

# Supraleitende Strombegrenzer - RESI10

Wescley Tiago B. de Sousa<sup>1</sup>

## Stichwörter

Supraleitung — Kurzschlußstrom — Strombegrenzer — Supraleiterbänder

<sup>1</sup>Labor für angewandte Supraleitung (LASUP) - Bundesuniversität von Rio de Janeiro

Email: wescley@daad-alumni.de

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Power Hardware in the Loop (PHIL)	1
3	Skalierung	2
4	Charakterisierung von YBCO-Bandleitern	3
5	Ergebnisse	4
6	Fazit	5
	Danksagung	5
	Literatur	5

## 1. Einleitung

Für Kraftwerke und Stromnetze sind Kurzschlüsse teuer. Bereits beim Bau der Anlagen muss jede Komponente auf die maximal mögliche Belastung bei einem Kurzschluss ausgelegt werden. Kommt es dann tatsächlich zu einem Zwischenfall, verursachen Ausfallzeiten und beschädigte Systemkomponenten zusätzliche Kosten. Ein neuartiges System zur Beherrschung von Kurzschlüssen, das wesentlich die Sicherheit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von elektrischen Anlagen in Kraftwerken und beim Ausbau der Stromnetze erhöhen kann, sind die so genannte Supraleitende Strombegrenzer (SSB) [1, 2, 3, 4].

Verschiedene Anlagendesigns ermöglichen es, derartige Komponenten auf die spezifischen Anforderungen vor Ort einzustellen [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9]. Etliche Prototypen werden derzeit in verschiedenen Einsatzorten erprobt. Beim anstehenden Ausbau der Stromnetze in aller Welt können derartige Strombegrenzer teure Nachrüstungen vermeiden und die Integration neuer, dezentraler Kleinkraftwerke wie etwa Windparks erleichtern.

Abbildung 1 zeigt zwei erfolgreiche Projekten, die auf supraleitenden Werkstoff bestehen. Beide wurden von Nexans Superconductors GmbH in enger Partnerschaft mit dem KIT-ITEP entwickelt.

Der Einsatz der Supraleitungs-Technologie für Kurzschlussstrombegrenzer unterstützt die vorhandene Netzstruktur. In elektrischen Übertragungs- und Verteilnetzen auftretende Kurzschlussströme werden sehr schnell, effektiv, selbsttätig und

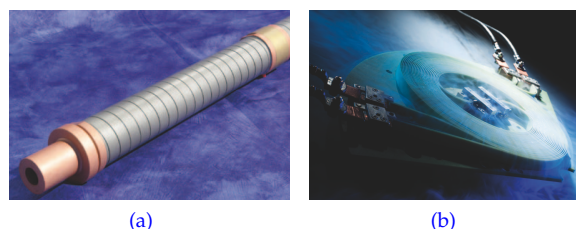


Abbildung 1. Einzelne Komponente des (a) Curl-10 Projekts [2, 10, 11] und (b) ENSYSTROB Projekts [3, 12].

damit eigensicher begrenzt. Supraleitende Kurzschlussstrombegrenzer sind nach einer kurzen Rückkühlzeit wieder einsatzbereit, ohne dass weitere Maßnahmen erforderlich werden [13, 14].

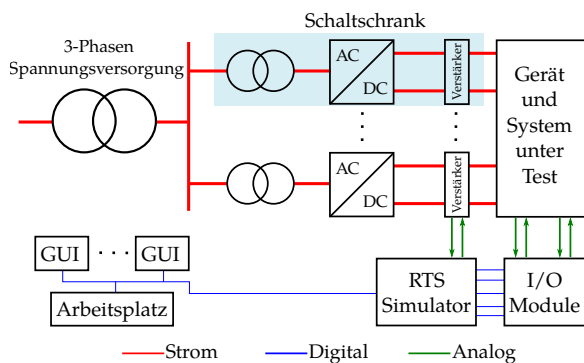
Genutzt werden dafür die besonderen Eigenschaften hochtemperatur supraleitender Materialien. Supraleiterbänder der zweiten Generation werden heute von verschiedenen Herstellern kommerziell vertrieben. Sie werden mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Im supraleitenden Zustand verlieren sie ihren elektrischen Gleichstromwiderstand vollständig. Bei Wechselstromanwendungen verbleibt ein äußerst geringer Restwiderstand, der den Stromfluss im Normalfall praktisch nicht beeinflusst. Beim Überschreiten eines bestimmten Stromwertes bricht die Supraleitung schlagartig zusammen, innerhalb von Millisekunden entsteht ein elektrischer Widerstand. Dieser Widerstand begrenzt extrem schnell und sehr effektiv den Anstieg eines Kurzschlussstroms und schützt so das Stromnetz. Der Supraleiter erwärmt sich dabei. Nach einer kurzen Regenerationsphase kann der Strombegrenzer wieder in den Nennbetrieb gehen. Die Regeneration erfolgt, wie die Strombegrenzung, voll automatisch ohne einen Eingriff von außen.

## 2. Power Hardware in the Loop (PHIL)

*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.

Eine Erweiterung des HIL-Testverfahrens wird als *Power*

*Hardware in the Loop* (PHIL) bezeichnet. 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.



**Abbildung 2.** Schema des *Power Hardware in the Loop* Aufbaus.

Die *Power Hardware in the Loop* Prüfeinrichtung mit digitaler Echtzeitsimulation (RTS) des Instituts für Technische Physik (ITEP) ist eine wichtige Teile des EnergyLab2.0 von der Helmholtz-Gemeinschaft, die Kooperationspartner in FZ Jülich, DLR Stuttgart und KIT Karlsruhe hat.

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, die Grundkonfiguration der PHIL Prüfeinrichtung des ITEP kann vielseitig sein, da der RTS Simulator einphasige oder dreiphasige Stromsysteme sowie DC und AC Anwendungen bieten kann. Konverter und Verstärker werden normalerweise in einem Schaltschrank hingestellt.

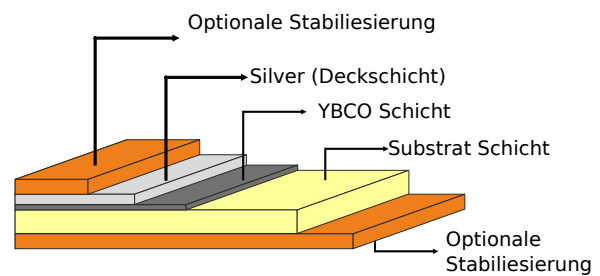
Konverter werden von Isoliertransformatoren zugeführt, um Mehrphasenverbindungen der Verstärker zu ermöglichen. Das prüfende Gerät kann ebenfalls einphasig oder dreiphasig sein oder eine Kombination von mehreren Geräte, wie z.B. eine Mikronetz.

### 3. Skalierung

Für supraleitende Strombegrenzer ermöglicht das PHIL Testverfahren Kurzschluss tests in unterschiedlichen Netzstrukturen. 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.

Die heute verfügbare supraleitende Strombegrenzer sollen in der Regel in Mittelspannungsnetz eingebaut werden. Der Einbau von derartigen Betriebsmittel geschieht nur nach zahlreichen Labortests, sodass die Zuverlässigkeit in die Strombegrenzer erhöhen werden kann. Die Zuverlässigkeit kann mittels des PHIL-Simulators erreicht werden, da der Simulator in der Lage ist, das Stromsysteme, wo der SSB installiert werden soll, nachzubilden. Daher ist der PHIL-Simulator für die Entwicklung eines Strombegrenzers ganz entscheidend.



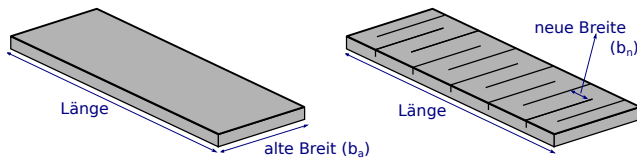
**Abbildung 3.** Schematischer Schichtaufbau eines YBCO Bandleiters. Die Schichtdicken sind nicht maßstabsgerecht dargestellt.

Jedoch wegen der hohen erforderlichen Leistung, um einen supraleitenden Strombegrenzer Prototyp zu testen, kann die Tests nicht machbar sein. Es ist aber machbar den supraleitenden Strombegrenzer zu skalieren, das heißt, die Eigenschaften des supraleitenden Strombegrenzers zu verändern. Auf diese Weise ist es möglich die Nennleistung von dem Strombegrenzern unter die Leistungsgrenzen des Phil-Simulators zu bringen. Im Falle von einer zutreffender Skalierung, können alle Ergebnisse der Simulation für eine höhere Leistung extrapoliert werden.

Eine Möglichkeit, die Nennleistung eines SSB zu verringern, ist durch die Senkung der kritischen Stromwerte der Supraleiterbänder.

Supraleiter mit YBCO als supraleitendes Material für energietechnische Anwendungen werden als mehrschichtiges Komposit in einem Bandleiter ausgeführt. Auf einem flexiblen metallischen Substratband wird 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 aufgebrachten Schichten bleibt der Bandleiter flexibel und kann zu Spulen verarbeitet werden. Der schichtweise Aufbau eines YBCO-Bandleiters ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt [15].

Verändert man die Form eines üblichen Band zu einem mäanderförmigen Band, bekommt man ein Band mit niedrigeren kritischen Stromwert (Abbildung 4).



**Abbildung 4.** (a) übliches Band und (b) mäanderförmiges Band.

In Abbildung 4a sieht man ein übliches Band der Länge  $\ell_a$  und Breite  $b_a$ , wohingegen Abbildung 4b einem mäanderförmigen Band zeigt, das Länge  $\ell_n$  und Breite  $b_n$  beträgt (tatsächlich kann  $b_n$  als die Breite des Strompfades verstanden werden). Das mäanderförmige Band kann aus ein übliches Band erzeugt werden. Dazu kann ein übliches Band mit Lasern geschnitten werden. Der Laserschnitt senkt jedoch nur bis das Substratband, damit man die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Bandleiters nicht zu stark zu beeinflussen. Darüber hinaus beeinflusst ein teilweiser Schnitt den Widerstand des Bandes nicht stark.

Die kritische Stromwert ( $I_{c_{neu}}$ ) des mäanderförmigen Bandes lässt sich durch die folgende Gleichung berechnen:

$$I_{c_{neu}} = \frac{b_n}{b_a} \times I_{c_{alt}} \quad (1)$$

Der Strompfad  $\ell_n$  berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\ell_n = b_a \times \frac{\ell_a}{b_n} \quad (2)$$

Aus den Gleichungen 1 und 2 ist man imstande die Skalierung der Supraleiterbänder auszuführen.

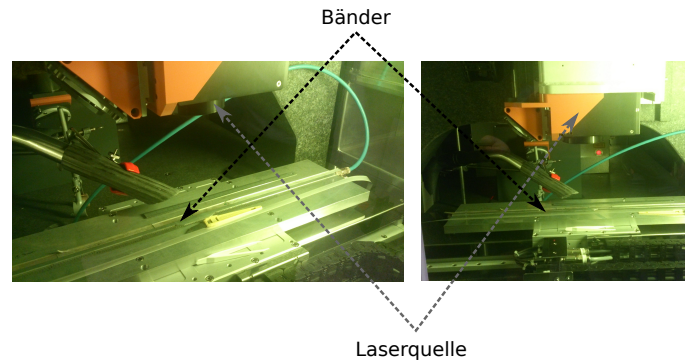
#### 4. Charakterisierung von YBCO-Bandleitern

Es wurden vier gleiche Bänder der Firma SuperPower verwendet, um die Veränderung des kritischen Stromes zu untersuchen. Drei Bänder wurden im Laser-Labor des Instituts für Technische Physik gelasert. Solches Labor ist mit einem infraroten YAG-Laser ausgestattet, dessen Wellenlänge 1030 nm beträgt. Der Laserimpuls (zu schneiden) pulst mit 400 kHz und dauert 10 ps. Abbildung 5 zeigt ein Foto des Lasergeräts am ITEP.

In Tabelle 1 sind die Abmessungen der Laserschnitte in der untersuchten Bandleiter angegeben.

Zum Zwecke der Vergleichung des kritischen Strom zwischen die Bänder vor und nach dem Laserschnitt wurde das Band B\_01 nicht gelasert.

Der kritische Strom  $I_c$  definiert die supraleitende Stromtragfähigkeit eines Bandleiters und ist als charakteristische Größe für den Entwurf eines supraleitenden Strombegrenzers



**Abbildung 5.** Lasergerät am ITEP.

**Tabelle 1.** Übersicht der geometrischen Daten aller untersuchter Bandleiter.

Band	Breite		Strompfad	
	$b_a$	$b_n$	$\ell_a$	$\ell_n$
B_01	12 mm	12 mm	15 cm	15 cm
B_02		2.2 mm		27 cm
B_03		1.32 mm	5 cm	45 cm
B_04		0.44 mm		136 cm

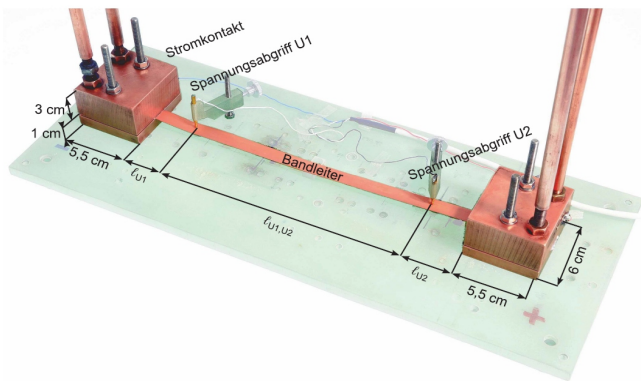
und bestimmt in Verbindung mit dem vorgegebenen Nennstrom eines Strombegrenzers die nötige Anzahl an parallelgeschalteten Bandleitern.

Für die energietechnische Anwendung von Supraleitern als resistiver Strombegrenzer wird der stromabhängige Supraleiter Normal-Übergang (S-N-Übergang) des Supraleiters ausgenutzt. Beim Überschreiten des kritischen Stromes beginnt der Supraleiter einen Widerstand aufzubauen und den Strom wirksam zu begrenzen. 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 Gleichung 3 (das Potenzgesetz)

$$E = E_c \left[ \frac{I}{I_c} \right]^n \quad (3)$$

Im Bereich des kritischen Stromes  $I_c$  liegt bei YBCO-Bandleitern ein typischer Wert für den Exponent  $n$  (n-Wert) zwischen 20 und 50 [16, 17]. Der kritische Strom eines Supraleiters ist definiert durch das Erreichen der kritischen E-Feldstärke  $E_c$  entlang des Supraleiters. Die  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  Kriterium für die kritische E-Feldstärke hat sich allgemein für die Charakterisierung von Supraleitern für energietechnische Anwendungen durchgesetzt [18].

Zur Bestimmung des kritischen Stromes  $I_c$  wurde eine Messeinrichtung aus einer Gleichstromquelle und einem Messsystem für kleine Spannungen in Anspruch genommen. Die gewählten Bandleiter wurden in einer Probenhalterung

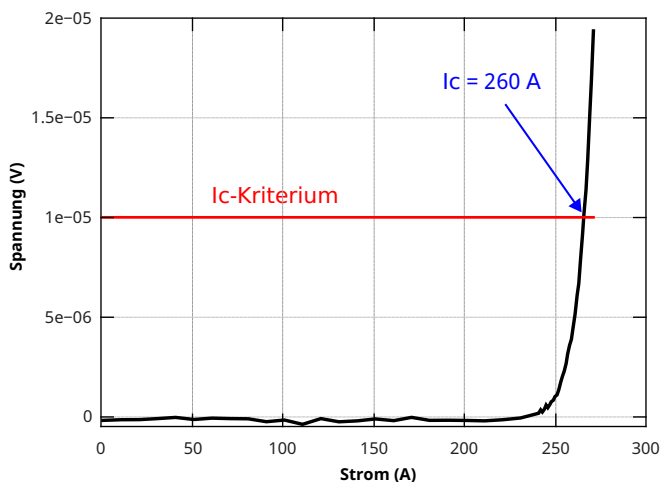


**Abbildung 6.** Probhalterung zur Untersuchung des kritischen Stromes [15].

vollständig in flüssigen Stickstoff eingetaucht. Die Bänder wurden horizontal zwischen zwei Kupferblöcke gepresst. Die Kupferblöcke waren auf einer Grundplatte aus Glasfaser verstärktem Kunststoff (GFK) angebracht. Der Spannungsabgriff erfolgte durch gefederte Goldkontakte auf der Oberseite (Supraleiterseite) des Leiters. Der Füllstand des  $\text{LN}_2$  Bades betrug mindestens 1 cm über dem Leiter. Die Probhalterung mit Bemaßung ist in Abbildung 6 dargestellt.

## 5. Ergebnisse

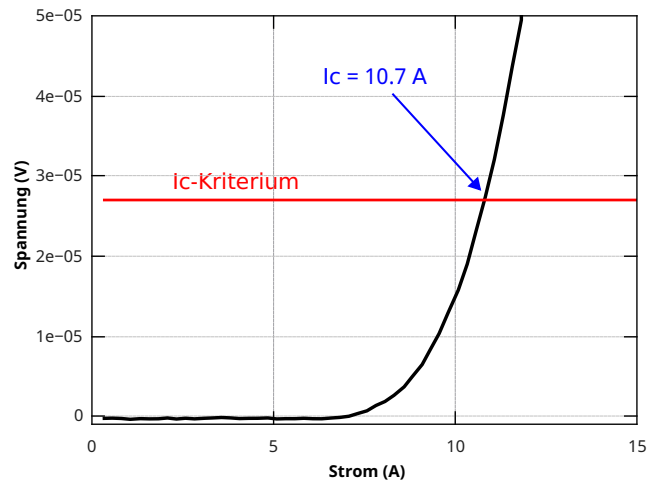
In Abbildung 7 ist die V-I-Kennlinien des Bandes B\_01 zu sehen. Die Spannung steigt nach der Gleichung 3 an und bleibt vernachlässigbar bis die Nähe des kritischen Stromwerts. Soweit der Strom die Nähe des kritischen Stromwerts erreicht, steigt die Spannung deutlich an.



**Abbildung 7.** V-I-Kennlinien zur Bestimmung des kritischen Stromes. Band B\_01.

Der kritische Stromwert kann durch die Kreuzung mit dem  $I_c$ -Kriterium bestimmt werden. Wie in Abbildung 7 gezeigt, der gemessene  $I_c$  Wert für das Band B\_01 beträgt 260 A.

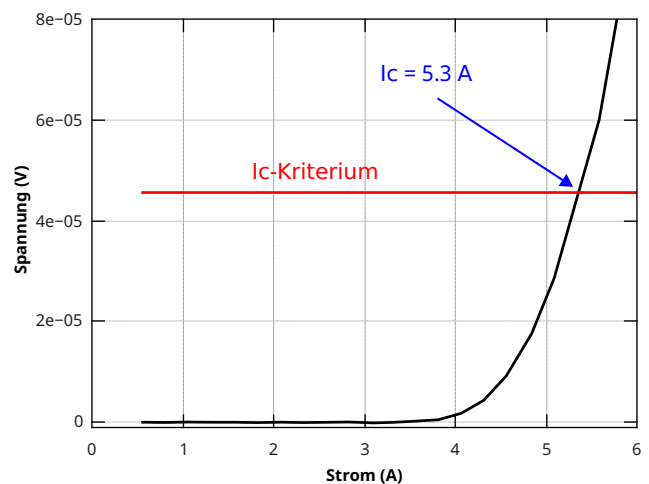
Nach Gleichung 1, der erwartete  $I_c$ -Wert für das Band



**Abbildung 8.** V-I-Kennlinien zur Bestimmung des kritischen Stromes. Band B\_02.

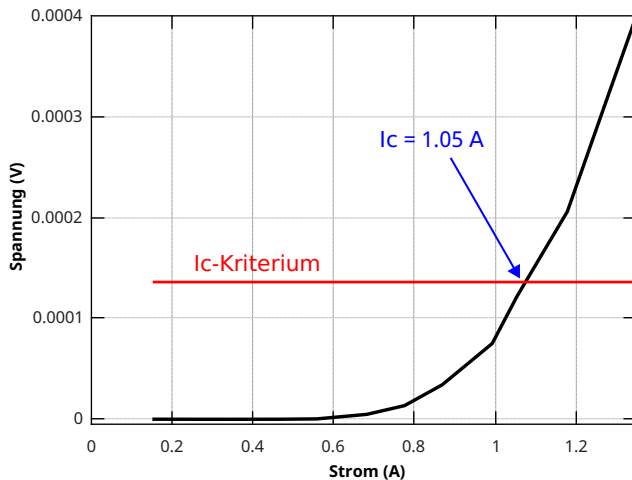
B\_02 sollte etwa 48,6 A sein. Der gefundene Wert beträgt jedoch 10,7 A (Abbildung 8). Diese höhere Senkung des  $I_c$ -Werts kann durch die Bandleiterbeschädigungen und die Bandleiterinhomogenität erklärt werden. Die Inhomogenität eines Bandleiters beschreibt Schwankungen des kritischen Stromes entlang des Bandleiters, d.h., man kann verschiedene  $I_c$ -Werte entlang des Bandleiters treffen. Die Homogenität des kritischen Stromes entlang eines Bandleiters besitzt eine besondere Bedeutung für die Verwendung von Bandleitern in resistiven Strombegrenzern.

Beim Schneiden des Bandleiters, kann die Inhomogenität verschärft werden. Da man die Bandleiterinhomogenität in die Gleichung 1 nicht betrachtet, kann der gemessene  $I_c$ -Wert vom berechneten Wert unterscheiden. Die Betrachtung der Bandleiterinhomogenität in die Gleichung 1 ist nicht leicht. Dafür muss man eine statistische Auswertung der Inhomogenität entlang des Bandes ausführen [19, 20].



**Abbildung 9.** V-I-Kennlinien zur Bestimmung des kritischen Stromes. Band B\_03.





**Abbildung 10.** V-I-Kennlinien zur Bestimmung des kritischen Stromes. Band B\_04.

Abbildungen 9 und 10 zeigen beziehungsweise die gemessene  $I_c$ -Werte für Bänder B\_03 und B\_04. Erneut ist es Möglich die höhere Senkung des kritischen Stromwerts im Vergleich zu dem berechneten Wert (29 A und 10 A) zu beachten.

Anderer Grund für die unerwartete Senkung des kritischen Stromwerts ist die Beschädigung des Bandes, da diese die Eigenschaften des supraleitenden Werkstoffs beeinflussen kann.

## 6. Fazit

Die Skalierung der supraleitenden Bänder durch den Laserschnitt kann noch verbessert werden. Die Gründe für die unerwartete und höhere Senkung des kritischen Stromwerts sind nicht völlig klar. Es ist bekannt, dass die Bandleiterinhomogenität eine Rolle in die Senkungen des  $I_c$ -Werts spielt. Der Laserschnitt kann jedoch die Beschädigung der Eigenschaften des supraleitenden Werkstoffs schädigen.

Andere Möglichkeit, um die Skalierung des Strombegrenzers durchzuführen, geschieht man beim Anlegen eines magnetischen Feldes auf die supraleitende Bänder.

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. -Ing. Mathias Noe für diese Zusammenarbeit zu ermöglichen.

Mein Kollege Herr Dustin Kottonau, danke ich für die Unterstützung und die fachlichen Diskussionen.

Das International Scholars & Welcome Office (IScO) des KIT, danke ich für die gewährte finanzielle Unterstützung dieses Forschungsprojekts.

## Literatur

- [1] Mathias Noe and Michael Steurer. High-Temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status. *Supercond. Sci. Technol.*, 20(3):15–29, January 2007.
- [2] Joachim Bock, Frank Breuer, Heribert Walter, Steffen Elschner, Martin Kleimaier, Ronald Kreutz, and Mathias Noe. CURL10 - Development and Field-Test of a 10 kV-10 MVA Resistive Current Limiter Based on Bulk BSCCO 2212. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 15(2):1955–1960, June 2005.
- [3] S. Elschner, A. Kudymow, J. Brand, S. Fink, W. Goldacker, F. Grilli, M. Noe, M. Vojenciak, A. Hobl, M. Bludau, C. Jänke, S. Krämer, and J. Bock. ENSYSTROB - Design, Manufacturing and Test of a 3-Phase Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application. *Phys. C Supercond.*, 1:1–7, May 2012.
- [4] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz. Fault Current Limiter Based on High Temperature Superconductors - Different Concepts, Test Results, Simulations, Applications. *Phys. C Supercond.*, 354(14):27–33, May 2001.
- [5] Slawomir Kozak, Tadeusz Janowski, Grzegorz Wojtasiewicz, Janusz Kozak, Beata Kondratowicz-Kucewicz, and Michal Majka. The 15 kV Class Inductive SFCL. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 20(3):1203–1206, June 2010.
- [6] Mark Stemmler. *Supraleitende Strombegrenzer in Hochspannungsnetzen*. PhD thesis, Universität Hannover, July 2009.
- [7] Heinrich J. Boenig, Charles H. Mielke, Burt L. Burley, Hong Chen, Joseph A. Waynert, and Jeffrey O. Willis. The Bridge-Type Fault Current Controller - a New FACTS Controller. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, volume 1, pages 455–460, July 2002.
- [8] H. J. Boenig and D. A. Paice. Fault Current Limiter Using a Superconducting Coil. *IEEE Trans. Magn.*, 19(3):1051–1053, May 1983.
- [9] V. Rozenshtein, A. Friedman, Y. Wolfus, F. Kopansky, E. Perel, Y. Yeshurun, Z. Bar-Haim, Z. Ron, E. Harel, and N. Pundak. Saturated Cores FCL - A New Approach. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17(2):1756–1759, June 2007.
- [10] Joachim Bock, Steffen Elschner, and Peter F. Herrmann. Melt Cast processed MCP-BSCCO 2212 Tubes for Power Applications up to 10 kA. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 5(2):1409–1412, June 1995.
- [11] Steffen Elschner, Mark Stemmler, Frank Breuer, Heribert Walter, Christian Frohne, Mathias Noe, and Joachim Bock. Coil in coil - Components for the high voltage superconducting resistive current limiter CULT 110. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 97(1):012309, January 2008.

- [12] Steffen Elschner, Andrej Kudymow, Stefan Fink, Wilfried Goldacker, Francesco Grilli, Christian Schacherer, Achim Hobl, Joachim Bock, and Mathias Noe. ENSYSTROB - Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21(3):1209–1212, June 2011.
- [13] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, C. F. T. Matt, and R. de Andrade Jr. Recovery of Superconducting State in an R-SCFCL MCP-BSCCO-2212 Assembly. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23(1):5601407, February 2013.
- [14] W. T. B. de Sousa, F. N. F. Dicler, and F. G. R. Martins. Simulations of the Recovery Process of an Air-Coil SFCL. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, to be published, 2016.
- [15] Christian Schacherer. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung supraleitender resistiver Strombegrenzer*. PhD thesis, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, July 2009.
- [16] J. Duron, B. Dutoit, F. Grilli, M. Decroux, L. Antognazza, and O. Fischer. Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature Dependent Parameters. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17(2):1839–1842, June 2007.
- [17] T. Rettelbach and G. J. Schmitz. 3D Simulation of Temperature, Electric Field and Current Density Evolution in Superconducting Components. *Supercond. Sci. Technol.*, 16(5):645–653, May 2003.
- [18] Donglu Shi. *High-Temperature Superconducting Materials Science and Engineering: New Concepts and Technology*. Pergamon, 1, March 1995.
- [19] W. T. B. de Sousa and Mathias Noe. The ADI Method for Simulations of SFCL. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25(2):5600309, April 2015.
- [20] Wesley Tiago Batista de Sousa. *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*. PhD thesis, COPPE/UFRJ, March 2015.