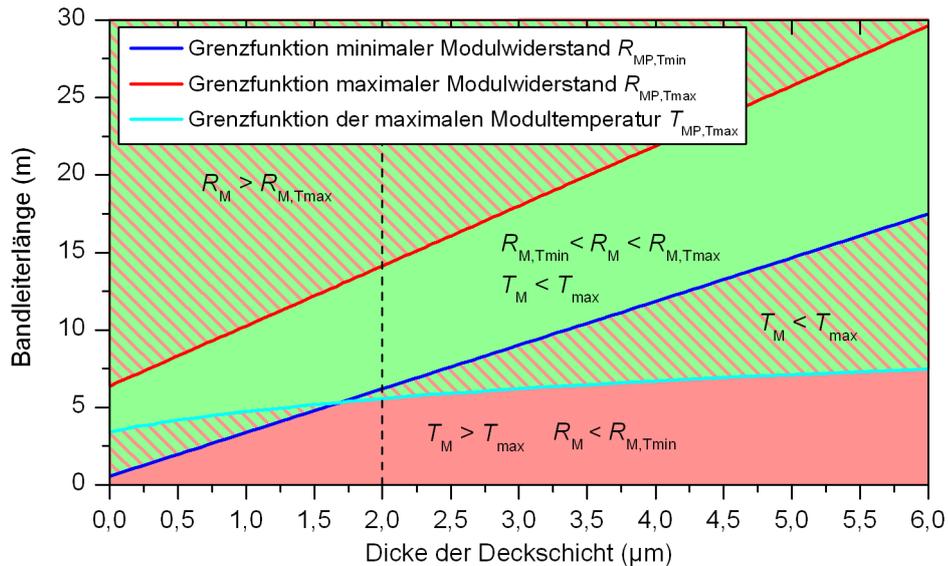


Abb. 5.7: Grenzfunktionen für den Entwurf eines strombegrenzenden Moduls mit einer Parallelimpedanz – Die Wertepaare in dem grün hinterlegten Bereich erlauben einen gültigen Entwurf eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls in einem Strombegrenzer mit einer Matrix aus 10×10 Modulen bei einer Spannung von 10 kV und einem Nennstrom von max. 1900 A. Die gestrichelte Linie markiert die geringste sinnvolle Dicke der Deckschicht eines Bandleiters.

Die Grenzfunktion des maximalen Modulwiderstands liegt nun für alle Dicken der Deckschicht bei höheren Bandleitertlängen, als die Grenzfunktion des minimalen Modulwiderstandes. Durch den günstigen Einfluss einer Parallelimpedanz auf die Erwärmung des Bandleiters verschiebt sich zudem die Grenzfunktion der maximalen Bandleitertemperatur hin zu geringeren Bandleitertlängen. In dem grün hinterlegten Bereich oberhalb der Grenzfunktion der maximalen Bandleitertemperatur und des minimalen Bandleiterwiderstandes befinden sich alle Wertepaare aus Bandleitertlänge und Dicke der Deckschicht, bei denen alle Grenzwerte eingehalten werden. Mit den Wertepaaren in den übrigen, schraffierten Bereichen ist ebenfalls kein gültiger Entwurf eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls möglich.

Bei einer Parallelimpedanz, die bei einem modular aufgebauten Strombegrenzer bezogen auf ein Modul geringer ist, als der maximale Modulwiderstand $R_{M,Tmax}$, verliert die Grenzfunktion des maximalen Modulwiderstandes an Bedeutung. Bei Modulen mit einer ohnehin geringen thermischen Belastung ist es günstiger, den Parallelwiderstand hoch zu wählen, um die Bandleitertlänge gering zu halten.

Unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte ist das Wertepaar mit der geringsten Bandleitertlänge und Dicke der Deckschicht zu wählen. Mit einer externen Parallelimpedanz lässt sich das strombegrenzende Modul sehr hochohmig und damit materialsparend auslegen. Die Vorgaben des minimalen und maximalen Begrenzungswiderstandes während der Kurzschlussstrombegrenzung werden bei einem hochohmigen Modulwiderstand durch die geringe Parallelimpedanz eingehalten.

5.1.3 Zusammenfassung

Bei dem Entwurf eines strombegrenzenden Moduls müssen allg. anwendungsspezifische Vorgaben des Energieversorgungsnetzes eingehalten werden. Am Beispiel eines Entwurfs für ein supraleitendes, resistiv strombegrenzenden Modul eines modular aufgebauten Strombegrenzers, mit einer Matrix von 10×10 Modulen in der 10 kV-Mittelspannungsebene mit einem Nennstrom von maximal 1900 A wurden praktikable konstruktive Maßnahmen oder Veränderungen der physikalischen Eigenschaften des Bandleiters selbst zur Einhaltung der allg. anwendungsspezifischen Vorgaben erläutert.

Es wurde gezeigt, dass mit einem typischen YBCO-Bandleiter ohne zusätzliche Stabilisierung, wie z.B. einer Parallelimpedanz zu dem Bandleiter, die allg. anwendungsspezifische Vorgaben eines typischen Energieversorgungsnetzes in der Mittelspannungsebene nicht eingehalten werden können. Das Aufbringen zusätzlicher Schichten auf den Bandleiter, um diese Vorgaben zu erfüllen, ist unter ökonomischen Aspekten zu vermeiden. Sinnvoll ist die Verwendung einer Impedanz parallel zum strombegrenzenden Modul. Die Parallelimpedanz ermöglicht die Verwendung standardisierter Bandleiter zur ökonomisch sinnvollen Konfektionierung von strombegrenzenden Modulen. Darüber hinaus lässt sich bei Verwendung einer Parallelimpedanz das normalleitende Modul vergleichsweise hochohmig und damit mit einer geringen Bandleiterlänge auslegen.

5.2 Test von strombegrenzenden Modulen unter Laborbedingungen

Die Art, mit der ein strombegrenzendes Modul aus einem Bandleiter hergestellt wird, hat Auswirkungen auf das Begrenzungsverhalten und die Wechselstromverluste während des Nennbetriebs im supraleitenden Zustand. Supraleitende, resistiv strombegrenzende Module werden bevorzugt aus langen Bandleiterstücken hergestellt, um die Anzahl von normalleitenden Verbindern zwischen den Modulen und damit die Verluste zu minimieren. Eine gute Methode, lange Bandleiterstücke zu verarbeiten, ist es, sie zu sogenannten Pancake-Spulen spiralförmig aufzuwickeln [KSW08]. Das spiralförmige Aufwickeln des Bandleiters ermöglicht eine sehr kompakte Bauweise und damit eine sehr hohe Energiedichte in einem strombegrenzenden Modul, ohne den Bandleiter zu zertrennen. Kurze Bandleiterstücke parallel anzuordnen, ist eine weitere Möglichkeit, ein strombegrenzendes Modul aus einem Bandleiter herzustellen [Haz07, LWH08]. Der Nachteil dieser Methode ist die notwendige hohe Anzahl an normalleitenden Verbindern zwischen den kurzen Bandleiterstücken, die die Verluste des Moduls im Nennbetrieb signifikant erhöhen.

Für die Wicklung einer spiralförmigen Spule gibt es mehrere Konzepte. Um die Auswirkungen des Wickelkonzepts der Spiralspule auf das Begrenzungsverhalten und die Widerstandsverteilung in den Sektionen eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls zu untersu-

chen, wurden zwei strombegrenzende Module mit unterschiedlichen Wickelkonzepten – monofilare und bifilare Spiralwicklung – hergestellt und unter Laborbedingungen ohne die Nachbildung eines Energieversorgungsnetzes getestet.

In Abb. 5.8 sind die beiden Wickelkonzepte der untersuchten Module schematisch dargestellt. Die Spule des einen Moduls war entsprechend Abb. 5.8a monofilar, von der Außenseite zur Innenseite gewickelt. Die Spule des zweiten Moduls war entsprechend Abb. 5.8b bifilar gewickelt, mit einer Umkehrung der Wickelrichtung im Innern der Spule. Die Bandleiterlänge betrug bei beiden Modulen 10 m.

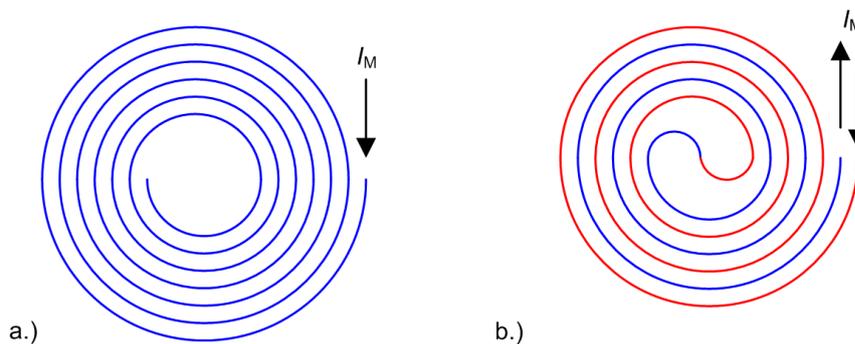


Abb. 5.8: Mögliche Wicklungen spiralförmiger Spulen – a.) Bei einer einfach gewickelten spiralförmigen Spule nimmt die magnetische Feldstärke mit abnehmendem Radius zu b.) Die magnetische Feldstärke minimiert sich durch die antiparallele Stromrichtung in der bifilar gewickelten Spiralspule und hat keinen monoton radiusabhängigen Gradienten.

Die Prüflinge wurden über einen geringen Vorwiderstand und einem Thyristorschalter zum Aufschalten des Kurzschlussstroms an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen. Der Testkreis ist identisch mit dem Testkreis zur Untersuchung des Begrenzungsverhalten in Kapitel 4. Das Ersatzschaltbild ist in Abb. 4.7 sehen. Als Wechselspannungsquelle diente der selbe Transformator wie für die Untersuchung des Begrenzungsverhaltens von YBCO-Bandleitern. Für die Untersuchung des Begrenzungsverhaltens der strombegrenzenden Module wurde die Ausgangsspannung der Wechselspannungsquelle U_{sek} im unbelasteten Zustand auf 1000 V eingestellt. Der Wert des Vorwiderstandes und der Quelleninnenimpedanz der Wechselspannungsquelle Z_T betrug ca. 300 m Ω .

5.2.1 Monofilare Spiralwicklung

Um das Begrenzungsverhalten eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls zu untersuchen, wurde ein Modul mit einer monofilaren Spiralwicklung des mit 10 m langen Teilstücken verfügbaren Bandleiters B16 hergestellt. Eine monofilare Spiralwicklung ist eine einfache und praktikable Art, einen langen Bandleiter platzsparend anzuordnen. In Abb. 5.9 ist das strombegrenzende Modul mit der monofilaren Spiralwicklung zu sehen. Der Bandleiter wurde auf einer Halterung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) aufgewickelt. Um Kurzschluss

zwischen den einzelnen Windungen zu vermeiden, wurde eine 50 μm dicke Kapton®-Folie parallel zum Bandleiter verarbeitet. Der konstruktive Entwurf des Moduls ermöglicht mit einem großen Abstand zwischen den Windungen die Untersuchung des Begrenzungsverhaltens einzelner, 1 m langer Sektionen durch das Anbringen von Kontakten zur Spannungsmessung während der Kurzschlussstrombegrenzung.

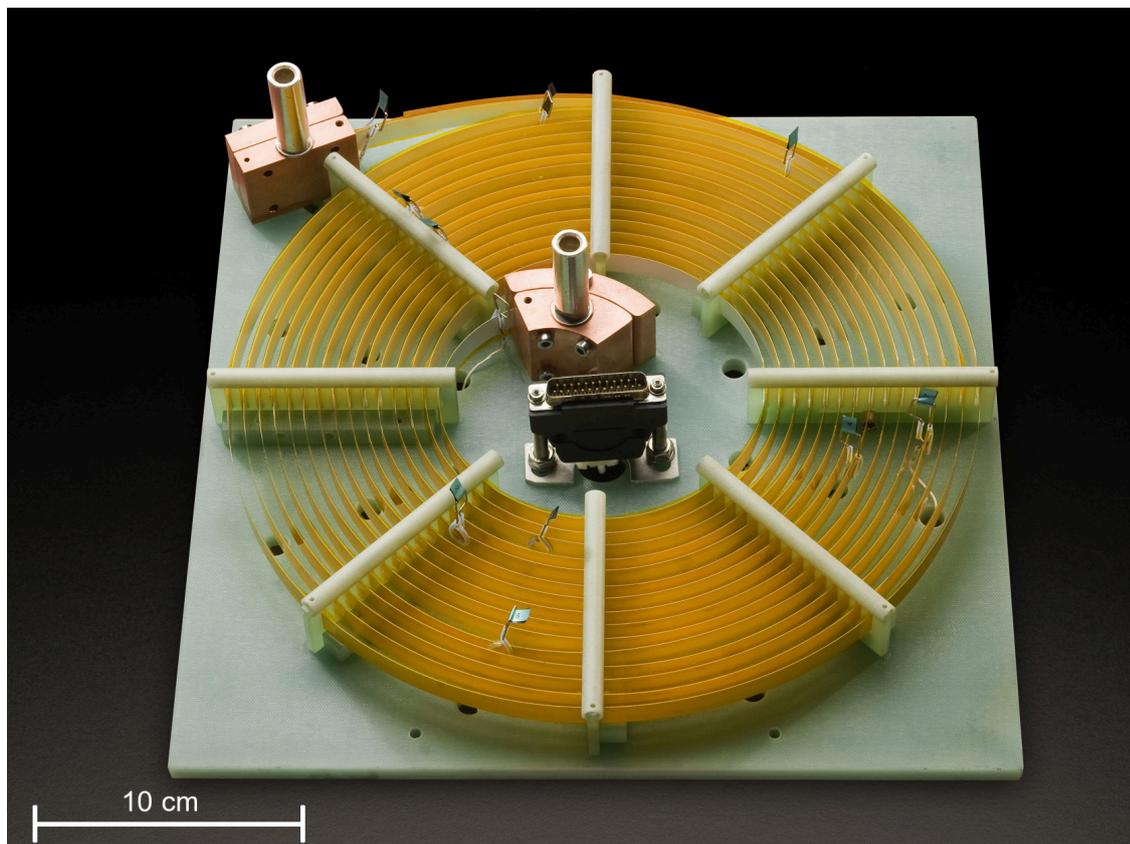


Abb. 5.9: Supraleitendes, resistiv strombegrenzendes Modul mit monofilarer Spiralwicklung eines YBCO-Bandleiters – Der Abstand zwischen den Windungen ermöglichte die Kontaktierung zur Spannungsmessung in 1 m langen Sektionen entlang des Bandleiters.

Das durch die monofilare Spiralwicklung verstärkte Magnetfeld wirkt sich nachteilig auf die supraleitenden Eigenschaften des Bandleiters und damit auf die Höhe des möglichen Nennstroms des Moduls aus (vgl. Kapitel 2.1). Besonders in den inneren Sektionen der Spirale ist der Bandleiter einem hohen Magnetfeld ausgesetzt, verglichen mit dem Eigenmagnetfeld eines nicht gewickelten Bandleiters. Die magnetische Flussdichte an der innersten Sektion der Spirale beträgt bei einem Strom von 200 A ca. 30 mT. Durch die Empfindlichkeit der supraleitenden Schicht des Bandleiters auf Magnetfelder, reduziert sich der Strom im Bandleiter der innersten Sektion des Moduls um ca. 15 %. Diese Werte für den kritischen Strom des Moduls entsprechen den Ergebnissen von Messungen der Magnetfeldverträglichkeit an vergleichbaren YBCO-Bandleitern [GSR].

Die magnetische Flussdichte sinkt mit zunehmendem Radius der Spirale. Dies führt zu einer inhomogenen Verteilung des kritischen Stromes in den einzelnen Sektionen der Spiralwicklung. Das arithmetische Mittel des kritischen Stroms der einzelnen Sektionen im Modul wurde mit dem $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -Kriterium auf 241 A über eine Messlänge von 1 m bestimmt, wobei die innerste Sektion einen kritischen Strom von 230 A und die äußerste Sektion 250 A aufweist. In Abb. 5.10 ist eine beispielhafte Messung zur Bestimmung des kritischen Stromes des monofilar gewickelten Moduls zu sehen. Wie zu erwarten, sinkt der kritische Strom in den inneren Sektionen der Spule durch die höhere Magnetfeldstärke. In Abb. 5.10 ist zu sehen, dass zuerst die innerste Sektion 1 mit dem geringsten kritischen Strom in den normalleitenden Zustand übergeht, der Reihe nach gefolgt von den übrigen Sektionen in Abhängigkeit des steigenden Spulenradius.

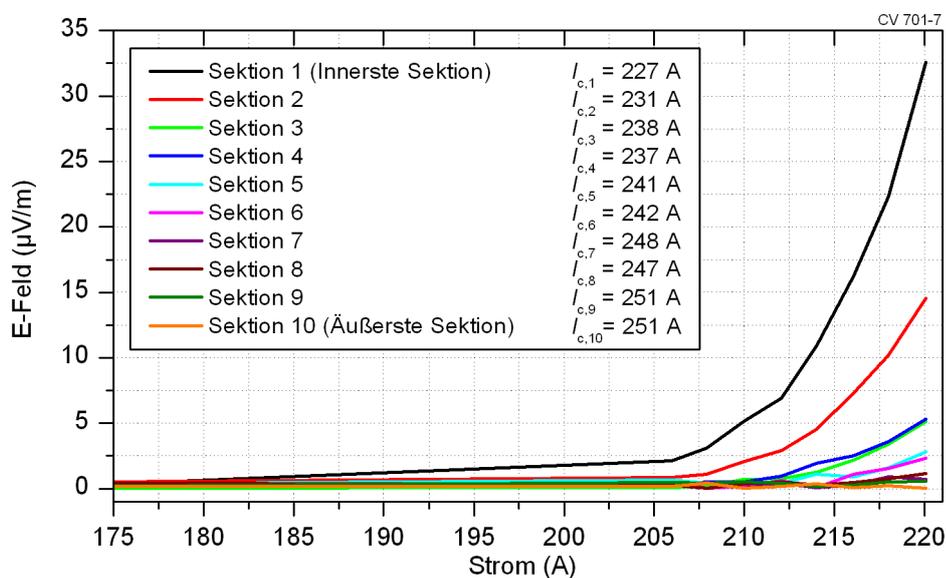


Abb. 5.10: Bestimmung des kritischen Stromes in einem monofilar gewickelten, resistiv strombegrenzenden Modul – Die Sektionen gehen entsprechend ihrer Position in der Spiralspule der Reihe nach von der innersten Sektion zur äußersten in den normalleitenden Zustand über.

Für das Begrenzungsverhalten des Moduls ist die Inhomogenität des kritischen Stromes entlang des Bandleiters durch die ungleiche Magnetfeldstärke in den einzelnen Sektionen von geringer Bedeutung. In Abb. 5.11a ist der Verlauf des Modulstroms und die innere Widerstandsverteilung über die Spannungsverläufe der einzelnen Sektionen des Moduls während der gesamten Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung zu sehen. Abb. 5.11b zeigt den S-N-Übergang zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung. Zwar zeigt der Spannungsverlauf zu Beginn des S-N-Übergangs einen zeitlich leicht verzögerten Spannungsanstieg in den äußeren Sektionen mit einer geringeren Magnetfeldstärke, die damit verbundene unterschiedliche Widerstandsverteilung führt jedoch zu keinem signifikant unterschiedlichen Temperaturanstieg während der Kurzschlussstrombegrenzung. Trotz der stark inhomogenen Verteilung des kritischen Stromes in den Sektionen des monofilaren strombegrenzenden Moduls zeigen die Sektionen ein nahezu homogenes Begrenzungsverhalten.

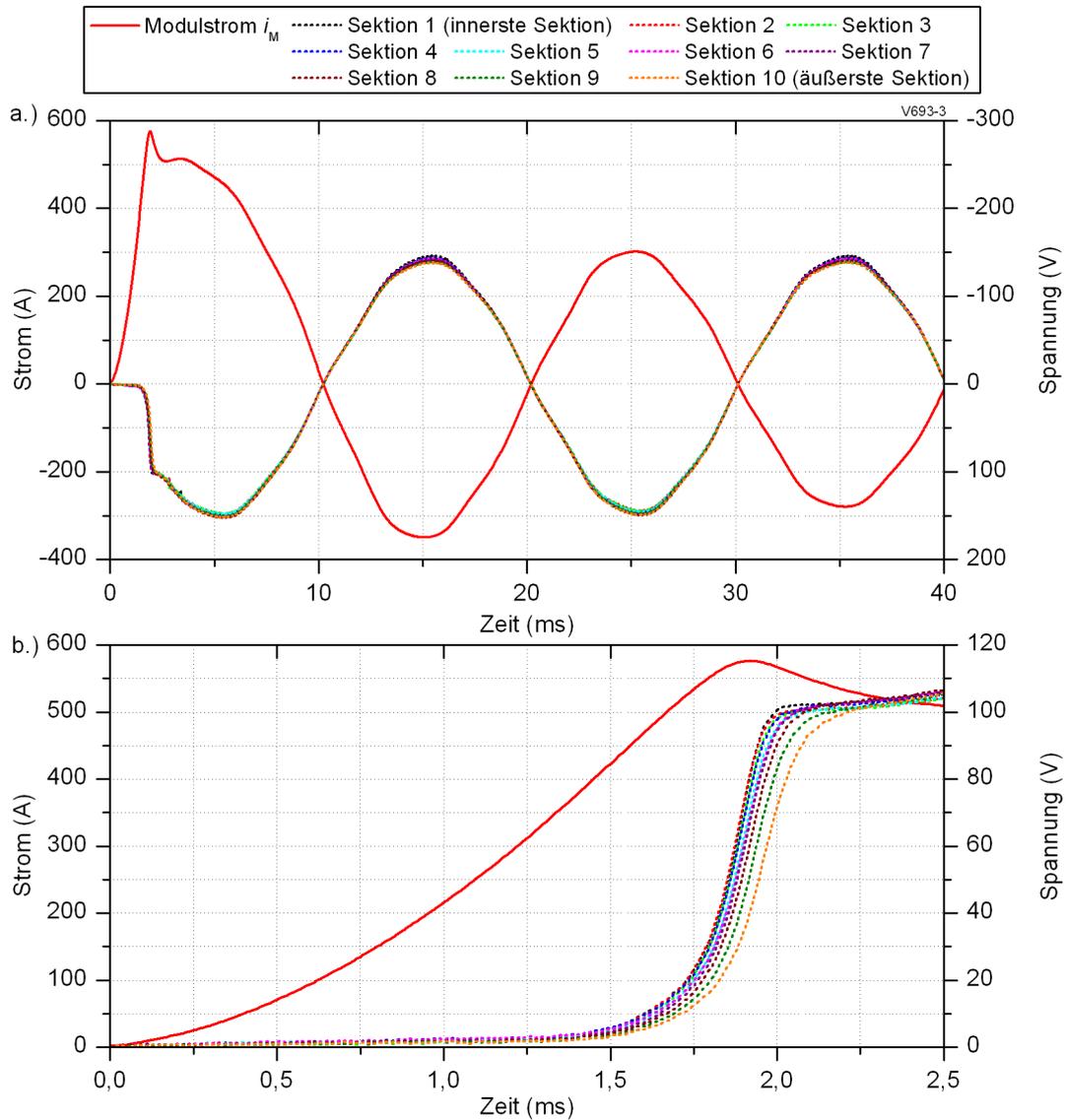


Abb. 5.11: Begrenzungsverhalten des monofilar gewickelten resistiv strombegrenzenden Moduls – a.) Widerstandsverteilung zwischen den Sektionen während der gesamten Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung b.) Widerstandsverteilung in den einzelnen Sektionen des strombegrenzenden Moduls zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung

5.2.2 Bifilare Spiralwicklung

Bei einer bifilar gewickelten Spule ist die Stromrichtung bei benachbarten Windungen antiparallel, wodurch sich das resultierende Magnetfeld der Spule stark reduziert. Negative Einflüsse auf den kritischen Strom durch eine ungleiche Verteilung des Magnetfelds in dem Modul werden durch die bifilare Wicklung des Bandleiters ebenfalls deutlich vermindert. In Abb. 5.12 ist das untersuchte strombegrenzende Modul mit einer bifilaren Wicklung des Bandleiters zu sehen. In der Mitte des Wickelkörpers aus GFK sind die Umlenkrollen für den Bandleiter zu sehen und im Vordergrund die beiden Kontakte für die Stromanschlüsse. Das bifilar gewickelte Modul wurde im gleichem Testkreis unter den gleichen Bedingungen wie das monofilare Modul untersucht. Im Gegensatz zu dem monofilaren Modul mit der weiträumigen Spiralwicklung, die die Befestigung der Messleitungen zur Spannungsmessung über den einzelnen Sektionen mit Federkontakten ermöglicht, wurden bei diesem bifilaren Modul die Messleitungen zur Spannungsmessung direkt auf den Bandleiter angelötet, um eine möglichst kompakte Spule zu erhalten. In Abb. 5.12 sind einige Messleitungen zur Spannungsmessung zu sehen.

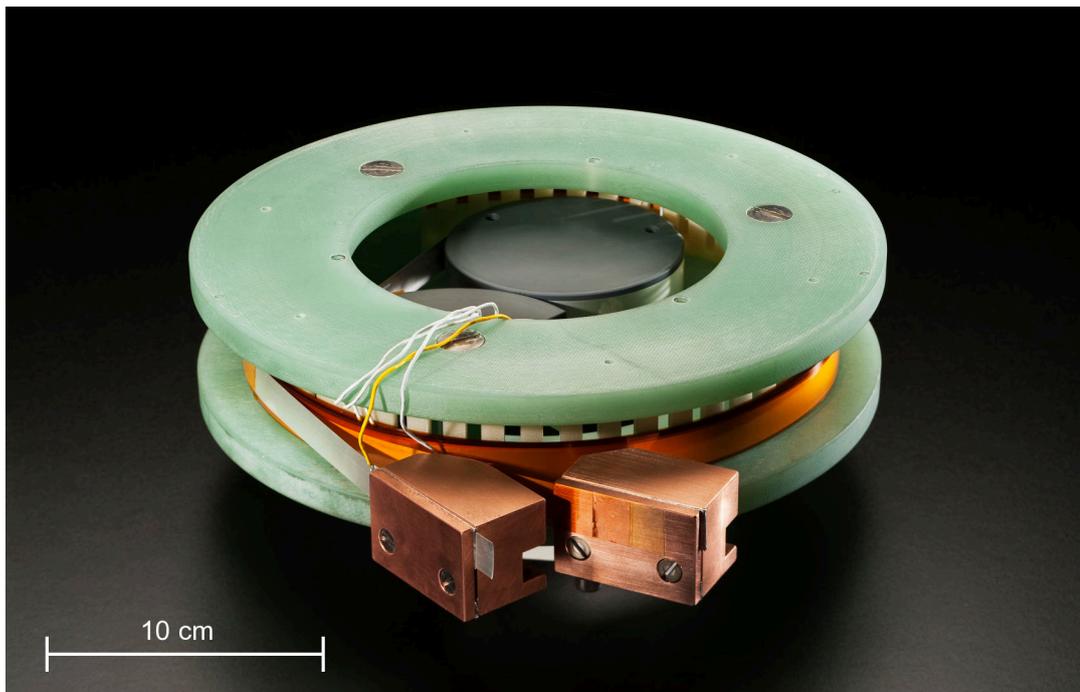


Abb. 5.12: Supraleitendes, resistiv strombegrenzendes Modul mit bifilar gewickelter Spiralwicklung eines YBCO-Bandleiters

Für den Bau dieses Modul wurde ein Bandleiter verwendet, der nicht in der Liste der charakterisierten Bandleiter in Kapitel 3.1.1 aufgeführt ist. Bei dem Bandleiter für dieses Modul handelt es sich um ein, auf Grundlage der bisherigen theoretischen und experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse, optimierten Bandleiter vom Typ B. Die Dicke der Silber-Deckschicht des Bandleiters beträgt nach Herstellerangaben ca. $2,3\ \mu\text{m}$ und die Dicke des Substrats ca. $96\ \mu\text{m}$ [Sup08].

Der arithmetische Mittelwert des kritischen Stromes im bifilar gewickelten Modul wurde auf 348 A bestimmt³. Der experimentell bestimmte Wert des kritischen Stromes weicht damit um 10 % vom angegebenen Wert des Herstellers für den kritischen Strom von 387 A ab [Sup08]. In Abb. 5.13 sind die E-I-Kennlinien zur Bestimmung des kritischen Stromes im bifilar gewickelten Modul zu sehen. Die Abweichung des kritischen Stromes in den Sektionen untereinander beträgt nach der Definition für die Bandleiterinhomogenität aus Kapitel 4.1.3 weniger als 4,5 % und liegt somit im Rahmen einer typischen Bandleiterinhomogenität im Eigenmagnetfeld. Durch die vergleichsweise gleichmäßige Magnetfeldstärke in radialer Richtung bei der kompakt gewickelten bifilaren Spule wird die supraleitende Schicht im Bandleiter gering beeinflusst. Das zeigt sich an der regellosen Reihenfolge des Spannungsanstiegs der einzelnen Sektionen des Bandleiters. Es lässt sich kein Zusammenhang zwischen der Position einer Sektion in der bifilaren Wicklung und dem kritischen Strom in dieser Sektion, relativ zu den übrigen Sektionen, feststellen.

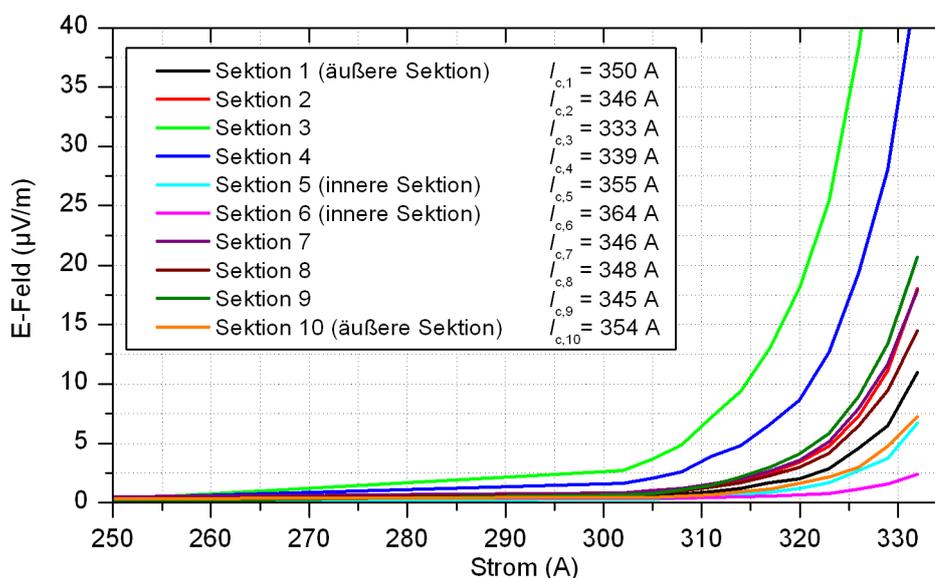


Abb. 5.13: Bestimmung des kritischen Stromes in einem bifilar gewickelten, resistiv strombegrenzenden Modul

Das gleiche unregelmäßige Verhalten zeigt sich beim S-N-Übergang der Sektionen des bifilar gewickelten Moduls während der Kurzschlussstrombegrenzung. In Abb. 5.14 sind die Verläufe des Modulstroms und der Spannungen über den einzelnen Sektionen des bifilar gewickelten Moduls zu sehen. Die zeitliche Streuung zwischen den Übergängen der einzelnen Sektionen ist bei dem bifilar gewickelten Modul vergleichbar mit dem monofilar gewickelten Modul. Es ist allerdings keine zeitliche Reihenfolge beim S-N-Übergang der Sektionen entsprechend deren Position im Modul festzustellen. Dies entspricht den Ergebnissen bei der Bestimmung des

³Der kritische Strom wurde, wie beim monofilaren Modul in Kapitel 5.2.1, mit dem $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -Kriterium über eine Messlänge von 1 m bestimmt.

kritischen Stromes in den einzelnen Sektionen. Das Maximum des begrenzten Stromes beim bifilar gewickelten Modul liegt mit 907 A deutlich über dem des monofilar gewickelten Moduls aufgrund einer um ca. 0,8 μm dickeren Deckschicht auf dem Bandleiter.

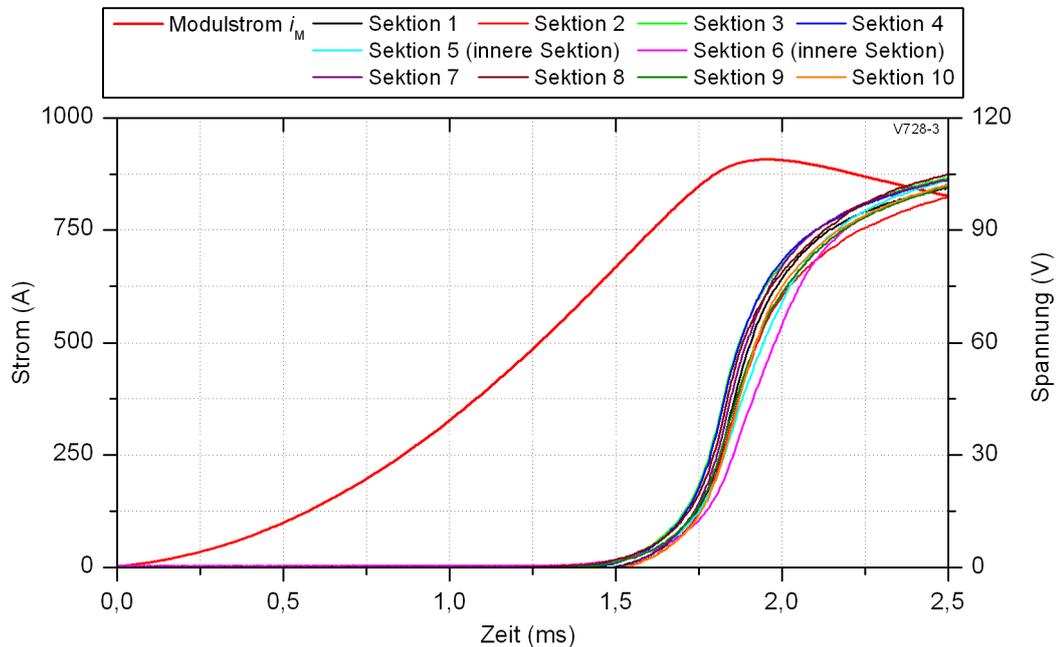


Abb. 5.14: Begrenzungsverhalten eines bifilar gewickelten, resistiv strombegrenzenden Moduls – Die zeitliche Reihenfolge der einzelnen Sektionen beim S-N-Übergang zu Beginn der Kurzschlussstrombegrenzung ist unabhängig von der Position der Sektionen in der bifilar gewickelten Spule.

Die Messungen des kritischen Stromes und des S-N-Überganges der Sektionen bestätigen, dass ein Bandleiter in einem bifilar gewickeltes Modul nicht durch eine Verstärkung der Eigenmagnetfelder negativ beeinflusst wird. Die zeitliche Reihenfolge der einzelnen Sektionen ist unabhängig von der Position der Sektionen in einem bifilar gewickelten Modul.

5.3 Test eines strombegrenzenden Moduls mit Power-Hardware-in-the-Loop

Hardware-in-the-Loop (HIL) ist ein anerkanntes Testverfahren, um reale Geräte oder Betriebsmittel (Hardware) in Interaktion mit einer simulierter Umgebung zu testen. Die Simulation des umgebenden Systems muss für hoch dynamische Prozesse quasi in Echtzeit erfolgen. Vorzugsweise wird dieses Testverfahren in der Automobilindustrie zum Test von Steuergeräten eingesetzt, wobei es sich bei der Antwort der simulierten Umgebung um Sensorrückmeldungen, also um physikalische Signale handelt. Die Ausgangssignale der zu testenden Hardware sind wiederum die Eingangssignale für das, in der Simulation nachgebildete, umgebende System wie z.B. Motoren, Getriebe usw. In der elektrischen Energietechnik findet das HIL-Testverfahren Anwendung beim Test von Schutzeinrichtungen [SAB05].

Eine Erweiterung des HIL-Testverfahrens, bei der sich die Rückmeldung der Simulation nicht auf Signale beschränkt, sondern die Übertragung von Energie mit einschließt, wird als Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) bezeichnet [RSB08]. Für elektrische Betriebsmittel mit großer Anschlussleistung werden hierfür steuerbare Umrichter eingesetzt, um das Ergebnis der Simulation, die Antwort des umgebenden Systems wie Strom und Spannung an das Testobjekt weiterzugeben. Mit dem PHIL-Testverfahren können Geräte mit nahezu beliebigen Anschlussbedingungen und Betriebszuständen getestet werden, ohne kosten- und zeitintensive Prototypen oder zusätzliche Testanlagen bereitzustellen. Zudem lassen sich mit dem PHIL-Testverfahren verschiedene elektrische Betriebsmittel unter Bedingungen testen, die bisher unter Laborbedingungen nicht durchführbar sind. So können z.B. elektrische Antriebe mit verschiedenen simulierten Belastungen an der Welle (Turbinen, Getriebe, Propeller usw.) getestet werden, ohne die Belastungen in realer Form mit aufwendigen Testanlagen bereitzustellen.

Für supraleitende Strombegrenzer ermöglicht das PHIL-Testverfahren Kurzschluss tests in unterschiedlichen Netzstrukturen [SLSN09]. Ein weiterer Vorteil von PHIL ist die Simulation von unterschiedlicher Beschaltung des Testobjekts selbst. So kann bei einem Strombegrenzer das Verhalten mit einer beliebigen Beschaltung wie z.B. einer parallelgeschalteten Impedanz untersucht werden, ohne diese konstruieren und fertigen zu müssen. Das PHIL-Testverfahren ist somit prädestiniert für umfangreiche Testserien mit einer Vielzahl an Testkonfigurationen vor allem im Entwicklungsstadium und kein Ersatz von Abnahme- und Sicherheitstests von Betriebsmitteln der Energieversorgung. Zusammengefasst sind die wesentlichen Vorteile des Power-Hardware-in-the-Loop Testverfahrens:

- Änderungen der Anschlussbedingungen verursachen keine Kosten und sind schnell durchzuführen, da z.B. keine Prototypen für eine externe Beschaltung hergestellt werden müssen.
- Externe Beschaltung muss nicht angepasst werden, um gleiche Anschlussbedingungen an verschiedenen Prüflingen zu erhalten.
- Prüflinge können unter Extrembedingungen getestet werden, ohne den Prüfling, die Einrichtung oder das Bedienpersonal zu gefährden.

Die durchgeführten Untersuchungen⁴ an supraleitenden strombegrenzenden Modulen mit dem PHIL-Testverfahren sind bei aktuellem Kenntnisstand einmalig für supraleitende Betriebsmittel in der Leistungsklasse über 1 MW [KPA08, SLSN09]. Im Folgenden wird die Testeinrichtung und das Wirkprinzip von Power-Hardware-in-the-Loop vorgestellt und erörtert.

⁴Die Untersuchungen fanden im Rahmen eines Forschungsaufenthalts am Center for Advanced Power Systems (CAPS) in Tallahassee, Florida, USA statt.

5.3.1 Testeinrichtung und Prüfling

Die Testeinrichtung kann in zwei Untersysteme aufgeteilt werden. Für die Simulation und die Regelung der Ausgangsgrößen dient ein Echtzeitsimulationssystem mit einem speziellen Multi-Prozessor-Computersystem, dem “Real Time Digital Simulator” (RTDS) [KGM]. Dieses Simulationssystem wurde speziell für die Echtzeitsimulation von Energiesystemen entworfen. Gesteuert wird die Simulation über eine grafische Benutzeroberfläche. Mit dem RTDS können Energiesysteme mit Iterationsschritten von 15...50 μs simuliert werden. Die Iterationsschritte für die Untersuchungen am strombegrenzenden Modul betragen ca. 25 μs . Als Prüfling diente das monofilare, resistiv strombegrenzende Modul von Kapitel 5.2.1.

Das Teilsystem zur Leistungsübertragung, der eigentliche Testkreis, bestand im Wesentlichen aus einem Umrichter als variable Energiequelle und einem Transformator, an den der Prüfling angeschlossen wird. Eine schematische Übersicht der Testeinrichtung ist in Abbildung 5.15 zu sehen.

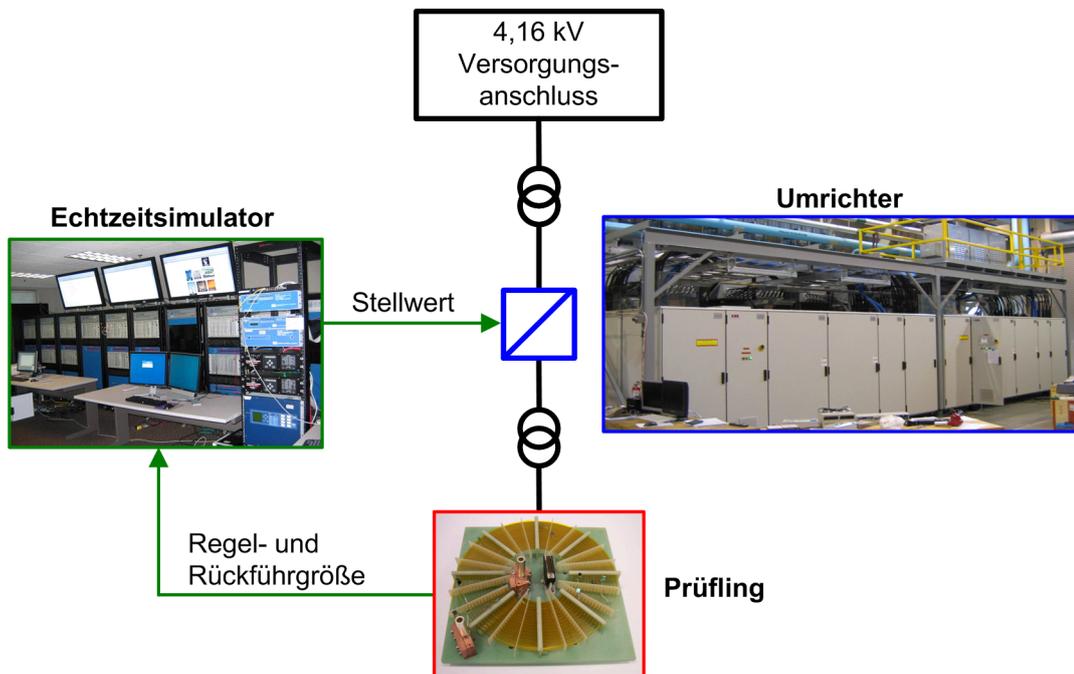


Abb. 5.15: Übersichtsschaubild der PHIL-Testeinrichtung

Die variable Energiequelle war ein System aus vier, parallelgeschalteten Umrichtern mit einer Gesamtleistung von 5 MW, mit einem ausgangsseitig angeschlossenen Transformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:10. Sekundärseitig, am Ausgang des Transformators, wurde ein Vorwiderstand in Reihe mit dem strombegrenzenden Modul angeschlossen. Der Vorwiderstand bestand aus mehreren, thermisch unisolierten Widerständen aus Edelstahl mit einem Gesamtwiderstand von 3,3 Ω . Die Temperaturerhöhung und damit die Änderung des Widerstandswertes der einzelnen Widerstände ist für die kurze Dauer des Kurzschlussstroms sehr gering und kann

vernachlässigt werden. Solange sich das Modul vor der Kurzschlussstrombegrenzung im supraleitenden Zustand befindet, liefert der Vorwiderstand eine definierte Rückführgröße für die Regelung und sorgt so für eine stabile Stromregelung.

Für die Untersuchung des Begrenzungsverhaltens eines supraleitenden Moduls ist es notwendig, den Ausgangsstrom, und damit die Ausgangsspannung, schnell zu erhöhen. Um die nötige Dynamik der Testeinrichtung für Untersuchungen an einem strombegrenzenden Modul zu erreichen, konnten nur zwei der vier zur Verfügung stehenden Umrichter parallel betrieben werden. Die maximale Amplitude des Stroms auf der Sekundärseite des Transformators betrug mit zwei parallelgeschalteten Umrichtern 750 A. Bei dieser Testanordnung und bei der geforderten Dynamik des Stromes sprach die Überstromschutzeinrichtung der Umrichter bei dieser maximalen Stromamplitude bereits an, obwohl die maximale Leistung der Umrichter noch nicht überschritten wurde.

5.3.2 Simulation des Energieversorgungsnetzes

Untersucht wurde das Begrenzungsverhalten eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls, das in einer Parallel- und Serienschaltung eines modular aufgebauten Strombegrenzers nach Abb. 5.1 für die 10 kV-Mittelspannungsebene bei einem Nennstrom von 1200 A. Um nur ein einzelnes Modul unter den Anschlussbedingungen im modularen Strombegrenzer zu testen, müssen die Größen des Energieversorgungsnetzes entsprechend den Zusammenhängen aus Gl. 5.1 skaliert werden.

Für den modular aufgebauten Strombegrenzer wurde eine Matrix aus jeweils 10 seriell und parallel geschalteten, identischen Modulen angenommen. Bei 10 seriellen Modulen verringert sich die Spannung über jedem Modul auf 1 kV, was ein praktikabler Kompromiss zwischen der nötigen Bandleiterlänge und dem Aufwand für die Spannungsisolierung der Komponenten des Moduls, wie den Stecker zur Spannungsmessung ist. Die Anzahl der 10 parallelgeschalteten Module ergeben sich aus dem Nennstrom des angenommenen Energieversorgungsnetzes und dem kritischen Strom des verwendeten Bandleiters. Mit den Kennwerten des monofilaren Moduls von Kapitel 5.2.1 erreicht der modular aufgebaute Strombegrenzer die Nennspannung von 10 kV und den Nennstrom von ca. 1200 A bei einem Sicherheitsfaktor k_c von 0,8 (vgl. Abb. 5.3).

Das Energieversorgungsnetz wird für die Echtzeitsimulation mit dem RTDS mit einer einphasigen Ersatzschaltung nach Abb. 5.16 nachgebildet. Als Kennwerte für das in der Ersatzschaltung nachgebildete Energieversorgungsnetz wurden für die Quellenspannung 10 kV und für die Quelleninnenimpedanz $Z_i = 947 \text{ m}\Omega$ mit einem X_i/R_i -Verhältnis von 10 angenommen.

Der Prüfling ist unter Einbeziehung der Regel- und Rückführgrößen des realen Moduls als variable Spannungsquelle in die virtuelle Ersatzschaltung eingebunden. Ein Kurzschluss in dem virtuellen Energieversorgungsnetz wird durch die niederohmige Überbrückung der Lastimpe-

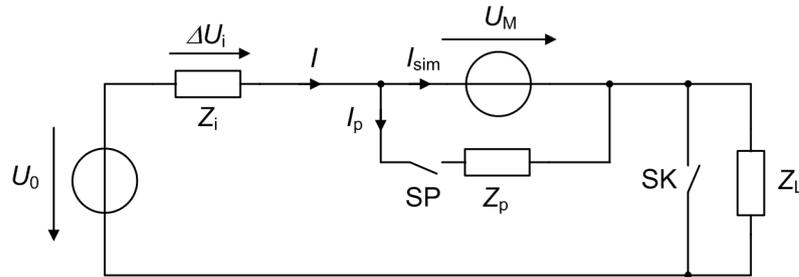


Abb. 5.16: Einphasiges Ersatzschaltbild des simulierten Energieversorgungsnetzes mit einem strombegrenzenden Modul – Das Modul ist als variable Spannungsquelle in die Ersatzschaltung eingebunden.

danz Z_L mit Schließen des Schalters SK simuliert. Des Weiteren wurde mit einer Impedanz, die sich in der Ersatzschaltung des Energieversorgungsnetzes über den Schalter SP parallel zur variablen Spannungsquelle zu- und abschalten ließ, der Einfluss einer Parallelimpedanz auf das Verhalten des strombegrenzenden Moduls untersucht.

5.3.3 Testablauf

Der Testablauf lässt sich an der schematischen Darstellung des Zusammenspiels der Simulation mit dem Testkreis in Abb. 5.17 anschaulich beschreiben. Das Energieversorgungsnetz ist in der Simulation mit dem RTDS in einer virtuellen Ersatzschaltung umgesetzt und steht in Interaktion mit dem realen Testkreis.

Das RTDS berechnet entsprechend dem aktuellen Stromwert der Ersatzschaltung in der Simulation eine Referenzspannung als Stellwert für den Umrichter. In jedem Iterationsschritt wird der Strom in der Simulation i_{sim} entsprechend der vorgegebenen Quellenspannung, Netzwerkinnenimpedanz und der Regel- und Rückführgrößen berechnet. Um den simulierten Strom im Hardwarekreis zu erhalten, wird die notwendige Ausgangsspannung am Umrichter, entsprechend dem Gesamtwiderstand des Hardwarekreises, vorwiegend bestehend aus Vorwiderstand und Strombegrenzermodul, berechnet.

Bei der Ausgangsspannung des Umrichters müssen die übrigen Betriebsmittel im Testkreis berücksichtigt werden, um den berechneten Strom aus der Simulation im Testkreis zu erhalten. Die Anpassung der Ausgangsspannung des Umrichters erfolgt über die berechnete Referenzspannung u_{ref} in jedem Iterationsschritt nach Gl. 5.13:

$$u_{ref} = u_{M_{n-x}} + \Delta u_{v_n} + K_{diff}(i_{M_n}) \cdot \frac{di_{sim}}{dt} + \Delta u_{PID} \quad [5.13]$$

Durch die Aufbereitung und die A/D-Wandlung der analogen Eingangssignale werden die Rückführ- und Regelgrößen zeitverzögert in der Simulation verarbeitet. Die Zeitverzögerung betrug mehrere Iterationsschritte. Der Index n in Gl. 5.13 steht für den aktuellen Iterationsschritt und der Index $n - x$ für eine Verzögerung der Rückführgrößen um x Iterationsschritte.

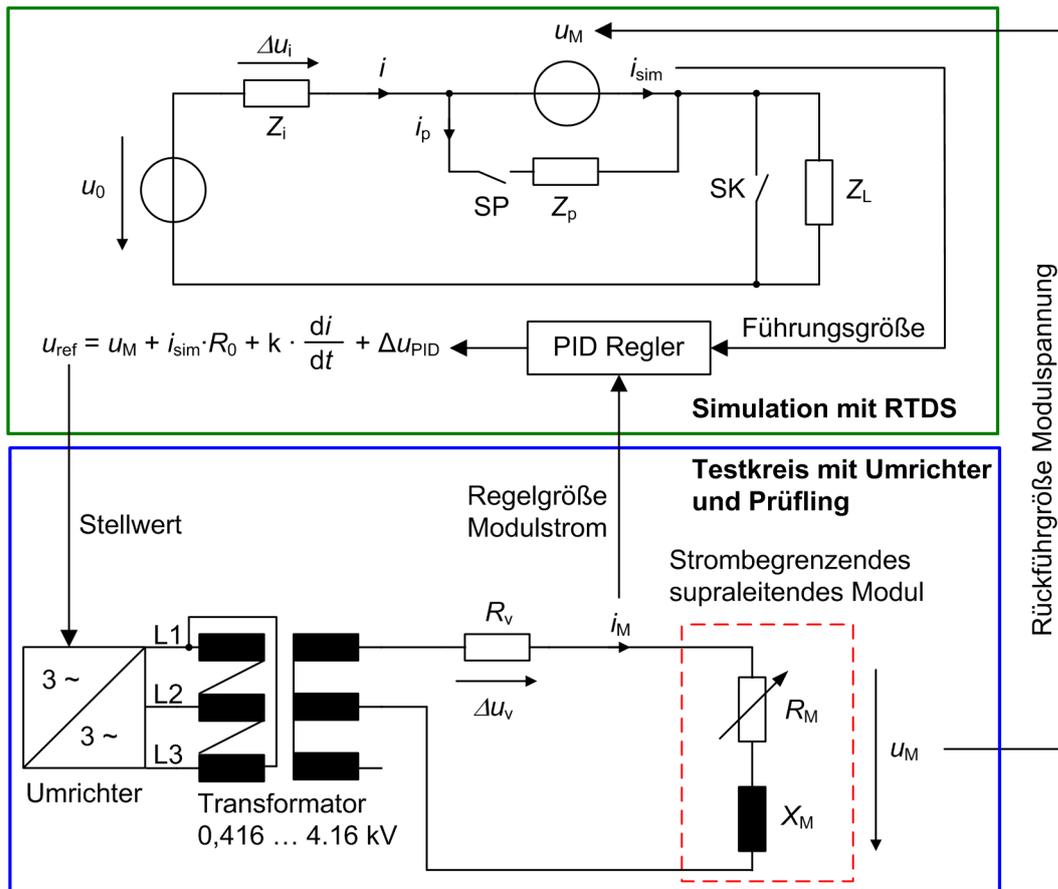


Abb. 5.17: Schemadarstellung der PHIL-Testeinrichtung – In einem simulierten Netzwerk wird der Kurzschlussstrom berechnet und eine Steuerspannung u_{ref} an einen Umrichter ausgegeben, um den entsprechenden Modulstrom im Testkreis zu erhalten. Der Modulstrom und die Modulspannung sind Regel- und Rückführgrößen für die Berechnung des Stromes in der Simulation.

Vor jedem Aufschalten eines Kurzschlusses wird der Strom im Testkreis mit einer Frequenz von 50 Hz in einen stationären Zustand gebracht, der mit dem Nennbetrieb des Moduls zu vergleichen ist. Unter diesen Anfangsbedingungen fließt ein Strom im Testkreis, kleiner als der Nennstrom, und das Modul befindet sich im supraleitenden Zustand. Befindet sich der Testkreis in diesem stationären Zustand, wird zu einem beliebigen Zeitpunkt ein Kurzschluss durch Überbrücken der Lastimpedanz mit dem Schalter SK im simulierten Energieversorgungsnetz aufgeschaltet.

Im Testkreis führt die Induktivität des Transformators zu einer deutlichen Verzögerung des Stromanstiegs. Durch ein Differenzierglied mit dem Koeffizienten K in der Berechnung der Referenzspannung u_{ref} wird der negative Einfluss des Transformators auf die Dynamik des Testkreises kompensiert. Während des ersten Anstiegs des Kurzschlussstroms folgt der Modulstrom i_M im Testkreis deutlich verzögert dem Stromanstieg in der Simulation i_{sim} . Mit einem hohen Koeffizienten für das Differenzierglied verringert sich die Verzögerung des Modulstroms im Vergleich zum berechneten Strom in der Simulation zwar, verursacht allerdings auch ein Über-

schießen der Stromamplitude bei einsetzender Strombegrenzung des Moduls. Um dies zu vermeiden, ist der Koeffizient K variabel vom aktuellen Modulstrom i_M abhängig. Beim ersten Stromanstieg des Kurzschlussstroms ist der Koeffizient K sehr hoch und nimmt mit steigendem Kurzschlussstrom auf einen geringen Wert ab. Zu Beginn des ersten Stromanstiegs “pusht” somit der Differenzierer den Stromanstieg im Testkreis, bevor sich der Wert des Koeffizienten mit steigendem Stromanstieg wieder verringert.

Um die Übereinstimmung des aktuellen Stromwertes im Testkreis mit dem aktuellen Stromwert in der Simulation zu verbessern, wurde dem bislang beschriebenen offenen Regelkreis ein geschlossener Regelkreis unterlagert. Die Referenzspannung für den Umrichter wird mit einem weiteren Term in der Berechnung von einem PID-Regler entsprechend der Abweichung des Modulstroms im Testkreis vom Strom in der Simulation angepasst. In Abb. 5.18 sind die Ströme und Spannungen der Simulation und des Testkreises aufgetragen. Als Indikator für die Qualität der gesamten Testeinrichtung eignet sich der Verlauf des Spannungsfalls über der Quelleninnenimpedanz in der Simulation Δu_i . Idealerweise wäre der Spannungsverlauf nach dem Einsetzen der Kurzschlussstrombegrenzung über der Quelleninnenimpedanz sinusförmig. Durch die Zeitverzögerung bei der Signalverarbeitung der Regel- und Rückführgrößen für die Simulation, kommt es jedoch zu einer Verzerrung des idealen sinusförmigen Verlaufs.

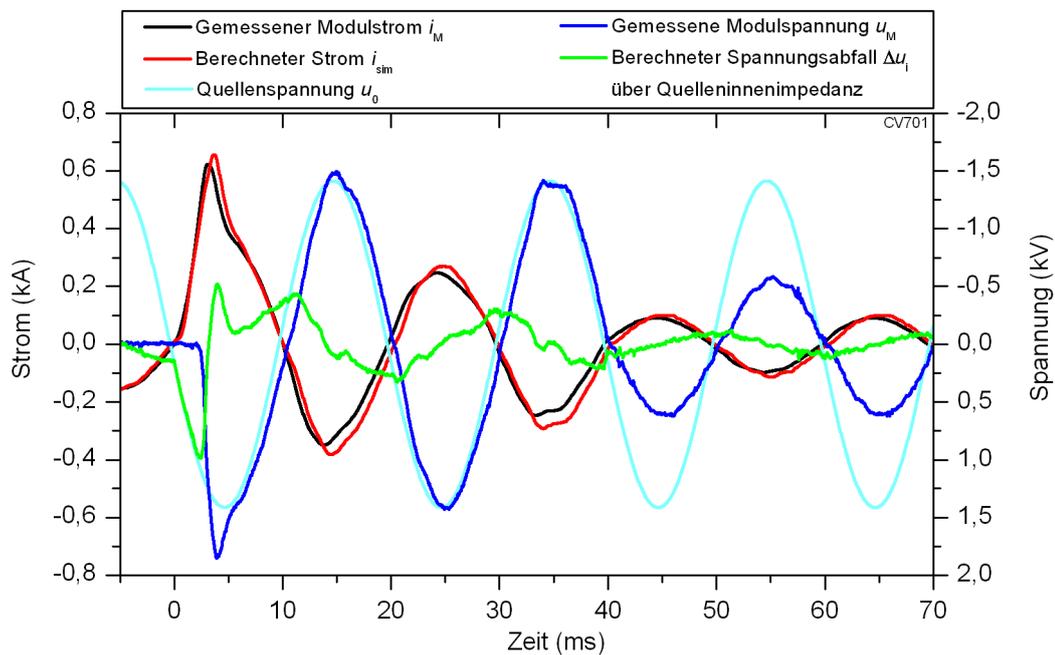


Abb. 5.18: Vergleich des Modulstroms i_M mit dem, von der Simulation geforderten Strom i_{sim} – Der dargestellte Spannungsabfall über der Quelleninnenimpedanz Δu_i während der Kurzschlussstrombegrenzung ist ein Ergebnis der rückgeführten Modulspannung u_M und der Quellenspannung u_0 aus der Simulation. Die Abweichung vom sinusförmigen Verlauf von Δu_i resultiert aus der Zeitverzögerung bei der Rückführung und Verarbeitung der Modulspannung.

Für die Untersuchung an einem resistiv strombegrenzenden Modul ist die Zeitverzögerung bei der Rückführung der Modulspannung akzeptabel. Der Spannungsfall über der Quellen-

innenimpedanz in Abb. 5.18 zeigt während der Kurzschlussstrombegrenzung nach dem S-N-Übergang einen guten sinusförmigen Verlauf. Die Stromregelung für die Untersuchungen eines supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls wurde für die erste Halbwelle der Kurzschlussstrombegrenzung optimiert, um das Verhalten des Moduls und des Energieversorgungsnetzes beim S-N-Übergang zu untersuchen. In Abb. 5.18 ist die gute Übereinstimmung zwischen simuliertem Strom und dem Strom im Testkreis zu sehen.

Die Funktionalität der Testeinrichtung zeigt sich zudem am Verlauf der Modulspannung. Durch die starke Begrenzung des Kurzschlussstroms vor dem Spannungsmaximum ist eine Spannungsüberhöhung am Modul zu erwarten, die von der gemessenen Modulspannung in Abb. 5.18 bestätigt wird.

5.3.4 Ergebnisse

Mit dem Power-Hardware-in-the-Loop Testverfahren lassen sich Prüflinge in einem simulierten Energieversorgungsnetz unter verschiedenen Anschlussbedingungen und mit einer zusätzlichen Beschaltung testen. Untersucht wurde mit dem PHIL-Testverfahren das Begrenzungsverhalten des supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Moduls mit einer monofilaren Spiralwicklung aus Kapitel 5.2.1. Grundlage für die Untersuchung des strombegrenzenden Moduls war ein modular aufgebauter Strombegrenzer in der Mittelspannungsebene bei 10 kV, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben. Im Einzelnen wurde das Begrenzungsverhalten des Moduls untersucht bei:

1. Variation der Quelleninnenimpedanz Z_i
2. Variation der Parallelimpedanz Z_p zum supraleitenden resistiv strombegrenzenden Modul

Variation der Quelleninnenimpedanz

Ausgehend von den Kenndaten des zugrunde gelegten Energieversorgungsnetzes mit einer auf den Nennlastwiderstand normierten Quelleninnenimpedanz z_p von 0,12 wurde das Begrenzungsverhalten des strombegrenzenden Moduls bei Steigerung der Quelleninnenimpedanz untersucht. Bei jedem Wert für die Quelleninnenimpedanz blieb das X_i/R_i -Verhältnis mit 10 unverändert. In Abb. 5.19 sind die Strom- und Spannungsverläufe des Moduls bei drei unterschiedlichen Werten für die Quelleninnenimpedanz zu sehen.

Solange der Kurzschlussstrom den kritischen Strom des Moduls noch nicht überschreitet, bestimmt der Wert der Quelleninnenimpedanz den Anstieg des Kurzschlussstroms im Energieversorgungsnetz. Der kritische Strom des Moduls betrug 241 A. Unabhängig von der Quelleninnenimpedanz konnte das Einsetzen der Begrenzung und das damit verbundene Ansteigen der Modulspannung bei einem Kurzschlussstrom von ca. 365 A gemessen werden. Über den Stromanstieg beeinflusst die Quelleninnenimpedanz den Zeitpunkt t_p des maximalen Kurzschlussstroms. Mit steigender Quelleninnenimpedanz vergrößert sich die Zeitspanne bis zum

Erreichen des kritischen Stromes des Moduls und damit die Zeitspanne bis zum Erreichen der maximalen Kurzschlussstromamplitude $i_{p,lim}$ zum Zeitpunkt t_p .

Durch den nahezu vollständig Ohmschen Widerstand des Moduls folgt die Modulspannung nach dem S-N-Übergang dem Verlauf des Modulstroms. Die Amplitude der Modulspannung wird nicht signifikant durch die Änderung der Quelleninnenimpedanz beeinflusst, da der Modulwiderstand nach dem S-N-Übergang ein Vielfaches der Quelleninnenimpedanz beträgt. Lediglich durch die Verschiebung des Zeitpunktes des maximalen Kurzschlussstroms $i_{p,lim}$, bezogen auf das Maximum der Quellenspannung, kommt es zu einer leichten Veränderung der Amplitude der Modulspannung.

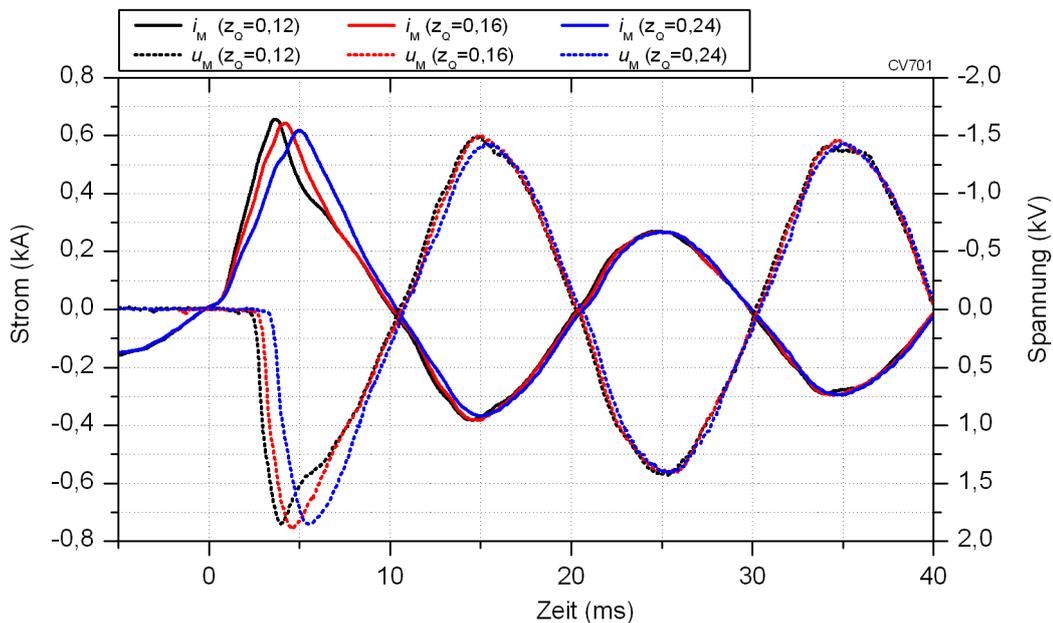


Abb. 5.19: Begrenzungsverhalten eines supraleitend, resistiv strombegrenzenden Moduls bei unterschiedlichen Quelleninnenwiderständen z_Q – Die Quelleninnenimpedanz ist bezogen auf die Nennlastimpedanz $Z_{L,n}$ angegeben.

Parallelimpedanz zum supraleitend, resistiv strombegrenzenden Modul

Zur Untersuchung des Einflusses einer Parallelimpedanz auf das thermische und das Begrenzungsverhalten des Moduls, wurde eine Ohmsch-Induktive Parallelimpedanz in die Simulation des Energieversorgungsnetzes parallel zum strombegrenzenden Modul eingefügt. Das Ersatzschaltbild entspricht dem Ersatzschaltbild in Abb. 5.16 bei geschlossenem Schalter SP. Die Werte der Quellenspannung U_0 und die Quelleninnenimpedanz Z_i waren für alle Untersuchungen mit variabler Parallelimpedanz die Standardwerte mit $U_0 = 10$ kV und $Z_i = 947$ m Ω mit einem X/R -Verhältnis von 10.

Die Untersuchungen mit einer variablen Parallelimpedanz zu einem supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Modul zeigen, wie sich der Kurzschlussstrom in einem Energieversor-

gungsnetz über die Parallelimpedanz beeinflussen lässt. In Abb. 5.20 ist der Verlauf des Kurzschlussstroms in einem Energieversorgungsnetz mit unterschiedlichen Impedanzen Z_p parallel zu einem strombegrenzenden Modul zu sehen. Zum Vergleich ist der Kurzschlussstrom eines strombegrenzenden Moduls ohne eine Parallelimpedanz aufgetragen. Nach dem Einsetzen der Strombegrenzung teilt sich der Kurzschlussstrom auf die Parallelimpedanz und das Modul auf. Neben der Kurzschlussstromamplitude lässt sich der Phasenwinkel im Kurzschlussfall den Gegebenheiten im Energieversorgungsnetz anpassen.

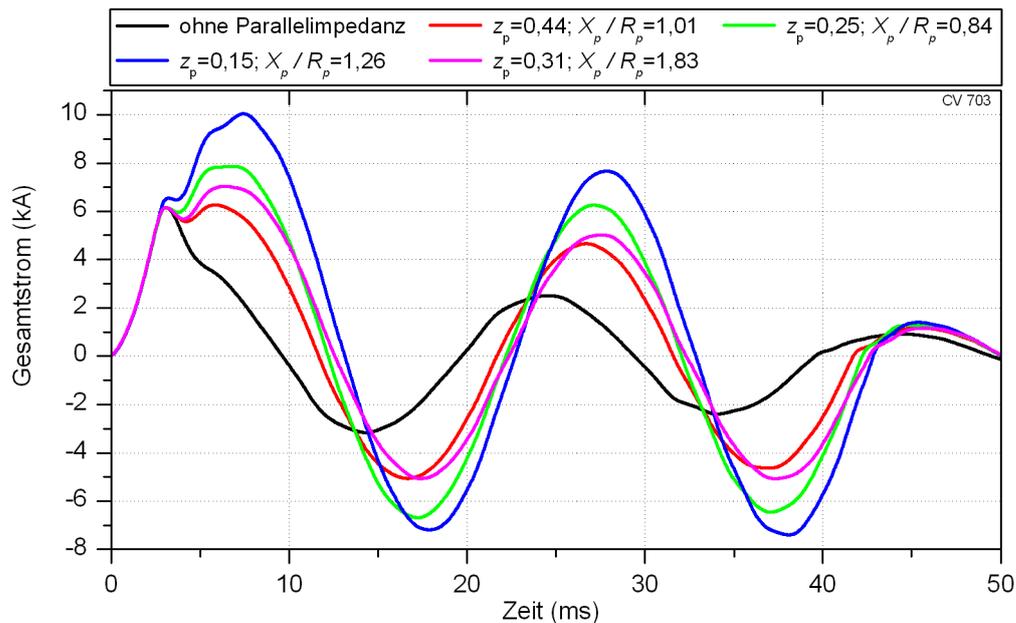


Abb. 5.20: Einfluss einer Parallelimpedanz auf den Kurzschlussstrom eines Energieversorgungsnetzes

Mit dem PHIL-Testverfahren sind Testkonfigurationen zu realisieren, die unter konventionellen Testbedingungen nicht oder nur mit großem Aufwand umzusetzen sind. So kann der Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Parallelimpedanz bis zum Grenzfall einer absolut temperaturunabhängigen Parallelimpedanz untersucht werden. In Abb. 5.21 sind die Ergebnisse des Begrenzungsverhaltens eines strombegrenzenden Moduls mit einer temperaturabhängigen und -unabhängigen Parallelimpedanz zu sehen. Zum direkten Vergleich sind der simulierte Gesamtstrom im Energieversorgungsnetz i und der Teilstrom durch die Parallelimpedanz i_p gemeinsam mit dem realen Modulstrom i_M aufgetragen, jeweils für eine temperaturunabhängige und eine temperaturabhängige Parallelimpedanz Z_p . Für die Parallelimpedanz wurde eine Induktivität aus Kupfer mit einem X_p/R_p -Verhältnis von 0,9 und einem auf die Nennlastimpedanz bezogenen Wert z_p von 0,42 angenommen.

Nach dem Einsetzen der Strombegrenzung teilt sich der Kurzschlussstrom auf die niederohmige Parallelimpedanz und das normalleitende Modul auf. Durch Joulesche Wärme steigt die Temperatur der Parallelimpedanz im Verlauf der Kurzschlussstrombegrenzung an. Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Wirkanteils der Parallelimpedanz steigt mit der

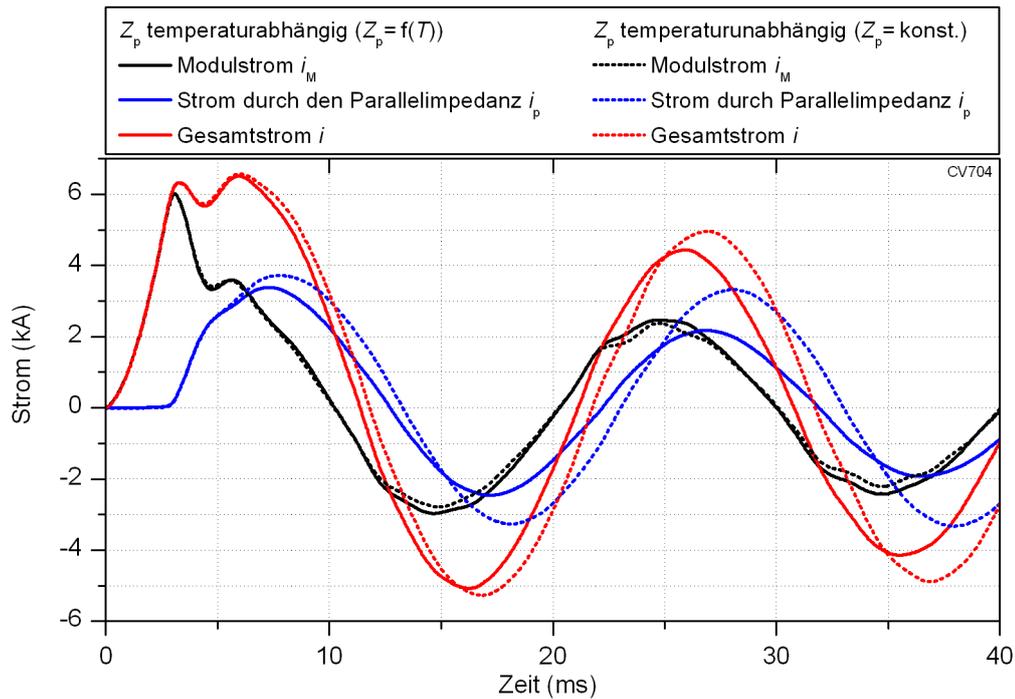


Abb. 5.21: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Parallelimpedanz auf den Kurzschlussstrom eines Energieversorgungsnetzes

Temperatur auch der Widerstandswert der Parallelimpedanz. Als Folge des steigenden Widerstandswertes der Parallelimpedanz verringert sich die Stromamplitude im Parallelzweig und damit die Stromamplitude im gesamten Energieversorgungsnetz. Der Einfluss einer temperaturabhängigen Parallelimpedanz auf das Begrenzungsverhalten und das thermische Verhalten des strombegrenzenden Moduls ist neben den allgemeinen Widerstandsverhältnissen im Energieversorgungsnetzwerk abhängig vom X_p/R_p -Verhältnis der Parallelimpedanz.

Mit steigendem Wirkanteil der Parallelimpedanz steigt der Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Parallelimpedanz auf das Verhalten des strombegrenzenden Moduls und auf den Verlauf des Kurzschlussstroms im Energieversorgungsnetz. Bei einem zu erwartenden hohen Modulwiderstand und vergleichsweise geringer Parallelimpedanz ist der Einfluss einer temperaturbedingten Erhöhung der Parallelimpedanz auf den Modulstrom während der Kurzschlussstrombegrenzung gering.

Neben dem Einfluss auf den Kurzschlussstroms lässt sich mit einer Parallelimpedanz die Leistungsfähigkeit des strombegrenzenden Moduls verbessern. Eine Impedanz parallel zum Modul verringert im Kurzschlussfall die Verlustleistung des Moduls signifikant durch Veränderung des Spannungsfalls über der Parallelschaltung. Um den günstigen Einfluss einer Parallelimpedanz auf die Verlustleistung und das thermische Verhalten des Moduls zu untersuchen, wird die Verlustenergie eines strombegrenzenden Moduls während einer Kurzschlussstrombegrenzung mit und ohne Parallelimpedanz verglichen. Zudem wurde der Widerstandswert der Parallelimpedanz variiert. In Abb. 5.22 ist der Verlauf der zeitlich integrierten Verlustleistung,

der Verlustenergie, über die Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung zu sehen. Die dargestellten Verlustenergien sind auf den Endwert der Verlustenergie des strombegrenzenden Moduls nach der Kurzschlussstrombegrenzung bezogen.

Mit sinkendem Wert der Parallelimpedanz nimmt die Verlustenergie im Modul ab. Mit sinkender Verlustenergie verringert sich die maximale Bandleitertemperatur des Moduls nach einer Kurzschlussstrombegrenzung. Mit einer Impedanz parallel zum strombegrenzenden Modul lässt sich somit, bei ansonsten gleichen Anschlussbedingungen, die Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung verlängern oder den Einsatz an Bandleitermaterial über geringere Bandleitertemperaturen minimieren, ohne den Grenzwert der maximalen Bandleitertemperatur zu überschreiten (vgl. Kapitel 4.2.3).

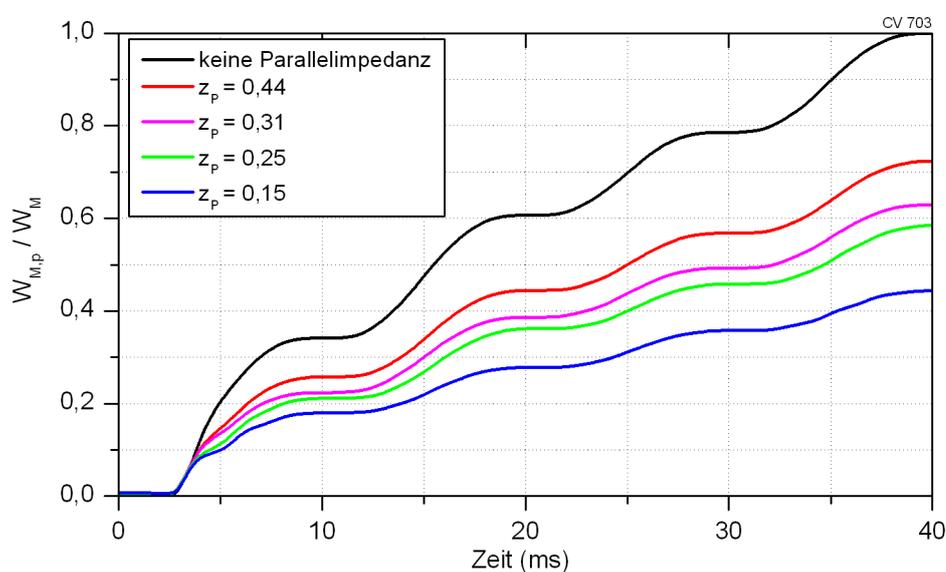


Abb. 5.22: Zeitlicher Verlauf der umgesetzten Energie im supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Modul in Abhängigkeit einer Parallelimpedanz zum Modul.

6 Konzeptioneller Entwurf eines supraleitenden resistiven Strombegrenzers

Auf Grundlage der bereits gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit für den Entwurf von supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Modulen aus YBCO-Bandleitern werden ein konzeptioneller Entwurf eines Strombegrenzer-Prototyps vorgestellt und dessen Investitionskosten abgeschätzt.

Ausgegangen wird von einem Strombegrenzer für die Mittelspannungsebene mit einer Bemessungsspannung U_r von 12 kV und einem Nennstrom I_n von 600 A. Für das Rückkühlverhalten wird angenommen, dass der Strombegrenzer nach dem Abschalten des Kurzschlussstroms stromlos zurück kühlen kann. Es werden somit keine besonderen Anforderungen an das Rückkühlverhalten gestellt. Die Vorgaben des Energieversorgungsnetzes für diesen konzeptionellen Entwurf sind an die Kennwerte eines Strombegrenzerdemonstrators mit BSCCO-Massivmaterialien angelehnt [KBB05]. Die für den aktuellen Entwurf angenommenen Kennwerte des Strombegrenzers und Vorgaben des Energieversorgungsnetzes sind in Tab. 6.1 zusammengefasst aufgelistet.

Bemessungsspannung U_r	12 kV
Nennspannung U_n	10 kV
Nennstrom I_n	600 A
Quelleninnenimpedanz Z_i	0,3 Ω ($X_i/R_i = 10$)
max. Kurzschlussdauer t_A	80 ms
Sicherheitsfaktor für den Nennbetrieb k_c	0,7
Max. Amplitude des Kurzschlussstroms $I_{lim,max}$	8,6 kA
Min. Amplitude des Kurzschlussstroms $I_{lim,min}$	4 kA
Betriebstemperatur T_{min}	77 K

Tab. 6.1: Kennwerte des Strombegrenzers für die 10 kV-Mittelspannungsebene und Vorgaben des Energieversorgungsnetzes

Ein supraleitender Strombegrenzer ist ein System aus mehreren Einzelkomponenten. Als Einzelkomponenten eines supraleitenden Strombegrenzers werden in dieser Arbeit definiert:

- Strombegrenzende Module
- Stromzuführungen
- Kryostat
- Kälteanlage

Die Komponenten des Strombegrenzers, die direkt mit dem Energieversorgungsnetz verbunden sind, die strombegrenzenden Module und die Stromzuführungen, müssen entsprechend den Kennwerten und den Vorgaben des Energieversorgungsnetzes ausgelegt und entworfen werden. Alle übrigen Komponenten richten sich nach den Entwürfen dieser Komponenten.

In den folgenden Kapiteln werden die konzeptionellen Entwürfe der strombegrenzenden Module und der Stromzuführungen vorgestellt. Der Kryostat und die Kälteanlage werden entsprechend den Ergebnissen dieser Entwürfe ausgelegt. Für den Entwurf der Kälteanlage wird von den Verlusten der Einzelkomponenten im Nennbetrieb ausgegangen. Mit dem konzeptionellen Entwurf des Strombegrenzer-Prototypen werden zudem die Kosten und der Platzbedarf für einen supraleitenden Strombegrenzer in der Mittelspannungsebene abgeschätzt.

6.1 Strombegrenzende Module und Stromzuführungen

Der Prototyp des supraleitenden Strombegrenzers wird modular aus einer Matrix einzelner strombegrenzender Module aufgebaut. Um die Vorgaben des Energieversorgungsnetzes zu erfüllen, wird eine Impedanz parallel zu den Modulen geschaltet. Bei dem konzeptionellen Entwurf eines Strombegrenzer-Prototyps wird eine modifizierte Verschaltung des beispielhaften Entwurfs eines strombegrenzenden Moduls, in Kapitel 5.1 verwendet. In Abb. 6.1 ist der angenommene modulare Aufbau einer Phase mit der Parallelimpedanz zu sehen.

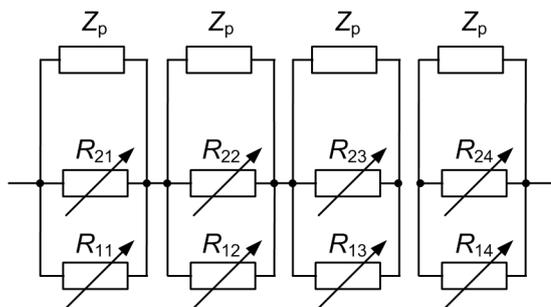


Abb. 6.1: Verschaltung der einzelnen strombegrenzenden Module mit aufgeteilter Parallelimpedanz für eine Phase eines supraleitenden Strombegrenzer-Prototyps.

Die Parallelimpedanz wird auf mehrere kleinere Impedanzen aufgeteilt, die zu einer Gruppe parallelgeschalteter Module parallelgeschaltet werden. Diese Art der Modulordnung mit Parallelimpedanzen ist, bei einer hohen Anzahl an Parallelimpedanzen, ein Kompromiss zwischen dem Aufwand, viele identische Parallelimpedanzen zu integrieren und einer hohen thermischen Stabilität der strombegrenzenden Module. Die beste thermische Stabilisierung der strombegrenzenden Module gewährleistet grundsätzlich eine Parallelimpedanz zu jedem Modul. Als Bandleiter für die Module wird ein typischer Bandleiter angenommen, wie er für das strombegrenzende, bifilar gewickelte Modul in Kapitel 5.2.2 verwendet wurde.

Bei mehreren, zu einzelnen Modulen oder Modulgruppen parallelgeschalteten Impedanzen ist es sinnvoll, diese innerhalb des Kryostaten im gasförmigen Stickstoff oberhalb der Module unterzubringen. Dadurch wird die Anzahl der Durchführungen am Kryostaten auf die notwendige Anzahl von sechs Durchführungen beschränkt. Während der Kurzschlussstrombegrenzung wird der Druckanstieg, verursacht durch das Verdampfen des Stickstoffs, minimiert. Bei der Verwendung einer einzelnen Impedanz für jede Phase kann diese außerhalb des Kryostaten parallel zu den Modulen geschaltet werden.

Für die Spannung über einer Phase eines Strombegrenzers in der Mittelspannungsebene kann während eines Kurzschlusses, ohne nähere Kenntnis des Energieversorgungsnetzes, die Sternspannung ($U_n/\sqrt{3}$) angenommen werden. Basierend auf den Erkenntnissen der bisherigen Untersuchung des Erwärmungsverhaltens von YBCO-Bandleitern werden, für eine Nennspannung von 10 kV und bei einer maximalen Dauer des Kurzschlussstroms von 80 ms, 4 Module in Reihe geschaltet. Die Bandleiterlänge eines Moduls beträgt 17 m. In dieser Konfiguration wird der Grenzwert der maximalen Bandleitertemperatur eingehalten (vgl. Kapitel 5.1.1). Während der Kurzschlussstrombegrenzung liegt bei diesen Annahmen an jedem der 4 Module eine Spannung von ca. 1443 V an. Die Anzahl und die Länge des Bandleiters der in Serie geschalteten Module ist ein möglicher Kompromiss zwischen dem Aufwand für die Spannungsisolation der Bandleiter in einem Modul, dem Einhalten der maximalen Bandleitertemperatur während der Kurzschlussstrombegrenzung und dem notwendigen Platzbedarf der Module innerhalb des Kryostaten.

Um den Platzbedarf weiter zu minimieren, werden in jedem Modul 2 Bandleiter parallelgeschaltet¹. Für einen Nennstrom des Strombegrenzers von 600 A sind zwei parallelgeschaltete Module notwendig. Der Nennstrom eines Moduls $I_{n,M}$ beträgt somit 300 A und der eines Bandleiters 150 A. Um die Module im Nennbetrieb durch geringe Überströme nicht zu gefährden, wird ein Sicherheitsfaktor k_c von 0,7 angenommen (vgl. Abb. 5.3). Aus dem Nennstrom und dem Sicherheitsfaktor ergibt sich der kritische Strom I_c eines Bandleiters zu $I_{n,M} \cdot \sqrt{2}/k_c = 303$ A. Eine parallele Anordnung mehrerer spiralförmig gewickelter Bandleiter und Module zu einem Strombegrenzer für die Mittelspannungsebene wurde bereits erfolgreich ge-

¹In Kapitel 4.2.4 wurden zwei Bandleiter parallelgeschaltet. Es wurde keine Beeinflussung des Begrenzungsverhaltens festgestellt.

testet [KSW08]. In Tab. 6.2 sind die angenommenen Kennwerte der strombegrenzenden Module zusammengefasst.

Nach dem Entwurfsgang in Kapitel 5.1 ergeben sich Wertepaare aus Bandleiterlänge und Dicke der Deckschicht des Bandleiters, mit denen die Vorgaben aus Tab. 6.1 bei gleichzeitiger Einhaltung der maximal zulässigen Temperatur des Bandleiters eingehalten werden. In Abb. 6.2 sind die aus den Vorgaben und der maximalen Bandleitertemperatur abgeleiteten Grenzfunktionen für ein Modul zu sehen. Die Wertepaare in dem grün hinterlegten Bereich erfüllen alle Kriterien und sind zur Konstruktion eines strombegrenzenden Moduls unter Einhaltung der Vorgaben geeignet. Wertepaare in den schraffierten Bereichen erfüllen nur eines der Kriterien und Wertepaare in den rot hinterlegten Bereichen erfüllen keines der Kriterien. Bei einer sinnvoll gewählten Dicke für die Deckschicht von $2\ \mu\text{m}$ ergeben sich als mögliche Bandleiterlänge die für den konzeptionellen Entwurf gewählten $17\ \text{m}$ für jedes Modul. In Abb. 6.2 ist das gewählte Wertepaar aus Dicke der Deckschicht und Bandleiterlänge für den konzeptionellen Entwurf des Strombegrenzer-Prototyps mit einem Kreuz markiert.

YBCO-Bandleiter		Strombegrenzer	
Kritischer Strom	303 A	Bemessungsspannung eines Moduls	1443 V
Länge (je Modul)	$2 \times 17\ \text{m}$	Anzahl der parallelgeschalteten Module p	2
Gesamtlänge	816 m	Anzahl der seriellgeschalteten Module q	4
Breite	12 mm	Anzahl der parallelen Bandleiter je Modul	2
Dicke der Deckschicht	$2\ \mu\text{m}$	Parallelimpedanz	700 m Ω
Dicke des Substrats	$96\ \mu\text{m}$	Sicherheitsfaktor k_c	0,7

Tab. 6.2: Kennwerte der verwendeten Bandleiter und der strombegrenzenden Module

Die Aufgabe der Stromzuführungen ist die elektrische Verbindung von den Anschlüssen des Strombegrenzers bei Umgebungstemperatur zu den Modulen innerhalb des Kryostaten bei einer Temperatur von 77 K. Die besonderen Anforderungen an Stromzuführungen von supraleitenden Betriebsmitteln sind ein geringer elektrischer Widerstand bei gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit, um den Strom mit möglichst geringen Verlusten zu leiten und damit möglichst wenig Wärme in den Kryostaten einzubringen. Stromzuführungen für Hochtemperatursupraleiter wie YBCO-Bandleiter bestehen aus normalleitenden, metallischen Leitermaterialien. Wie in Kapitel 4.3.1 ausgeführt, ist der spezifische Widerstand mit der Wärmeleitfähigkeit eines reinen Metalls über das Wiedemann-Franzsche-Gesetz durch die Lorenz-Zahl verbunden. Das Minimum an eingebrachter Wärme in den Kryostaten ist somit nahezu unabhängig von der Wahl des Leitermaterials der Stromzuführung [ABHT94]. Die Verluste der Stromzuführungen werden maßgeblich durch deren Geometrie bestimmt.

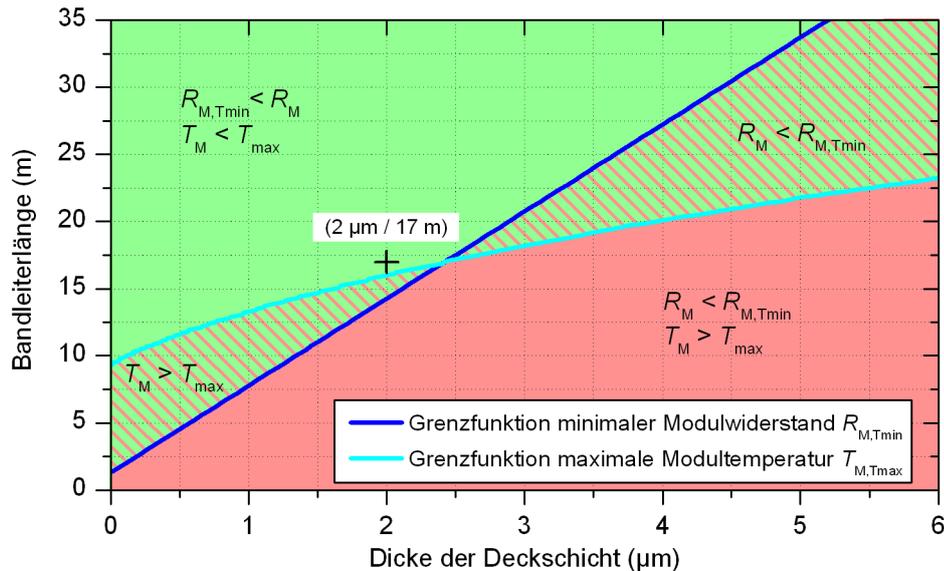


Abb. 6.2: Grenzfunktionen für den konzeptionellen Entwurf von Modulen für den Prototyp eines supraleitenden Strombegrenzers – Für eine Nennspannung von 10 kV und einem Nennstrom von 600 A wurde ein Strombegrenzer mit 4×2 Modulen angenommen, wobei in jedem Modul zwei Bandleiter parallelgeschaltet werden. Für die strombegrenzenden Module wurde das mit dem Kreuz markierte Wertepaar, mit einer möglichst geringen Bandleitlänge von 17 m bei sinnvoller Dicke der Deckschicht von $2 \mu\text{m}$, gewählt.

Für den konzeptionellen Entwurf eines Strombegrenzer-Prototyps wird eine grundsätzliche Auslegung einer Stromzuführung vorgestellt. Die Art der Kühlung der Stromzuführung hat neben der Geometrie einen Einfluss auf die Verluste. Prinzipiell können Stromzuführungen zwangsgekühlt, gasgekühlt oder badgekühlt werden. Zwangsgekühlte Stromzuführungen benötigen einen eigenen Kühlkreislauf und sind daher vergleichsweise aufwendig, ermöglichen jedoch vergleichsweise kurze Längen [ABHT94]. Gasgekühlte Stromzuführungen verursachen einen etwas geringeren Wärmeeintrag in den Kryostaten als badgekühlte Stromzuführungen, benötigen allerdings eine Konvektion des Gases entlang der Stromzuführung [Hul93, WF93]. Für die grundsätzliche Auslegung der Stromzuführung für den konzeptionellen Entwurf des Strombegrenzer-Prototyps wird die einfachere Variante der badgekühlten Stromzuführung gewählt.

Bei der Badkühlung wird die Stromzuführung mit dem kalten Ende in den flüssigen Stickstoff im Innern des Kryostaten eingetaucht. Das andere Ende der Stromzuführung liegt bei Umgebungstemperatur an der Außenseite des Kryostaten. Entlang der Stromzuführung findet keine forcierte Kühlung statt. Der minimale Wärmeeintrag einer badgekühlten Stromzuführung ist für gängige Werkstoffe wie Kupfer, Aluminium oder Edelstahl nahezu gleich und liegt bei ca. 40 W/kA bei einem unteren Temperaturniveau von 77 K [HCD93, ABHT94]. Der minimale Wärmeeintrag in den Kryostaten ist abhängig vom Strom und von der Geometrie der Stromzuführung. Für jeden Werkstoff der badgekühlten Stromzuführung ergibt sich ein anderes Verhält-

nis aus Strom I , Länge L_{SZ} und Querschnittsfläche A_{SZ} der Stromzuführung beim minimalen Wärmeeintrag. Für Kupfer mit einem geringen RRR < 100 liegt der Wert bei ca. $3,3 \cdot 10^3$ kA/m [BFS75, WF93, ABHT94]. Es gilt:

$$\frac{L_{SZ} \cdot I}{A_{SZ}} \approx 3,3 \cdot 10^3 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \quad [6.1]$$

Nach Gl. 6.1 ergibt sich ein optimaler Leiterquerschnitt von ca. $145,5 \text{ mm}^2$ bei einer auf den minimalen Wärmeeintrag optimierten $0,8 \text{ m}$ langen Stromzuführung aus Kupfer und einem Nennstrom von 600 A . Unter Berücksichtigung der Stromverdrängung in Kupfer bei einer Netzfrequenz von 50 Hz ist es von Vorteil, die Stromzuführung aus mehreren isolierten Einzelleitern aufzubauen. Bei einer Eindringtiefe in Kupfer bei 77 K und 50 Hz von ca. $3,3 \text{ mm}$ ergeben sich 5 einzelne Runddrähte mit einem jeweiligen Durchmesser von ca. $6,1 \text{ mm}$ je Stromzuführung. In Abb. 6.3a ist eine beispielhafte Anordnung der Stromzuführungen für 14 kV (rote Flächen) auf dem Deckel des Kryostaten zu sehen [HSP09].

6.2 Kryostat und Kälteanlage

Die vorrangige Aufgabe des Kryostaten ist die thermische Isolierung der supraleitenden Komponenten unterhalb der kritischen Temperatur T_c . Der spezifische Wärmeeintrag bzw. die Isolationsverluste eines modernen Kryostaten sind vergleichsweise gering und werden in Kapitel 6.3.2 behandelt. Innerhalb des Kryostaten findet die Wärmeübertragung zwischen den Komponenten und dem Kühlmedium statt. Die bedeutendsten Wärmeübertragungsmechanismen zur Kühlung sind Wärmeleitung, Konvektion und Phasenübergang. Sie sind bei 77 K und bei Raumtemperatur prinzipiell gleich. Aus den Wärmeübertragungsmechanismen lassen sich die beiden angewandten Kühltechniken Badkühlung und Zwangskühlung ableiten. Bei der Zwangskühlung wird das Kühlmedium durch Kühlleitungen an den Komponenten entlang geführt.

Die Komponenten befinden sich zur thermischen Isolation in einer evakuierten Umgebung im Kryostat. Ein Nachteil der Zwangskühlung ist der hohe notwendige Massenstrom in den Kühlleitungen und die kurze Überbrückungszeit nach einem eventuelle Ausfall der Kälteanlage. Konstruktiv einfacher als die Zwangskühlung ist die Badkühlung, bei der die supraleitenden Komponenten in flüssigen Stickstoff eingetaucht werden. Zur Kühlung der supraleitenden Komponenten nach einer Kurzschlussstrombegrenzung wird die hohe Verdampfungswärme beim Phasenübergang des Stickstoffs ausgenutzt. Nachteilig an der Badkühlung ist der Druckanstieg im Innern des Kryostaten nach der Kurzschlussstrombegrenzung.

Der Faktor für die isobare Volumenänderung von Stickstoff beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand beträgt ca. 175 und steigt auf über 650 bei einer Gastemperatur von 273 K an (Kapitel A.5). Neben der Isolation dient der Kryostat bei der Badkühlung als

Vorratsbehälter für den flüssigen Stickstoff, um den Strombegrenzer bei einem Ausfall der Kälteanlagen eine gewisse Zeit lang weiter betreiben zu können.

Das vorliegende Konzept eines supraleitenden Strombegrenzer-Prototyps sieht einen geschlossenen Kühlkreislauf mit einer Kälteanlage zur Verflüssigung des durch die anfallenden Verluste im Kryostaten gasförmigen Stickstoffs vor. Die Möglichkeit, auf eine Kälteanlage zu verzichten und einen Vorratstank zum Nachfüllen von flüssigem Stickstoff vorzuhalten, ist vor allem aus logistischen Gründen nicht sinnvoll. Der Carnot-Wirkungsgrad für die Kälteanlage mit Prozesstemperaturen zwischen 77 K und 300 K ist unabhängig vom gewählten Kreisprozess und liegt bei

$$\eta_C = \frac{T_K}{T_H - T_K} = \frac{77\text{ K}}{300\text{ K} - 77\text{ K}} = 0,345. \quad [6.2]$$

Der tatsächliche Wirkungsgrad von Kälteanlagen zur Verflüssigung von Stickstoff ist abhängig vom gewählten Kreisprozess und von der Kälteleistung der Kälteanlage [Kom95, Kom06]. Für eine Kälteanlage eines Strombegrenzers für die Mittelspannungsebene mit einer benötigten Kälteleistung von wenigen 100 W bei 77 K, liegt der effektive Wirkungsgrad η_{eff} aktuell bei ca. 0,01...0,09 [Rad09]. Kälteanlagen mit dem Stirling- und Pulsrohr-Kreisprozess (Stirling-Typ) erreichen derzeit die höchsten Wirkungsgrade bei einer Kälteleistung < 1000 W [Sti09, Rad09].

Neben dem Wirkungsgrad ist die Lebensdauer und der Wartungsaufwand von Kältemaschinen für die Verwendung bei supraleitenden Strombegrenzern von Bedeutung. Die höchste Lebensdauer bei gleichzeitig geringem Wartungsaufwand versprechen derzeit Kälteanlagen mit dem Pulsrohr-Kreisprozess, da diese Kälteanlagen keine bewegten Komponenten im Kaltteil besitzen. Für die eigentliche Kälteanlage ist gegebenenfalls eine zusätzliche Wasserkühlung notwendig, die den Wirkungsgrad der Kälteanlage mit beeinflusst.

Für den konzeptionellen Entwurf des Strombegrenzer-Prototyps wird eine kommerzielle, luftgekühlte Kälteanlage mit Gifford-McMahon-Kreisprozess gewählt, die ebenfalls einer geringen mechanischen Belastung ausgesetzt ist und somit eine hohe Betriebssicherheit besitzt [Hae81]. Die Kälteanlage besteht aus einem separaten Kompressor und einem Kühlteil mit dem Kaltkopf. Der Wirkungsgrad η_{eff} der gewählten Kälteanlage liegt bei einer maximalen Kälteleistung von ca. 300 W bei 77 K bei 0,04 [Cry09]. Eine Kälteanlage dieser Leistung hat einen geringen Platzbedarf, der vom Kompressor der Kälteanlage und vom Kryostaten bestimmt wird. Der Kühlteil mit Kaltkopf benötigt ca. 230 cm² bei einer Höhe von 21 cm und kann auf dem Deckel des Kryostats angebracht werden. In Abb. 6.3a ist der Deckel des Kryostaten mit dem Platzbedarf des Kaltkopfes (blaue Fläche) und der Stromzuführungen (rote Flächen) zu sehen. Der Kompressor für einen Kühlteil kann dem Strombegrenzer beige gestellt werden und benötigt

ca. $0,5 \text{ m}^2$ an Grundfläche. Der Kompressor für einen weiteren Kaltkopf kann über dem ersten angebracht werden, wodurch kein weiterer Platzbedarf an Grundfläche entsteht. Der Kryostat hat eine Grundfläche von ca. $0,5 \text{ m}^2$ (vgl. Abb. 6.3b). Zuzüglich einer Freifläche um den Strombegrenzer liegt der gesamte Platzbedarf des Strombegrenzer-Prototypen unter 4 m^2 .

Wie bereits erwähnt, dient der Kryostat bei der Badkühlung, neben der thermischen Isolation, als Vorratsbehälter für den flüssigen Stickstoff. Bei einem eventuellen Totalausfall der redundant ausgeführten Kälteanlagen kann der Strombegrenzer eine Zeit lang weiter betrieben werden. Der Vorrat von 1 dm^3 flüssigem Stickstoff, mit einer Verdampfungswärme von 160 kJ/dm^3 bei normalem Umgebungsdruck, reicht bei den abgeschätzten Gesamtverlusten des Strombegrenzer-Prototypen von 208 W (vgl. Tab. 6.3) für ca. 13 min. Für diesen Fall muss eine Druckentlastung für den Kryostaten vorgesehen werden.

Die parallelgeschalteten Impedanzen müssen ebenfalls im Kryostaten untergebracht werden. Der Platzbedarf für die nötigen Hochleistungspuls widerstände beträgt ca. $(260 \times 220 \times 220) \text{ mm}$ für jede Phase [EBG09]. Werden diese unter dem Deckel des Kryostaten angebracht, ist ein maximaler Füllstand mit flüssigem Stickstoff von $37,9 \text{ cm}$ oder 186 dm^3 möglich, unter Berücksichtigung des Volumens der Stromzuführungen (vgl. Abb. 6.3c). Dies ermöglicht bei Ausfall sämtlicher Kälteanlagen eine maximale Überbrückungszeit von ca. 39 Stunden und 44 min.

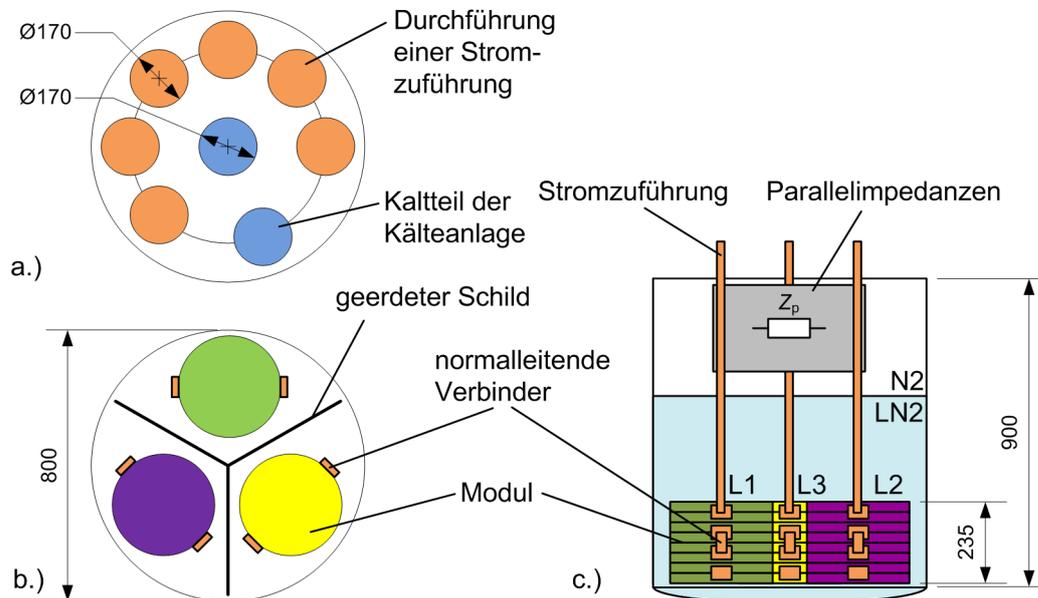


Abb. 6.3: Anordnung der strombegrenzenden Module für einen 3-phasigen Strombegrenzer in der 10 kV-Mittelspannungsebene – a.) Platzbedarf der Stromzuführungen (rot) und der Kühlteile (blau) auf dem Kryostatdeckel. b.) und c.) Anordnung der Module für alle drei Phasen (grün, gelb und lila) und der Platzbedarf für die Parallelimpedanzen innerhalb des Kryostaten (der geerdete Schild ist in c.) für eine bessere Übersichtlichkeit entfernt).

6.3 Verluste

Eine der charakteristischen Eigenschaften des supraleitenden Zustands ist die verlustfreie Übertragung von Gleichstrom [Kom95, BK04]. Die Übertragung von Wechselstrom hingegen ist bei supraleitenden Bandleitern, wie bei normalleitenden Materialien, ebenfalls verlustbehaftet. Im Bandleiter treten Hysterese und Wirbelstromverluste auf, die zu Wechselstromverlusten P_{AC} zusammengefasst werden. Zusammen mit den Verlusten der normalleitenden Verbindern zwischen den Modulen P_{VB} und den Isolationsverlusten P_{ISO} des Kryostaten ergeben sich die Gesamtverluste eines supraleitenden Strombegrenzers P_V zu:

$$P_V = P_{AC} + P_{SZ} + P_{VB} + P_{ISO} \quad [6.3]$$

In den folgenden Kapiteln werden die Verlustmechanismen der einzelnen Komponenten behandelt und deren Verluste abgeschätzt. Mit Vorgriff auf die Ergebnisse sind die abgeschätzten Verluste der einzelnen Komponenten in Tab. 6.3 zusammengefasst. Alle angegebenen Verluste fallen bei einem Temperaturniveau von 77 K an und müssen mit dem Wirkungsgrad der Kälteanlage zur notwendigen elektrischen Anschlussleistung der Kälteanlage P_e skaliert werden.

	77 K	293 K
Module P_{AC} (W)	41	
Normalleitende Verbinder P_{VB} (W)	7	
Stromzuführungen P_{SZ} (W)	144	
Isolationsverluste des Kryostaten P_{ISO} (W)	16	
Gesamtverluste des Strombegrenzer-Prototyps P_V (W)	208	
Notwendige elektrische Anschlussleistung der Kälteanlage im Dauerbetrieb P_e (W)		5200

Tab. 6.3: Abgeschätzte Verluste eines supraleitenden Strombegrenzer-Prototyps in der Mittelspannungsebene – Um die Verluste bei 77 K auf die anzuwendende elektrische Anschlussleistung der Kälteanlage zu übertragen, wurde ein Wirkungsgrad η_{eff} von 0,04 für die Kälteanlage angenommen.

6.3.1 Strombegrenzende Module und Stromzuführungen

Die Verluste der strombegrenzenden Module setzen sich aus den Wechselstromverlusten P_{AC} in den Bandleitern und den Ohmschen-Verlusten P_{VB} in den normalleitenden Verbindern zwischen den Modulen zusammen. Die Wechselstromverluste eines YBCO-Bandleiters sind abhängig von der Frequenz f des Wechselstroms, der Stromstärke I und, bei einem Stapel aus mehreren Bandleitern, von der Anordnung der Bandleiter [NGAW09]. Die Frequenz f ist für Betriebsmit-

tel in der Energietechnik praktisch konstant und wird nicht weiter beachtet. Die mögliche Anordnung der supraleitenden Schicht zum benachbarten Substrat (Back-to-Back, Back-to-Face oder Face-to-Face) können bei Bandleitern mit einer schwach magnetisierbaren Stabilisierung vernachlässigt werden (vgl. Kapitel 2.3 und Kapitel 4.2.4). Bei Bandleitern mit einer schwach magnetisierbaren Stabilisierung ist somit vor allem die Ausrichtung und der Abstand der Bandleiter sowie die Stromstärke für die Höhe der Wechselstromverluste von Bedeutung.

Eine übliche Angabe von Verlusten ist die Angabe der Verlustenergie während einer Periode des Wechselstroms pro Meter Bandleiterlänge ($J/(s \text{ m})$). Durch die bifilare Spiralwicklung ist die Stromrichtung antiparallel in direkt benachbarten Bandleitern. Für eine Abschätzung der Verlustenergie finden sich zahlreiche Literaturwerte, experimentell bestimmt oder in Modellen berechnet [Nor70]. Die Literaturwerte streuen stark und liegen meist unterhalb von 100 mW/m [AG06, Cle08, NGAW09]. Die Wechselstromverluste der Bandleiter des Strombegrenzer-Prototyps lassen sich mit diesen Literaturwerten bei einer Netzfrequenz von 50 Hz auf ca. $8 \dots 60 \text{ W}$ abschätzen. Zu beachten ist, dass der abgeschätzte Wert für die Verlustenergie eine große Unsicherheit besitzt, da die in der Literatur angegebenen Verlustenergien für unterschiedliche Bandleiterabstände gelten, die meist größer sind als in den bifilar gewickelten Spiralspulen der Module. Für die Abschätzung der Gesamtverluste der strombegrenzenden Module wird eine Verlustleistung von 41 W angenommen.

Die Verluste der normalleitenden Verbinder der supraleitenden Module lassen sich ebenfalls abschätzen. Pro Phase müssen insgesamt 8 Module miteinander verbunden werden. Um jeweils 2 der 8 Module parallel zu schalten, werden 8 normalleitende Verbinder benötigt. Um die zwei parallelgeschalteten Module seriell miteinander zu verbinden, benötigt man weitere 3 Verbinder. Somit werden pro Phase 11 normalleitende Verbinder benötigt. Die Höhe eines Moduls mit seitlich angebrachten Kontakten beträgt ca. $2,5 \text{ cm}$. Der Abstand zwischen den Modulen wird mit $0,5 \text{ cm}$ angenommen. Für die Länge eines normalleitenden Verbinders werden 4 cm angenommen. Daraus ergibt sich eine die Gesamtlänge der normalleitenden Verbinder aller drei Phasen von $3 \cdot 11 \text{ Verbinder} \cdot 4 \text{ cm} = 1,32 \text{ m}$. Die Anordnung der Module und der Verbinder nach Abb. 6.1 ist in Abb. 6.3c zu sehen. Bei einer angenommenen mittleren Stromdichte von 4 A/mm^2 und einem spezifischen Widerstand von Kupfer bei 80 K von $0,00215 \mu\Omega\text{m}$ ergibt sich eine Verlustleistung der normalleitenden Verbinder von ca. 7 W , wobei der Übergangswiderstand zwischen den normalleitenden Verbindern und dem supraleitenden Bandleiter vernachlässigt wurde.

Die Verluste der Stromzuführungen lassen sich mit dem Wert des minimalen Wärmestroms einer optimierten Stromzuführung abschätzen. Bei einer optimierten badgekühlten Stromzuführung aus Kupfer ergibt sich pro Stromzuführung ein minimaler Wärmestrom von ca. 40 W/kA (vgl. Kapitel 6.1). Bei einem Nennstrom von 600 A betragen die gesamten Verluste P_{SZ} der sechs Stromzuführungen ca. 144 W .

6.3.2 Kryostat

Unabhängig von der Belastung des Strombegrenzers wird trotz der Isolation des Kryostaten Wärme über die Kryostatoberfläche ins Innere des Kryostaten eingebracht. Ein Kryostat wird für die Isolation bei einem Temperaturniveau von 77 K in der Regel doppelwandig ausgeführt. Im Isolationsraum zwischen der inneren und der äußeren Wand wird Wärme auf unterschiedliche Weise übertragen. Die wesentlichen Übertragungsformen sind:

- Festkörperwärmeleitung in Verbindungselementen
- Wärmeleitung in Restgasatmosphäre
- Wärmestrahlung
- Konvektion der Restgasatmosphäre

Ein typischer Wert für die gesamten oberflächenbezogenen Verluste eines Kryostats für flüssigen Stickstoff liegt zwischen 1 W/m^2 und 8 W/m^2 [FK09]. In Abb 6.3 ist eine Skizze des Kryostaten für den Strombegrenzer mit Angabe der Größenverhältnisse zu sehen. Die Oberfläche des Kryostaten für den Strombegrenzer-Prototyp beträgt ca. $3,3 \text{ m}^2$ bei einem Kryostat-Durchmesser von 0,8 m und einer Kryostat-Höhe von 0,9 m. Unter Annahme von flächenbezogenen Verlusten von 5 W/m^2 betragen die Isolationsverluste P_{ISO} des Kryostaten ca. 16,3 W.

6.4 Investitionskosten

Um die gesamten Investitionskosten für einen supraleitenden Strombegrenzer abzuschätzen, werden auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse des konzeptionellen Entwurfs für alle Komponenten eines ersten Strombegrenzer-Prototypen die Beschaffungskosten bestimmt. Für die Investitionskosten der supraleitenden Module werden nur die reinen Materialkosten für den Bandleiter berücksichtigt. Fertigungskosten und mögliche Kostenreduzierung durch hohe Stückzahlen und Serienproduktion von Modulen wurden nicht berücksichtigt. In Tab. 6.4 sind die Investitionskosten, die sich aus den Abschätzungen in diesem Kapitel ergeben, komponentenweise aufgelistet. Der so abgeschätzte gesamte Investitionsbetrag für einen Strombegrenzer-Prototypen mit einer Nennspannung von 10 kV und einem Nennstrom von 600 A beläuft sich auf 185.000 €.

Strombegrenzende Module, normalleitende Verbinder und Stromzuführungen

Mit der gewählten Bandleiterlänge von 2·17 m je Modul ergibt sich bei 8 Einzelmodulen einer Phase eine Gesamtbandleiterlänge für drei Phasen von 816 m. Mit den spezifischen Kosten für YBCO-Bandleiter zu Beginn dieser Arbeit von $360 \text{ €}/(\text{kA m})$ (vgl. Kapitel 2.3) ergibt sich eine

Komponenten	Abgeschätzte Investitionskosten (gerundet)
YBCO-Bandleiter für 24 strombegrenzende Module (Länge: je 2·17 m; $I_c = 303$ A)	50.000 €
Stromzuführungen (12 kV; 6×600 A)	24.000 €
Kryostat (\varnothing 0,8 m; Höhe 0,9 m)	50.000 €
Kälteanlage (2×300 W bei 77 K; $\eta_{\text{eff}} = 0,04$)	61.000 €

Tab. 6.4: Investitionskosten für einen Strombegrenzer-Prototypen in der Mittelspannungsebene – Die Investitionskosten der Module umfassen die reinen Materialkosten der Bandleiter. Die übrigen Investitionskosten stammen aus Angeboten entsprechender Hersteller.

Investitionssumme für die YBCO-Bandleiter von 89.303 €. Im Laufe dieser Arbeit sind die spezifischen Kosten für YBCO-Bandleiter auf 200 €/ (kA m) gefallen. Die Investitionskosten für YBCO-Bandleiter belaufen sich bei diesen geringeren spezifischen Kosten auf 49.614 €. Für die abgeschätzten Investitionskosten des Strombegrenzer-Prototyps werden die aktuellen Investitionskosten von ca. 50.000 € für die YBCO-Bandleiter veranschlagt.

Das Gesamtgewicht der 33 normalleitenden Verbinder aus Kupfer beträgt 1,8 kg. Bei einem Kupferpreis² von ca. 3,5 €/kg ergeben sich die Materialkosten für die normalleitenden Verbinder aus Kupfer zu 6,3 €. Für die Investitionskosten des Strombegrenzer-Prototyps werden die Kosten für die normalleitenden Verbindern vernachlässigt.

Für normalleitende Stromzuführungen existieren kommerzielle Anbieter. Für eine kommerzielle 12 kV-Stromzuführung mit 600 A Nennstrom können Kosten von 4000 € angenommen werden [FK09]. Für einen dreiphasigen Strombegrenzer mit 6 Stromzuführungen summieren sich die Investitionskosten für die Stromzuführungen auf 24.000 €.

Kälteanlage

Für die Kälteanlage wird eine kommerzielle Kälteanlage mit dem Gifford-McMahon-Kreisprozess ausgewählt. Die Investitionskosten für die Kälteanlage sind von der Menge der bestellten Anlagen abhängig. Nach Angaben des Herstellers belaufen sich die Kosten für eine Kälteanlage mit einer maximalen Kälteleistung von 300 W bei 77 K auf ca. 30.300 € [FK09]. Um für eine Redundanz bei der Kälteanlage zu sorgen und um mehr Kühlleistung nach der Kurzschlussstrombegrenzung zur Verfügung zu stellen, werden zwei Kälteanlagen mit einer gesamten Kälteleistung von 300 W für die Investitionskosten berücksichtigt.

²An Rohstoffmärkten gehandelter Kupferpreis im Juni 2009

Kryostat

Das Fassungsvermögen des Kryostaten ist eine der Größen, die die Investitionskosten für den Kryostaten bestimmen. Ausgehend von der Konstruktion der strombegrenzenden Module als bifilar-gewickelte Spiralspule entsprechend Kapitel 5.2.2, können parallelgeschaltete Module platzsparend direkt benachbart angeordnet werden [KSW08]. Der Durchmesser eines Moduls mit seitlich angebrachten Kontakten beträgt ca. 30 cm, die Höhe eines Moduls ca. 2,5 cm. Für eine Phase mit einer Matrix aus 4×2 Modulen, mit einem Abstand von 0,5 cm zwischen den Modulen, ergibt sich ein Stapel aus 8 Einzelmodulen mit einer Gesamthöhe von 23,5 cm. In Abb. 6.3 sind schematische Zeichnungen des Kryostaten mit den darin befindlichen Modulen für alle drei Phasen zu sehen. Als Anhaltswerte für die Größe des Kryostaten sind die Höhe der Module und die Höhe und der Durchmesser des Kryostaten angegeben. Der Kryostat muss entsprechend dem Druckanstieg durch den Phasenübergang des Stickstoffs nach der Kurzschlussstrombegrenzung als Druckbehälter konstruiert und ausgeführt werden. Die notwendige Ausführung des Kryostaten als Druckbehälter erhöht die Investitionskosten des Kryostaten deutlich. Für einen Kryostaten nach Abb. 6.3, geprüft auf einen Druck von 10 bar, werden Investitionskosten von ca. 50.000 € angenommen [FK09].

7 Zusammenfassung

Der Anspruch an die Kurzschlussfestigkeit von modernen Energieversorgungsnetzen steigt durch eine zunehmend engere Vermaschung bestehender Netze sowie mit der steigenden Anzahl von dezentralen Energieeinspeisungen und die damit verbundene Umkehrung des Energieflusses zwischen den Spannungsebenen. Supraleitende Strombegrenzer sind als neuartige Betriebsmittel zur Kurzschlussstrombegrenzung zu bezeichnen. Der Einsatz von supraleitenden Strombegrenzern erweitert die Möglichkeiten beim Neubau sowie das Nachrüsten bereits bestehender Energieversorgungsnetze, um bei steigender Kurzschlussleistung die Belastungsgrenzen der bereits bestehenden Betriebsmittel nicht zu überschreiten.

Supraleitende Strombegrenzer mit dem resistiven Begrenzungsprinzip sind aufgrund ihres vergleichsweise einfachen Wirkprinzips und des rein Ohmschen Verhaltens während der Kurzschlussstrombegrenzung besonders interessant für den Einsatz in der elektrischen Energieversorgung. Vielversprechend als begrenzende Elemente in supraleitenden resistiven Strombegrenzern sind Hochtemperatursupraleiter mit $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) als supraleitende Verbindung, ausgeführt als dünne Schicht in Bandleitern. Diese YBCO-Bandleiter zeichnen sich durch eine hohe Stromdichte und ihre, für einen Strombegrenzer, sehr günstigen physikalischen Eigenschaften aus. Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften besitzen YBCO-Bandleiter ein hohes Potential für die kostengünstige Konstruktion und den Betrieb eines supraleitenden Strombegrenzers.

In dieser Arbeit wurden YBCO-Bandleiter für die Verwendung in supraleitenden Strombegrenzern mit dem resistiven Begrenzungsprinzip untersucht. Einige der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bereits in Fachzeitschriften veröffentlicht [SKN, SNKS08, SSWJ08, SLSN09].

Die charakteristischen Eigenschaften von YBCO-Bandleitern für die Verwendung in supraleitenden resistiven Strombegrenzern wurden an Kurz- und 1-m-Proben systematisch experimentell untersucht und die theoretischen Zusammenhänge erarbeitet. Zudem wurde der Einfluss der Bandleiterhomogenität und der Stabilisierung sowie der Einfluss einer Parallelschaltung zweier Bandleiter und der Bandleiterkühlung auf das Begrenzungs- und Erwärmungsverhalten theoretisch und experimentell untersucht und bewertet.

Auf Grundlage der Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Untersuchungen wurde ein Bandleitermodell erstellt zur Bestimmung der wichtigsten Parameter zur Optimierung des Begrenzungsverhaltens von YBCO-Bandleitern. Die Bedeutung der untersuchten grundlegenden Zusammenhänge des Begrenzungsverhaltens gelten nicht nur für alleinstehende Strom-

begrenzersysteme, sondern auch für kombinierte Betriebsmittel wie supraleitende strombegrenzende Kabel und Transformatoren. Als Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Untersuchungen des Begrenzungsverhaltens von YBCO-Bandleiterproben bleibt festzuhalten:

- Die Bandleitererwärmung während der Kurzschlussstrombegrenzung wird, bei gegebenen Anschlussbedingungen, neben der Bandleiterlänge von dem Schichtdickenverhältnis der Deckschicht und der Substratschicht bestimmt.
- Als geeignete und praktikable Parameter zur Optimierung eines Bandleiters wurden die physikalischen Eigenschaften der Deckschicht und deren anteilige Dicke an der gesamten Bandleiterstabilisierung sowie die Länge des Bandleiters bestimmt.
- Als Leistungsgrenze der Bandleiter während der Kurzschlussstrombegrenzung wurde die Temperatur des Bandleiters identifiziert. Bei Einhaltung der maximal zulässigen Bandleitertemperatur sind die Einzelgrößen elektrische Feldstärke und die Dauer der Kurzschlussstrombegrenzung isoliert betrachtet ohne Bedeutung.
- Als Ursache für die Abnahme des kritischen Stroms beim Überschreiten der maximal zulässigen Bandleitertemperatur wurde eine mechanische Beschädigung der supraleitenden Schicht in YBCO-Bandleitern, hervorgerufen durch mechanische Spannungen innerhalb des Bandleiters mit steigender Temperatur, als höchst wahrscheinliche Ursache ermittelt.
- Bandleiter mit einer guten Homogenität des kritischen Stromes eignen sich unter allen Anschlussbedingungen auch mit einer geringen thermischen und elektrischen Stabilisierung als strombegrenzende Elemente und können zudem als hochohmige Begrenzungselemente mit Schaltercharakteristik ausgeführt werden.
- Der durch eine geringe Homogenität des kritischen Stromes verursachte ungleichmäßige Widerstandsaufbau und eventuell auftretende "Hot-Spots" in einem Bandleiter während der Kurzschlussstrombegrenzung können durch eine niederohmige Stabilisierung homogenisiert bzw. vermieden werden. Bandleiter mit einer Homogenität des kritischen Stromes eignen sich folglich nur mit einer niederohmigen Stabilisierung als strombegrenzende Elemente.
- Das Begrenzungsverhalten eines Bandleiters, gekühlt mit gasförmigen Stickstoff zeigt keinen signifikanten Unterschied zum Begrenzungsverhalten eines Bandleiters, gekühlt mit flüssigem Stickstoff.

Mit den, aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen an Bandleiterproben gewonnenen Ergebnissen wurde ein allgemeiner Entwurfsgang mit zugehörigen Entwurfsgleichungen für einen supraleitenden resistiven Strombegrenzer erstellt. Unter Berücksichtigung der allgemeinen anwendungsspezifischen Vorgaben eines Energieversorgungsnetzes wurde der

erstellte allgemeine Entwurfsgang in einem Beispielentwurf für ein Modul eines modular aufgebauten Strombegrenzers in der 10 kV-Mittelspannungsebene umgesetzt und erläutert.

Ausgehend von den experimentellen und theoretischen Untersuchungen an Bandleiterproben, wurden strombegrenzende Module mit einer Bandleiterlänge von 10 m konstruiert und mit konventionellen Testverfahren untersucht. An den Modulen wurde der Einfluss der Wicklungsart – monofilar und bifilar – auf das Begrenzungsverhalten und die supraleitende Stromtragfähigkeit untersucht.

In dieser Arbeit wurde erstmalig ein supraleitendes strombegrenzendes Modul mit dem, für Strombegrenzer, neuartigen Testverfahren Power-Hardware-in-the-Loop untersucht. Neuartige Testverfahren wie Power-Hardware-in-the-Loop können dazu beitragen die Entwicklungszeit zu verkürzen und die Tests von Modulen eines supraleitenden Strombegrenzers vergleichsweise kostengünstig durchzuführen.

Abschließend wurde ein konzeptioneller Entwurf eines Strombegrenzer-Prototypen mit einem Nennstrom von 600 A für die 10 kV-Mittelspannungsebene durchgeführt und die Investitionskosten sowie die Hauptabmessungen abgeschätzt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an supraleitenden, resistiv strombegrenzenden Modulen sowie des Entwurfsgangs und des konzeptionellen Entwurfs eines Strombegrenzer-Prototyps sind:

- Der Entwurfsgang zeigt, dass hochohmige Bandleiter ohne eine zusätzliche Stabilisierung einen Parallelwiderstand benötigen, um die Vorgaben eines typischen Energieversorgungsnetzes der Mittelspannungsebene einzuhalten.
- Die Art der Wicklung der Module – monofilar und bifilar – hat bei hohen Überströmen nur einen geringen Einfluss auf das Begrenzungsverhalten.
- Eine bifilare Bandleiterwicklung in einem Modul reduziert den Einfluß des magnetischen Feldes auf den kritischen Strom des Bandleiters und ist somit für die Anwendung eines supraleitenden resistiven Strombegrenzers zu bevorzugen. Dies gilt vor allem beim möglichen Auftreten von geringen Überströmen.
- Der Entwurfsgang für einen supraleitenden resistiven Strombegrenzer unter Berücksichtigung der physikalischen Bandleitereigenschaften und der allg. anwendungsspezifischen Vorgaben eines Energieversorgungsnetzes in der Mittelspannungsebene wurde vorgestellt und erfolgreich durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass die untersuchten hochohmigen Bandleiter mit einer starken Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes ohne eine Parallelimpedanz diese Vorgaben nicht erfüllen können.
- Die Abschätzung der Investitionskosten eines supraleitenden Strombegrenzer-Prototyps für die 10 kV-Mittelspannungsebene zeigt, dass die Materialkosten der Bandleiter gegenwärtig ca. 1/3 der Gesamtkosten beinhalten. Den größten Kostenanteil nehmen gegenwärtig die Kälteanlage und der Kryostat in Anspruch.

A Physikalische Material- und Stoffeigenschaften

Die angegebenen Werte der physikalischen Größen dienen als Richtwerte. In den Tabellen sind die Werte bei 77 K und bei 293 K aufgetragen. Werte bei einer abweichenden Temperatur sind entsprechend gekennzeichnet. Jeder Literaturwert ist mit einer Quellenangabe versehen. Werte ohne Quellenangabe wurden im Rahmen dieser Arbeit über eigene Messungen bestimmt. Für die theoretischen Untersuchungen und für die Modellierung der YBCO-Bandleiter wurde aus den entsprechend angegebenen Quellen für den spezifischen Widerstand und die spezifische Wärmeleitfähigkeit eine Funktion in Abhängigkeit der Temperatur abgeleitet.

Bei reinen, elementaren Metallen hängen viele spezifische Materialeigenschaften, wie der elektrische Widerstand und die thermische Leitfähigkeit, stark vom Reinheitsgrad und Störungen des Kristallgitters ab. Die folgenden Angaben der elementaren Metalle Kupfer und Silber gelten für RRR im Bereich von 10...100.

A.1 Hastelloy C276

HASTELLOY C276 (Werkstoffnummer 2.4819) ist eine Nickel-Chrom-Molybdänlegierung mit dem Werkstoffname NiMo16Cr15W und gehört zur Werkstoffhauptgruppe der Nickel-Knetwerkstoffe (DIN) [WIA05]. Hastelloy C276 zeichnet sich durch eine gute Temperaturbeständigkeit und eine besondere Korrosionsbeständigkeit aus. Die Legierungsanteile variieren zwischen den Herstellern was sich auf die spezifischen Größen auswirkt. Die Dichte Γ_{Hs} von HASTELLOY C276 beträgt bei 293 K 8,9 g/cm³ [WIA05].

	77 K	293 K
spez. elektrischer Widerstand, ($\mu\Omega$ m)	1,24...1,28	1,25 ^b ...1,30 ⁺
spez. Wärmekapazität ^c , (J/(kg K))	274	424
Wärmeleitfähigkeit ^d (W/(K m))	6,42 [#]	11,63 ⁺⁺
Temperaturkoeffizient der Länge ^e , ($10^{-6}/K$)	7,35	10,9
Elastizitätsmodul ^a , (GPa)	200-214*	180-201*
Dehngrenze $R_{p,0,2}$ ^a , (MPa)	690-715*	455-516*

^a[CEC06], ^b [WIA05], ^c[Lin98], ^d[Sch09b], ^e[TH], *76 K, #80 K, + 295 K, ++ 300 K

Tab. A.1: Spezifische Materialeigenschaften von Hastelloy C276

A.2 Nickel-Wolfram NiW(5%at)

Die Nickel-Wolfram-Legierung NiW(5%at) besitzt bei 293 K eine Dichte Γ_{NiW} von $10,4 \text{ g/cm}^3$ [Eki06]. Da es sich bei dieser Legierung um keine technische Legierung handelt, sind wenige physikalische Eigenschaften dieses Materials veröffentlicht. Bei der Entwicklung von Substratbändern mit einer Texturierung für YBCO Bandleitern wurden bisher besonders die mechanischen Eigenschaften untersucht und diese veröffentlicht [CEC06, Eki06]. In Tab. A.2 sind als mechanische Eigenschaften das Elastizitätsmodul und die Dehngrenze bei unterschiedlichen Temperaturen angegeben.

	76 K	295 K
Elastizitätsmodul, (GPa)	128 GPa	118 GPa
Dehngrenze $R_{p,0,2}$, (MPa)	257 MPa	176 MPa

Tab. A.2: Spezifische Materialeigenschaften der Nickel-Wolfram-Legierung NiW(5%at) [CEC06]

A.3 Silber

Die Dichte Γ_{Ag} von Silber beträgt bei 293 K $10,47 \text{ g/cm}^3$ [Eck97]. Für die theoretischen Untersuchungen dieser Arbeit wurde für den spezifischen Widerstand von Silber die aus den Daten von [Mat79] abgeleitete, lineare Funktion $\rho_{\text{Ag}}(T) = [-2,082 \cdot 10^{-9} + 6,17 \cdot 10^{-11} \cdot T] \Omega \text{ m}$ verwendet. Die Funktion der spezifischen Wärmekapazität von Silber ist hingegen stark nicht-linear. Daher wurde die temperaturabhängige Funktion der spezifischen Wärmekapazität aus zwei Teilfunktionen zusammengesetzt. Die aus den Daten von [Eck97] und [TH] abgeleiteten Funktionen sind:

im Temperaturbereich von 77...300 K: $c_{\text{Ag}}(T) = [236,686 \cdot (1 - 0,9846^T)] \text{ J/(kg K)}$

im Temperaturbereich über 300 K: $c_{\text{Ag}}(T) = (220,56 + 0,046 \cdot T) \text{ J/(kg K)}$

	77 K	293 K
spez. elektrischer Widerstand ^b , ($\Omega \text{ m}$)	0,00289 [#]	0,01587
spez. Wärmekapazität ^c , (J/(kg K))	162	235
Wärmeleitfähigkeit ^c , (W/(m K))	436	421
Temperaturkoeffizient der Länge ^d , ($10^{-6}/\text{K}$)	11,83	18,9

^a[CEC06], ^b[Mat79], ^c[Eck97], ^d[TH], [#]80 K

Tab. A.3: Spezifische Materialeigenschaften von Silber (Ag)

A.4 Kupfer

Die Dichte Γ_{Cu} von Kupfer beträgt bei 293 K $8,96 \text{ g/cm}^3$ [Eki06]. Einige weitere physikalischen Eigenschaften von Kupfer sind stark von der Reinheit des Materials abhängig. Störungen des Kristallgitters, verursacht durch Fremdstoffe oder Versetzungen aufgrund plastischer Verformung, beeinträchtigen insbesondere die Temperaturabhängigkeit einiger physikalischer Größen. Für die theoretischen Untersuchungen wurden für den spezifischen Widerstand und die spezifische Wärmekapazität folgende Funktionen verwendet.

Temperaturabhängige Funktion des spezifischen Widerstands $\rho_{\text{Cu}}(T)$ nach [Eck97]:
 $(-3,06 \cdot 10^{-9} + 6,841 \cdot 10^{-11} \cdot T) \Omega \text{ m}$

Temperaturabhängige Funktion der spezifischen Wärmekapazität $c_{\text{Cu}}(T)$ nach [TH]:
 $(-206,7 + 8,17 \cdot T - 0,049 \cdot T^2 + 1,502 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 2,3 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 1,377 \cdot 10^{-10} \cdot T^5) \text{ J/(kg K)}$

	77 K	293 K
spez. elektrischer Widerstand, ($\mu\Omega \text{ m}$)	0,00215 ^{d, #}	0,01543 ^d
spez. Wärmekapazität ^b , (J/(kg K))	192	386 ⁺⁺
Wärmeleitfähigkeit ^e , (W/(K m))	576	402
Temperaturkoeffizient der Länge ^f , ($10^{-6}/\text{K}$)	7,73	16,5
Elastizitätsmodul, (GPa)		
weich gegläht ^a	112 [*]	104 ⁺
kalt gezogen ^a	140 [*]	130 ⁺
Dehngrenze $R_{p0,2}$, (MPa)		
weich gegläht	46 ^{a,*} , 30 ^{c,*}	51 ^{a,+} , 70 ^{b,+} , 25 ^{c,+}
kalt gezogen (40%) ^c	370 [*]	320 ⁺

^a[RM67], ^b[Eki06], ^c[SDR92], ^d[Mat79], ^e[Eck97], ^f[TH] *76 K, #80 K, + 295 K, ++ 300 K

Tab. A.4: Spezifische Materialeigenschaften von Kupfer (Cu)

A.5 Stickstoff

In Tabelle A.5 sind ausgewählte Stoffeigenschaften von Stickstoff bei Normaldruck (1013 mbar), in flüssiger und gasförmiger Phase, zusammengefasst. Die Verdampfungswärme von Stickstoff beträgt 199 kJ/kg bei einer Siedetemperatur von $77,35 \text{ K}$ [Hae81]. Die in Abb. A.1 gezeigte Kühlkurve nach [MC62] ist nur bei einem thermischen Gleichgewicht zwischen dem einge-

tauchten Körper und dem flüssigen Stickstoff gültig. Die Kühlkurve bei einem transienten Wärmeübergang weicht deutlich von der Kühlkurve des stationären Wärmeübergangs ab [Fis99].

	77 K	273 K
Dichte (kg/m ³)		
Gas	4,6	1,234
Flüssigkeit	804	
spez. Wärmekapazität (J/(kg K))		
Gas	1039	1042
Flüssigkeit	2030	
spez. Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))		
Gas	0,0075	0,024
Flüssigkeit	0,1398	

Tab. A.5: Spezifische Stoffeigenschaften von Stickstoff (N) [Hae81].

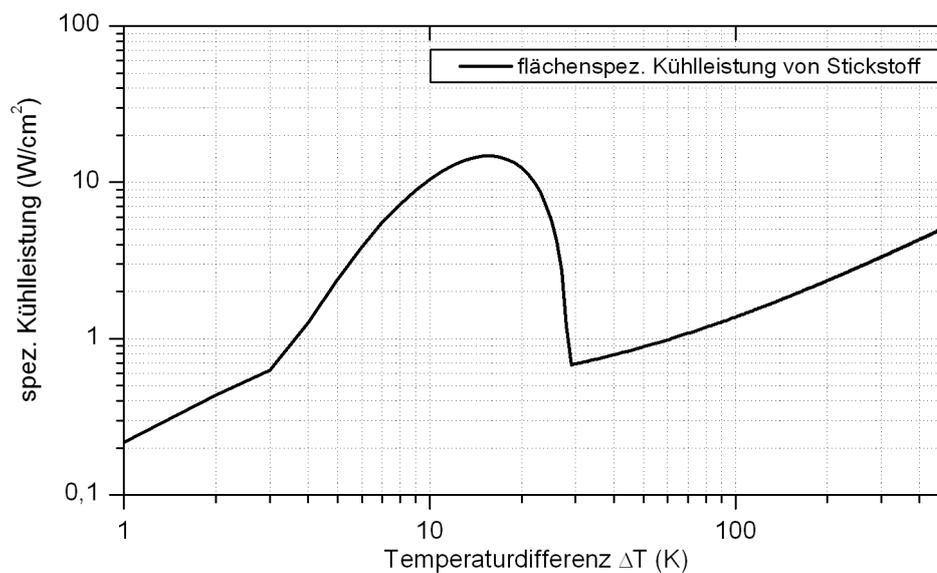


Abb. A.1: Statische spezifische Kühlleistungskurve nach [MC62]

B Symbolliste und Indizes

A_K	Kühlfläche des Bandleiters, (mm^2)
A_{SZ}	Querschnittsfläche der Stromzuführung, (m^2)
b	Bandleiterbreite, (mm)
B_{c2}	obere kritische magnetische Flussdichte, (T)
C	Wärmekapazität, (J/K)
c	spezifische Wärmekapazität, (J/(kg K))
d	Bandleiterdicke, (m)
d_D	Dicke der Deckschicht, (m)
d_{HTSL}	Dicke der supraleitenden Schicht, (m)
d_S	Dicke des Substrats, (m)
E	elektrisches Feld (E-Feld), (V/cm)
E_c	kritisches elektrisches Feld, (V/cm)
f	Frequenz, (Hz)
I	Gleichstrom, Effektivwert eines Wechselstroms, (A)
I_c	kritischer Strom, (A)
\bar{I}_c	arithmetischer Mittelwert von I_c , (A)
I''_{kQ}	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom, (A)
$I_{lim,max}$	maximaler, limitierter Kurzschlussstrom, (A)
$I_{lim,min}$	minimaler, limitierter Kurzschlussstrom, (A)
$I_{n,ers}$	skalierter Ersatznennstrom, (A)
$I_{V,M}$	Modulstrom, (A)
i_{lim}	begrenzter Kurzschlussstrom, (A)
I_n	Nennstrom, (A)
i_p	Stoßkurzschlussstrom, (A)
$i_{p,lim}$	max. Amplitude des begrenzten Kurzschlussstroms, (A)
i_{sim}	Strom in der Simulation, (A)
j_c	kritische physikalische Stromdichte, (A/cm^2)

j_e	technische Stromdichte, (A/cm ²)
k_c	Sicherheitsfaktor, (-)
k_p	Kurzschlussstromverhältnis unbegrenzt, (-)
$k_{p,lim}$	Kurzschlussstromverhältnis begrenzt, (-)
K	Korrekturkoeffizient, (Ω s)
L	Lorenz-Zahl, (V ² /K ²)
L_{SZ}	Länge der Stromzuführung, (m)
l	Bandleiterlänge, (m)
$l_{F,a}$	Anfangslänge einer Fehlstelle, (m)
l_F	Länge einer Fehlstelle, (m)
l_S	Länge einer Störung, (m)
n	Exponent (n-Wert), (-)
P_{ab}	abgeführte Leistung, (W)
P_{AC}	Wechselstromverluste, (W)
P_e	elektrische Anschlussleistung, (W)
P_{ISO}	Isolationsverluste, (W)
$P_{SL,max}$	maximale Verlustleistung im Bandleiter, (W)
P_v	Gesamte Verluste eines Strombegrenzers, (W)
P_{VB}	Ohmsche Verluste normaleitender Verbinder, (W)
$P_{v,M}$	Verlustleistung des Moduls, (W)
$p_{v,seg}$	spezifische Verlustleistung eines Segments, (W)
$P_{v,SL}$	Verlustleistung des Bandleiters, (W)
$q_w''(T)$	Wärmestromdichte, (W/cm ²)
R'	Widerstandsbelag, (Ω /cm)
R_D	Widerstand der Deckschicht, (Ω)
R_F	Widerstand einer Fehlstelle, (Ω)
$R_F(l)$	Widerstandsfunktion einer Fehlstelle, (Ω)
$R_{F,min}$	minimaler Widerstand einer Fehlstelle, (Ω)
R_i	Quelleninnenwiderstand (Realteil), (Ω)
R_{inter}	Übergangswiderstand, (Ω)
R_{interD}	Widerstand der Deckschicht am Schichtübergang, (Ω)
$R_{M,max}$	maximaler Modulwiderstand, (Ω)

$R_{M,min}$	minimaler Modulwiderstand, (Ω)
$R_{M,TG}$	maximaler Widerstand für thermisches Gleichgewicht, (Ω)
$R_{M,Tmin}$	minimaler Modulwiderstand bei 77 K, (Ω)
$R_{M,Tmax}$	maximaler Modulwiderstand bei maximaler Bandleitertemperatur, (Ω)
$R_{M,TR}$	maximaler Modulwiderstand beim Rückkühlen, (Ω)
$R_{M,Umin}$	maximaler Widerstand bei Unterspannung, (Ω)
R_p	Parallelwiderstand, (Ω)
$R_{p0,2}$	Dehngrenze, (MPa)
R_{SD}	Widerstand der Deckschicht über der Störstelle, (Ω)
R_{seg}	Widerstand eines Bandleitersegments, (Ω)
R_{SL}	temperaturabhängiger Bandleiterwiderstand, (Ω)
$R_{SSB,max}$	maximaler Widerstand des Strombegrenzers, (Ω)
R_v	Vorwiderstand, (Ω)
r_{seg}	relativer Widerstandsbelag eines Bandleitersegments, (1/m)
S''_{kQ}	Kurzschlussleistung, (VA))
T_c	kritische Temperatur, (K))
T_H	obere Temperatur des Kreisprozesses, (K)
T_K	untere Temperatur des Kreisprozesses, (K)
T_{max}	maximale Bandleitertemperatur, (K))
t'	Pausenzeit, (s)
t_A	Ausschaltzeitpunkt, (s))
t_a	Beginn Kurzschlussstrombegrenzung, (s))
t_b	Bemessungs-Ausschaltzeit, (s))
$t_{p,lim}$	Zeitpunkt maximaler Kurzschlussstrom, (s)
U_0	Quellenspannung, (V)
$U_{0,ers}$	skalierte Ersatzquellenspannung, (V)
U_L	Spannung am Verbraucher, (V)
U_n	Nennspannung, (V)
$U_{n,ers}$	skalierte Nennspannung, (V)
$U_{n,min}$	minimale Spannung am Verbraucher, (V)

U_r	Bemessungsspannung, (V)
U_{SL}	Bandleiterspannung, (V)
u_{ref}	Referenzspannung, (V)
W_{SL}	umgesetzte Energie im Bandleiter, (J)
X_i	Imaginärteil Quelleninnenwiderstand, (Ω)
x	Widerstandsverhältnis, (-)
Z_i	Quelleninnenimpedanz, (Ω)
$Z_{i,ers}$	skalierte Ersatzinnenimpedanz, (Ω)
Z_L	Lastimpedanz, (Ω)
$Z_{L,n}$	Nennlastimpedanz, (Ω)
ΔL	Länge eines Bandleitersegments, (m)
ΔT	Temperaturanstieg, (K)
ΔU_i	Spannungsfall über Quelleninnenimpedanz, (V)
$\Delta U_{i,ers}$	Spannungsfall über skaliertes Quelleninnenimpedanz, (V)
ΔU_{SSB}	Spannungsfall über Strombegrenzer, (V)
δ	Homogenität des Bandleiters, (%)
ε	Dehnung, (%)
ε_{irr}	Dehnung mit irreversibler Änderung von I_c , (%)
Γ	Dichte, (kg/m^3)
η_C	Carnot-Wirkungsgrad, (-)
η_{eff}	effektiver Wirkungsgrad, (-)
λ	Wärmeleitfähigkeit, ($\text{W}/(\text{cm K})$)
Θ	Abweichung der Kristallachsen, ($^\circ$)
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand, ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
ρ_{inter}	flächenspezifischer Übergangswiderstand, (Ωmm^2)
σ	Zugspannung, (MPa)

Indizes

A	Abschaltung	lim	begrenzt
a	Anfang	max	maximal
ab	abgegeben	M	Modul
AC	Wechselstrom	mess	Messung
Ag	Silber	min	minimal
b	Begrenzung	n	Nennwert
C	Carnot	NiW	Nickel-Wolfram-Legierung
c	kritisch	off	Offset
Cu	Kupfer	p	parallel
D	Deckschicht	PID	PID-Regler
DC	Gleichstrom	r	Bemessung
e	Element, elektrisch	ref	Referenz
eff	effektiv	S	Substrat, Störstelle
ers	Ersatz	SD	Störstelle Deckschicht
F	Fehlstelle	seg	Segment
geo	geometrisch	sim	Simulation
H	warm	SL	Supraleiter
Hs	Hastelloy	SSB	supraleitender Strombegrenzer
HTSL	Hochtemperatursupraleiter	SZ	Stromzuführung
i	innen	T	Temperatur, Transfer
inter	Interlayer	TG	thermisches Gleichgewicht
irr	irreversibel	TR	rückkühlen
ISO	Isolation	Tmax	Maximaltemperatur
K	kalt, Kühlung	Tmin	Minimaltemperatur
komp	kompensiert	v	Verlust
kQ	Kurzschluss an der Stelle Q	VB	Verbinder
L	Last		

C Literaturverzeichnis

- [ABHT94] ALBRECHT, C. ; BOCK, J. ; HERRMANN, F. P. ; TOURRE, M. J. ; BRITTE/EURAM R&D PROGRAMME (Hrsg.). *European Development on superconducting oxide-based 1 kA (2 kA) DC current leads*. Oct. 1991 - Sept. 1993 (March 1994)
- [AG06] ASHWORTH, P. S. ; GRILLI, F.: A strategy for the reduction of ac losses in YBCO coated conductors. In: *Superconductor Science and Technology* (2006), 19, S. 227–232
- [Ame06] AMERICAN SUPERCONDUCTOR ; AMERICAN SUPERCONDUCTOR (Hrsg.). *Material safety data sheet*. 2006
- [Bac09] BACKES (Hrsg.). *Persönliche Mitteilung*. 27.03.2009
- [Bau99] BAUER, M.: *Herstellung und Charakterisierung von YBCO-Schichten und biaxial texturierten Pufferschichten auf technischen Substraten*. München : Technische Universität München, 1999
- [Ben08] BENTO STRATEGY (Hrsg.). *Superconductor Market Research HTS in 2008*. Februar 2008
- [BFS75] BUYANOV, L. Y. ; FRADKOV, B. A. ; SHEBALIN, Y. I.: A review of current leads for cryogenic devices. In: *Cryogenics* (1975), 15, S. 193–200
- [BK04] BUCKEL, W. ; KLEINER, R.: *Supraleitung: Grundlagen und Anwendungen*. 6., vollst. überarb. und erw. Aufl., 1. Nachdr. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA and Wiley-VCH, 2004 (Lehrbuch Physik). – ISBN 3–527–40348–5
- [BM86] BEDNORZ, G. J. ; MÜLLER, A. K.: Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. In: *Z. Phys. B - Condensed Matter* (1986), 64, S. 189–193
- [Bru04] BRUZZONE, P.: The index n of the voltage–current curve, in the characterization and specification of technical superconductors. In: *Physica C* (2004), 401, S. 7–14
- [BSK99a] BAUER, M. ; SEMERAD, R. ; KINDER, H.: YBCO films on metal substrates with biaxially aligned MgO buffer layers. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (1999), vol.9 no.2, S. 1502–1505

- [BSK99b] BAUER, M. ; SEMERAD, R. ; KINDER, H. ; WIESMANN, J. ; DZICK, J. ; FREYHARDT, C. H.: Large area YBCO films on polycrystalline substrates with very high critical current densities. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (1999), vol. 9 no.2, S. 2244–2247
- [CDLP04] CHEN, M. ; DONZEL, L. ; LAKNER, M. ; PAUL, W.: High temperature superconductors for power applications. In: *Journal of the European Ceramic Society* (2004), 24, S. 1815–1822
- [CE77] CLARK, F. A. ; EKIN, W. J.: Defining critical current. In: *IEEE Transactions on Magnetics* (1977), vol.13 no. 1, S. 38–40
- [CEC03] CHEGGOUR, N. ; EKIN, W. J. ; CLICKNER, C. C. ; VEREBELYI, T. D. ; THIEME, L. H. C. ; FEENSTRA, R. ; GOYAL, A.: Reversible axial-strain effect and extended strain limits in Y-Ba-Cu-O coatings on deformation-textured substrates. In: *Applied Physics Letters* (2003), vol. 83 no. 20, S. 4223–4225
- [CEC06] CLICKNER, C. C. ; EKIN, W. J. ; CHEGGOUR, N. ; THIEME, L. H. C. ; QIAO, Y. ; XIE, Y.-Y. ; GOYAL, A.: Mechanical properties of pure Ni and Ni-alloy substrate materials for Y–Ba–Cu–O coated superconductors. In: *Cryogenics* (2006), 46, S. 432–438
- [CET05] CHEGGOUR, N. ; EKIN, W. J. ; THIEME, L. H. C. ; XIE, Y.-Y. ; SELVAMANICKAM, V. ; FEENSTRA, R.: Reversible axial-strain effect in Y-Ba-Cu-O coated conductors. In: *Superconductor Science and Technology* (2005), 18, S. S319–S324
- [Cle08] CLEM, R. J.: Field and current distributions and ac losses in a bifilar stack of superconducting strips. In: *Physical Review B* (2008), 77, S. 134506
- [CMD88] CHAUDHARI, P. ; MANNHART, J. ; DIMOS, D. ; TSUEI, C. C. ; CHI, J. ; OPRYSKO, M. M. ; SCHEUERMANN, M.: Direct measurement of the superconducting properties of single grain boundaries in $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-d}$. In: *Physical Review Letter* (1988), vol. 60 no. 16, S. 1653–1665
- [Cry09] CRYOMECH, Inc. *Cryorefrigerator Specification Sheet AL300 with CP970*. 2009
- [DCML88] DIMOS, D. ; CHAUDHARI, P. ; MANNHART, J. ; LEGOUES, K. F.: Orientation dependence of grain boundary critical currents in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bicrystals. In: *Physical Review Letter* (1988), vol. 61 no. 2, S. 219–222
- [DF96] DRACH, V. ; FRICKE, J.: Transient heat transfer from smooth surfaces into liquid nitrogen. In: *Cryogenics* (1996), 36, S. 263–269

- [DFI08] DUL'KIN, I. ; FISHER, M. L. ; IVANOV, P. V. ; KALINOV, V. A. ; SIDOROV, A. V. ; YEVIN, V. D.: Temperature rise in a model of resistive HTS element of fault current limiter. In: *IEEE/CSC & ESAS* (2008)
- [DSF96] DRACH, V ; SACK, N. ; FRICKE, J: Transient heat transfer from surfaces of defined roughness into liquid nitrogen. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* (1996), 36 no. 9, S. 1953–1961
- [EBG09] EBG - ELEKTRONISCHE BAUELEMENTE GES.M.B.H. *High Pulse Load Resistors*. 2009
- [EBN03] ELSCHNER, S. ; BREUER, F. ; NOE, M. ; RETTELBACH, T. ; WALTER, H. ; BOCK, J.: Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2003), vol. 13 no.2, S. 1980–1983
- [EBW01] ELSCHNER, S. ; BREUER, F. ; WOLF, A. ; NOE, M. ; COWEY, L. ; BOCK, J.: Characterisation of BSCCO 2212 bulk material for resistive current limiters. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2001), vol.11 no.1, S. 2507–2510
- [Eck97] *Cryocomp: Elektronische Materialdatenbank*. 1997
- [Eki06] EKIN, W. J.: *Experimental techniques for low-temperature measurements: Cryostat design, material properties, and superconductor critical-current testing*. Oxford : Oxford Univ. Press, 2006. – ISBN 0–19–857054–6
- [Els09] ELSCHNER, S. (Hrsg.). *Persönliche Mitteilung*. 2009
- [FH00] FLOSDORFF, René ; HILGARTH, Günther: *Elektrische Energieverteilung*. 7., überarb. Stuttgart : Teubner, 2000 (Leitfaden der Elektrotechnik). – ISBN 3–519–16424–8
- [Fis99] FISCHER, S.: *Transiente Wärmeentwicklung und Wärmeabfuhr an supraleitenden Strombegrenzern in Flüssigstickstoff*. Aachen : Shaker Verlag, 1999. – ISBN 3–8265–6311–5
- [FK09] FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE, Institut für Technische P. *Interne Mitteilung*. 2009
- [GNB96] GOYAL, A. ; NORTON, P. D. ; BUDAI, D. J. ; PARANTHAMAN, M. ; SPECHT, D. E. ; KROEGER, M. D. ; CHRISTEN, K. D. ; HE, Q. ; SAFFIAN, B. ; LIST, A. F. ; LEE, F. D. ; MARTIN, M. P. ; KLABUNDE, E. C. ; HARTFIELD, E. ; SIKKA,

- K. V.: High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ thick films on biaxially textured metals. In: *Applied Physics Letters* (1996), 69 (12), S. 1795–1797
- [GPS04] GOYAL, A. ; PARANTHAMAN, M. ; SCHOOP, U.: The RABiTS approach: using Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates for high-performance YBCO superconductors. In: *MRS Bulletin* (2004), vol. 29 no. 8, S. 552–561
- [Gra00] GRANT, M. P.: Currents without borders. In: *Nature* (2000), 407, S. 139–141
- [GSR] GOLDACKER, W. ; SCHLACHTER, S. ; RINGSDORF, B. ; SCHMIDT, C. ; WEISS, K.-P. ; SCHWARZ, M. ; FANK, A. ; LAMPE, A. ; KLING, A. ; HELLER, R. *Final Report on HTS Materials for Fusion Magnets EFDA-No. TW5-TMS-HTSPER: Interner Bericht FE.5130.0073.0012 Fusions-Nr. 283: Deliverable No. 2*
- [Hae81] HAEFER, A. R.: *Kryo-Vakuumtechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin : Springer-Verlag, 1981
- [Han04] HANDKE, J.: *Herstellung langer ReBCO-Bandleiter mit ISD-Puffer*. München : Technische Universität München, 2004 (Diplomarbeit)
- [Haz07] HAZELTON, W. D. *Transmission level HTS fault current limiter*. 19-20. September 2007
- [HCD93] HERRMANN, F. P. ; COTTEVIEILLE, C. ; DUPERRAY, G. ; LERICHE, A. ; VERHAEGE, T. ; ALBRECHT, C. ; BOCK, J.: Cryogenic load calculation of high Tc current lead. In: *Cryogenics* (1993), 33 no. 5, S. 555–562
- [HDS07] HEUCK, K. ; DETTMANN, K.-D. ; SCHULZ, D.: *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007 (Springer-11774 /Dig. Serial]). – ISBN 978–3–8348–0217–0
- [HHJ04] HASSENZAHL, V. W. ; HAZELTON, W. D. ; JOHNSON, K. B. ; KOMAREK, P. ; NOE, M. ; REIS, T. C.: Electric power applications of superconductivity. In: *Proceedings of the IEEE* (2004), vol. 92 no. 10, S. 1655–1674
- [HM02] HILGENKAMP, H. ; MANNHART, J.: Grain boundaries in high-Tc superconductors. In: *Reviews of Modern Physics* (2002), Vol. 74, S. 485–549

- [HRS04] HERMAN, A. M. ; RICHTER, Wolfgang ; SITTER, Helmut: *Epitaxy: Physical principles and technical implementation*. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 3–540–67821–2
- [HS73] HUST, G. J. ; SPARKS, L. L. *Lorenz Ratios of technically important Metals and alloys*. February 1973
- [HSP09] HSP HOCHSPANNUNGSGERÄTE GMBH. *RIP-(Px100)-Kondensator-durchführung ETF/ETFt*. 2009
- [HSS00] HAMMERL, G. ; SCHMEHL, A. ; SCHULZ, R. R. ; GOETZ, B. ; BIELEFELDT, H. ; SCHNEIDER, W. C. ; HILGENKAMP, H. ; MANNHART, J.: Enhanced supercurrent density in polycrystalline $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ at 77 K from calcium doping of grain boundaries. In: *Nature* (2000), 407, S. 162–164
- [Hul93] HULL, R. J.: High-temperature superconducting current leads. In: *Cryogenics* (1993), 3, no. 1, S. 869–875
- [IM00] IIJIMA, Y. ; MATSUMOTO, K.: High-temperature-superconductor coated conductors: technical progress in Japan. In: *Superconductor Science and Technology* (2000), 13, S. 68–81
- [ITIK91] IIJIMA, Y. ; TANABE, N. ; IKENO, Y. ; KOHNO, O.: Biaxially aligned $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin film tapes. In: *Physica C* (1991), 185-189, S. 1959–1960
- [ITKI92] IIJIMA, Y. ; TANABE, N. ; KOHNO, O. ; IKENO, Y.: In-plane aligned $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates. In: *Applied Physics Letters* (1992), 60, S. 769–771
- [KAC04] KREISKOTT, S. ; ARENDT, N. P. ; COULTER, Y. J. ; DOWDEN, C. P. ; FOLTYN, R. S. ; GIBBONS, J. B. ; MATIAS, V. ; SHEEHAN, J. C.: Reel-to-reel preparation of ion-beam assisted deposition (IBAD)-MgO based coated conductors. In: *Superconductor Science and Technology* (2004), 17, S. S132–S134
- [KBB05] KREUTZ, R. ; BOCK, J. ; BREUER, F. ; JÜNGST, K.-P. ; KLEIMAIER, M. ; KLEIN, U. H. ; KRISCHEL, D. ; NOE, M. ; STEINGASS, R. ; WECK, K.-H.: System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2005), vol. 15 no. 2, S. 1961–1964
- [Kel08] KELLER, P.: *Elektromechanische und thermische Untersuchung an technischen Hochtemperatursupraleitern auf Bi-2223 Basis*. Heidelberg, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Diss., Juli 2008

- [KGL99] KITTEL, Charles ; GRESS, Matthias J. ; LESSARD, Anne: *Einführung in die Festkörperphysik*. 12., vollst. überarb. und aktual. München : Oldenbourg, 1999. – ISBN 3–486–23843–4
- [KGM] KUFFEL, R. ; GEISBRECHT, J. ; MAGUIRE, T. ; WIERCKX, P. R. ; MCLAREN, G. P.: RTDS - a fully digital power system simulator.
- [Kom95] KOMAREK, P.: *Hochstromanwendung der Supraleitung*. Stuttgart : Teubner, 1995 (Teubner StudienbücherAngewandte Physik). – ISBN 3–519–03225–2
- [Kom06] KOMAREK, P.: Potential and desire for HTS application in thermonuclear fusion. In: *Fusion Engineering and Design* (2006), 81, S. 2287–2296
- [Kop89] KOPITZKI, K.: *Einführung in die Festkörperphysik*. 2., überarb. und erw. Stuttgart : Teubner, 1989 (Teubner StudienbücherPhysik). – ISBN 3–519–13083–1
- [KPA08] KIM, J.-H. ; PARK, M. ; ALI, H. M. ; KIM, R. A. ; LEE, S. R. ; YOON, J.-Y. ; CHO, J. ; SIM, D. K. ; KIM, H. S. ; YU, K. I.: A SFCL modeling and application with real HTS material connecting to real time simulator. In: *Physica C* (2008), S. 2067–2071
- [KSW08] KRAEMER, H.-P. ; SCHMIDT, W. ; WOHLFART, M. ; NEUMUELLER, H.-W. ; OTTO, A. ; VEREBELYI, D. ; SCHOOP, U. ; MALOZEMOFF, P. A.: Test of a 2 MVA medium voltage HTS fault current limiter module made of YBCO coated conductors. In: *Journal of Physics: Conference Series* (2008)
- [KYT08] KOYANAGI, K. ; YAZAWA, T. ; TAKAHASHI, M. ; ONO, M. ; URATA, M.: Design and Test Results of a Fault Current Limiter Coil Wound With Stacked YBCO Tapes. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2008), vol. 18 no. 2, S. 676–679
- [LBB07] LEVIN, A. G. ; BARNES, N. P. ; BULMER, S. J.: Current sharing between superconducting film and normal metal. In: *Superconductor Science and Technology* (2007), 20, S. 757–764
- [LBR] LEVIN, A. G. ; BARNES, N. P. ; RODRIGUEZ, P. J. ; CONNORS, A. J. ; BULMER, S. J.: Stability and normal zone propagation speed in YBCO coated conductors with increased interfacial resistance. In: *To be published*
- [LE07] VAN DER LAAN, C. D. ; EKIN, W. J.: Large intrinsic effect of axial strain on the critical current of hightemperature superconductors for electric power applications. In: *Applied Physics Letters* (2007), 90, S. 052506

- [Lei03] LEIBROCK, H.: *Einfluss der Sauerstoffbeladung auf die thermische Ausdehnung, die Kompressibilität und die Übergangstemperatur von $NdBa_2Cu_3O_x$* . Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe, 2003 (Dissertation)
- [LGFP01] LARBALESTIER, D. ; GUREVICH, A. ; FELDMAN, D. M. ; POLYANSKII, A.: High-Tc superconducting materials for electric power applications. In: *Nature* (2001), vol. 414, S. 368–377
- [Lin98] LINDE, R. D.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics: 79th edition (electronic version)*. Boca Raton : CRC Press/Taylor and Francis, 1998
- [Lüm05] LÜMKEMANN, A.: *Herstellungsverfahren für lange Supraleiterbänder der 2. Generation*. München : Technische Universität München, 2005 (Dissertation)
- [LWH08] LLAMBES, H. J.-C. ; WEBER, S. C. ; HAZELTON, W. D.: Testing and Demonstration Results for the Transmission-Level (138kV) 2G Superconducting Fault Current Limiter at SuperPower. In: *To be published* (2008)
- [Mat79] MATULA, A. R.: Electrical resistivity of copper, gold, Palladium and silver. In: *Journal of physical and chemical reference data* (1979), Vol. 8 No. 4, S. 1147–1298
- [MC62] MERTE, H ; CLARK, A J.: Boiling heat-transfer data for liquid nitrogen at standard and near-zero gravity. In: *Advances in Cryogenic Engineering* (1962), Vol. 7, S. 546–550
- [MLF02] MA, B. ; LI, M. ; FISHER, L. B. ; KORITALA, E. R. ; BALACHANDRAN, B. U.: Inclined-substrate deposition of biaxially aligned template films for YBCO-coated conductors. In: *Physica C* (2002), 382, S. 38–42
- [Ne00] FÜR NORMUNG E.V., DIN Deutsches I.: *Supraleitfähigkeit, Teil 3: Messen des kritischen Stromes - Kritischer Strom (Gleichstrom) von Ag-Ummantelten oxidischen Bi-2212- und Bi-2223-Supraleitern*. DIN EN 61788-3. 2000
- [Ne01] FÜR NORMUNG E.V., DIN Deutsches I.: *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen*. DIN EN 60909-0 (EN 60909-0:2001). 2001
- [Ne04] FÜR NORMUNG E.V., Deutsches I.: *Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen*. DIN EN 62271-100. 2004
- [NGAW09] NGUYEN, N. D. ; GRILLI, F. ; ASHWORTH, P. S. ; WILLIS, O. J.: AC loss study of antiparallel connected YBCO coated conductors. In: *Superconductor Science and Technology* (2009), 22, S. 055014

- [NJ04] NOE, M. ; JÜNGST, K.-P. ; BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (Hrsg.). *Abschlussbericht: HTSL-Begrenzer auf Massivmaterialbasis: Materialforschung und Komponentenentwicklung: Förderkennzeichen 13N7567/9*. 2004
- [NJW02] NOE, M. ; JÜNGST, K.-P. ; WERFEL, N. F. ; ELSCHNER, S. ; BOCK, J. ; WOLF, A. ; BREUER, F.: Measurements and tests of HTS bulk material in resistive fault current limiters. In: *Physica C* (2002), 372-376, S. 1626–1630
- [NO99] NOE, M. ; OSWALD, R. B.: Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (1999), vol. 9 no. 2, S. 1347–1350
- [Noe98] NOE, M.: *Supraleitende Strombegrenzer als neuartige Betriebsmittel in Elektroenergiesystemen*. Leipzig : Leipziger Univ.-Verlag, 1998. – ISBN 3–933240–33–6
- [Nor70] NORRIS, W. T.: Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets. In: *Journal of Physics D* (1970), 3, S. 489–507
- [NS07] NOE, M. ; STEURER, M.: High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. In: *Superconductor Science and Technology* (2007), 20, S. R15–R29
- [NSY91] NARUMI, E. ; SONG, W. L. ; YANG, F. ; PATEL, S. ; KAO, H. Y. ; SHAW, T. D.: Critical current density enhancement in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$ films on buffered metallic substrates. In: *Applied Physics Letters* (1991), 58, S. 1202–1204
- [OO04] OEDING, D. ; OSWALD, R. B.: *Elektrische Kraftwerke und Netze: Mit 119 Tabellen*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag and Springer, 2004. – ISBN 3–540–00863–2
- [PBL06] POLAK, M. ; BARNES, N. P. ; LEVIN, A. G.: YBCO/Ag boundary resistivity in YBCO tapes with metallic substrates. In: *Superconductor Science and Technology* (2006), 19, S. 817–820
- [PCL] PAUL, W. ; CHEN, M. ; LAKNER, M.: *Hochtemperatursupraleiteranordnung und supraleitende Spule*. DE 19958727 A1. Patent
- [PKH06] PRUSSEIT, W. ; KINDER, H. ; HANDKE, J. ; NOE, M. ; KUDYMOW, A. ; GOL-DACKER, W.: Switching and quench propagation in coated conductors for fault current limiters. In: *Physica C* (2006), 445-448, S. 665–668

- [PNH05] PRUSSEIT, W. ; NEMETSCHKEK, R. ; HOFFMANN, C. ; SIGL, G. ; LÜMKERMANN, A. ; KINDER, H.: ISD process development for coated conductors. In: *Physica C* (2005), 426-431, S. 866–871
- [PSN05] PRUSSEIT, W. ; SIGL, G. ; NEMETSCHKEK, R. ; HOFFMANN, C. ; HANDKE, J. ; LÜMKERMANN, A. ; KINDER, H.: Commercial coated conductor fabrication based on inclined substrate deposition. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2005), vol. 15 no. 2, S. 2608–2610
- [Rad09] RADEBAUGH, R.: Cryocoolers: the state of the art and recent developments. In: *Journal of Physics: Condensed Matter* (2009), 21, S. 164219
- [RBR92] READE, P. R. ; BERDAHL, P. ; RUSSO, E. R.: Laser deposition of biaxially textured yttria-stabilized zirconia buffer layers on polycrystalline metallic alloys for high critical current Y-Ba-Cu-O thin films. In: *Applied Physics Letters* (1992), 61 (18), S. 2331–2333
- [RC83] REED, P. R. ; CLARK, F. A.: *Materials at low Temperatures*. Ohio : American Society for Metals, 1983. – ISBN 0–87170–146–4
- [RDB74] RÜDENBERG, R. ; DORSCH, H. ; BÖNING, W.: *Elektrische Schaltvorgänge*. 5., neubearb. Aufl. / Berlin : Springer, 1974. – ISBN 3–540–05766–8
- [RM67] REED, P. R. ; MIKESELL, P. R.: Low-Temperature (295 to 4 K) mechanical properties of selected copper alloys. In: *Journal of Materials* (1967), vol. 2 no. 2, S. 370–392
- [ROD05] RAMADAN, W. ; OGALE, B. S. ; DHAR, S. ; FU, F. L. ; SHINDE, R. S. ; KUNDALIYA, C. D. ; RAO, S. R. M. ; BROWNING, D. N. ; VENKATESAN, T.: Electrical properties of epitaxial junctions between Nb:SrTiO₃ and optimally doped, underdoped, and Zn-doped YBa₂Cu₃O_{7- α} . In: *Physical Review B* (2005), 72, S. 205333–1 – 205333–9
- [RSB08] REN, W. ; STEURER, M. ; BALDWIN, T.: Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* (2008), vol. 44 no. 4, S. 1286–1294
- [RSV03] RUPICH, W. M. ; SCHOOP, U. ; VEREBELYI, T. D. ; THIEME, L. H. C. ; ZHANG, W. ; LI, X. ; KODENKANDATH, T. ; NGUYEN, N. ; SIEGAL, E. ; BUCZEK, D. ; LYNCH, J. ; JOWETT, M. ; THOMPSON, E. ; WANG, J.-S. ; SCUDIÈRE, J. ; MALOZEMOFF, P. A. ; LI, Q. ; ANNAVAPU, S. ; CUI, S. ; FRITZEMEIER, L. ;

- ALDRICH, B. ; CRAVEN, C. ; NIU, F. ; SCHWALL, R. ; GOYAL, A. ; PARANTHAMAN, M.: YBCO coated conductors by an MOD/RABiTS process. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2003), vol. 13 no. 2, S. 2458–2461
- [SAB05] SCHMITT, H. ; AMON, J. ; BRAUN, D. ; DAMSTRA, G. ; HARTUNG, K.-H. ; JÄGER, J. ; KIDA, J. ; KUNDE, K. ; LE, Q. ; MARTINI, L. ; STEURER, M. ; UMBRICH, Ch. ; WAYMEL, X. ; NEUMANN, C.: Fault current limiters - application, principles and experience. In: *CIGRE Joint Colloquium* (2005), SC A3 & B3, 205
- [Sch03a] SCHLABBACH, Jürgen: *Elektroenergieversorgung: Betriebsmittel, Netze, Kennzahlen und Auswirkungen der elektrischen Energieversorgung ; mit CD-ROM. 2.*, vollst. überarb. und erw. Berlin : VDE-Verl., 2003. – ISBN 3–8007–2662–9
- [Sch03b] SCHLACHTER, S.: *T_c-Änderung von R_{1-y}Ca_yBa₂Cu₃O_x unter hohem Druck: Einfluss von Dotierung und Struktur.* Forschungszentrum Karlsruhe, 2003 (Dissertation)
- [Sch09a] SCHWARZ, M. (Hrsg.). *Persönliche Mitteilung.* 03.03.2009
- [Sch09b] SCHWARZ, M.: *Wärmeleitfähigkeit supraleitender Kompositleiter im Temperaturbereich von 4 K bis 300 K.* Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe, 2009 (Dissertation)
- [SCX07] SELVAMANICKAM, V. ; CHEN, Y. ; XIONG, X. ; XIE, Y.-Y. ; REEVES, L. J. ; ZHANG, X. ; QIAO, Y. ; LENSETH, P. K. ; SCHMIDT, M. R. ; RAR, A. ; HAZELTON, W. D. ; TEKLETSADIK, K.: Recent progress in second-generation HTS conductor scale-up at SuperPower. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2007), vol. 17 no. 2, S. 3231–3234
- [SCX08] SELVAMANICKAM, V. ; CHEN, Y. ; XIONG, X. ; XIE, Y.-Y. ; MARTCHEVSKI, M. ; RAR, A. ; QIAO, Y. ; SCHMIDT, M. R. ; KNOLL, A. ; LENSETH, P. K. ; WEBER, S. C.: High performance 2G wires : From R&D to pilotscale manufacturing. In: *IEEE/CSC & ESAS* (2008), No. 6
- [SDK07] SHIN, S. H. ; DIZON, R. C. J. ; KO, R. K. ; KIM, H. T. ; HA, W. D. ; OH, S. S.: Reversible tensile strain dependence of the critical current in YBCO coated conductor tapes. In: *Physica C* (2007), 463-465, S. 736–741
- [SDR92] SIMON, J. N. ; DREXLER, S. E. ; REED, P. R.: *Nist Monograph. Bd. 177: Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures.* Washington : U.S. Government printing office, 1992

- [SF95] SMITH, R. D. ; FICKETT, R. F.: Low-temperature properties of silver. In: *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* (1995), Vol. 100 No. 2, S. 119–171
- [SFB08] SCHMITT, H. ; FILHO, A. J. ; BRAUN, D. ; DAMSTRA, G. ; HARTUNG, K.-H. ; HIGUCHI, N. ; JÄGER, J. ; KIDA, J. ; MARTINI, L. ; STEURER, M. ; UMBRICH, Ch. ; WAYMEL, X.: *Guideline on the impacts of fault current limiting devices on protection systems*. Paris : CIGRÉ, 2008. – ISBN 978–2–85873–027–8
- [Sil16] SILSBEE, B. F.: A note on electrical conduction in metals at low temperatures. In: *Journal of the Washington Academy of Sciences* (1916), S. 597–602
- [SKN] SCHACHERER, Chr. ; KUDYMOW, A. ; NOE, M.: Dissipated energy as a design parameter of coated conductors for their use in resistive fault current limiters. In: *Journal of Physics: Conference Series* , 97
- [SKN07] SCHMIDT, W. ; KRAEMER, H.-P. ; NEUMUELLER, H.-W. ; SCHOOP, U. ; VEREBELYI, D. ; MALOZEMOFF, P. A.: Investigation of YBCO coated conductors for fault current limiter applications. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2007), vol. 17 no.2, S. 3471–3474
- [SLSN09] SCHACHERER, Chr. ; LANGSTON, J. ; STEURER, M. ; NOE, M.: Power Hardware-in-the-Loop testing of a YBCO coated conductor fault current limiting module. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2009), vol. 19 no. 3, S. 1801–1805
- [SNKS08] SCHACHERER, Chr. ; NOE, M. ; KUDYMOW, A. ; SCHWARZ, M.: Comparison of quench behaviour of different coated conductors. In: *Advances in Cryogenic Engineering* (2008), Vol. 54, S. 494–501
- [SOP05] SUGANO, M. ; OSAMURA, K. ; PRUSSEIT, W. ; SEMERAD, R. ; ITOH, K. ; KIYOSHI, T.: Intrinsic strain effect on critical current and its reversibility for YBCO coated conductors with different buffer layers. In: *Superconductor Science and Technology* (2005), 18, S. 369–372
- [SRT05] SCHOOP, U. ; RUPICH, W. M. ; THIEME, L. H. C. ; VEREBELYI, T. D. ; ZHANG, W. ; LI, X. ; KODENKANDATH, T. ; NGUYEN, N. ; SIEGAL, E. ; CIVALE, L. ; HOLESINGER, G. T. ; MAIOROV, B. ; GOYAL, A. ; PARANTHAMAN, M.: Second generation HTS wire based on RABiTS substrates and MOD YBCO. (2005), vol. 15 no. 2, S. 2611–2616

- [SSWJ08] SCHWARZ, M. ; SCHACHERER, Chr. ; WEISS, K.-P. ; JUNG, A.: Thermodynamic behaviour of a coated conductor for currents above I_c . In: *Superconductor Science and Technology* (2008), 21, S. 054008
- [Sti09] STIRLING CRYOGENICS & REFRIGERATION BV. *SPC: Stirling Process Cryogenerators*. 2009
- [Sup08] SUPERPOWER INC. *Test Data Report on SP-KITP-20080331*. 27. März 2008
- [SX08] SELVAMANICKAM, V. ; XIE, Y.-Y. *Progress in scale-up of 2G HTS wire at SuperPower - Part I*. 2008
- [TH] TOULOUKIAN, S. Y. ; HO, Y. C.: *Thermophysical properties of matter: The TPRC data series*
- [Uso07] USOSKIN, A.: Progress in Development and Fabrication of YBCO-Coated Conductors at EHTS-Bruker. In: *IEEE/CSC & ESAS* (2007), No. 2
- [Wal74] WALTERS, R. C.: Design of multistrand conductors for superconducting magnet windings. In: *Brookhaven National Laboratory* (1974), BNL 18928 AADD 74-2
- [WAT87] WU, K. M. ; ASHBURN, R. J. ; TORNG, J. C. ; HOR, H. P. ; MENG, L. R. ; GAO, L. ; HUANG, J. Z. ; WANG, Q. Y. ; CHU, W. C.: Superconductivity at 93K in a new mixed phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. In: *Physical Review Letter* (1987), vol. 58 no. 9, S. 908–910
- [Wei04] WEISS, K.-P.: *Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes der CuO_2 -Ebenen von Sauerstoffordnung und Druck in $RBa_2Cu_3O_x$ mit ($R=Y, Nd$)*. Forschungszentrum Karlsruhe, 2004 (Dissertation)
- [WF93] WESCHE, R. ; FUCHS, M. A.: Design of superconducting current leads. In: *Cryogenics* (1993), 34, no. 2, S. 145–154
- [WIA05] *WIAM-Metallinfo Online*. 2005
- [WT96] WILLIAMS, V. M. G. ; TALLON, L. J.: Ion size effects on T_c and interplanar coupling in $RBa_2Cu_3O_{7-d}$. In: *Physica C* (1996), 258, S. 41–46
- [XLR07] XIONG, X. ; LENSETH, P. K. ; REEVES, L. J. ; RAR, A. ; QIAO, Y. ; SCHMIDT, M. R. ; CHEN, Y. ; LI, Y. ; XIE, Y.-Y. ; SELVAMANICKAM, V.: High Throughput Processing of Long-Length IBAD MgO and Epi-Buffer Templates at SuperPower. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2007), vol. 17 no. 2, S. 3375–3378

Karlsruher Schriftenreihe zur Supraleitung

Prof. Dr.-Ing. M. Noe, Prof. Dr. rer. nat. M. Siegel (Hrsg.)

Zu den Herausforderungen moderner Energieversorgungsnetze zählt die Beherrschung steigender Kurzschlussströme unter ökonomischen und technologischen Aspekten. Besonders interessant in diesem Zusammenhang sind supraleitende Strombegrenzer mit dem resistiven Begrenzungsprinzip als neuartige Betriebsmittel aufgrund ihrer besonderen physikalischen Eigenschaften.

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche, aktuell verfügbare Hochtemperatursupraleiter aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, sogenannte YBCO-Bandleiter, für die Verwendung in supraleitenden resistiven Strombegrenzern systematisch untersucht.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde ein allgemeiner Entwurfsgang mit zugehörigen Entwurfsgleichungen erstellt sowie ein konzeptioneller Entwurf eines Strombegrenzer-Prototypen für die 10 kV-Mittelspannungsebene durchgeführt mit Abschätzung der Investitionskosten.

ISSN: 1869-1765

ISBN: 978-3-86644-412-6

www.uvka.de

