

Untersuchungen zu Lötkontakten an *REBCO*-Bandleitern und RACC

Masterarbeit von

Alan Preuß

an der Fakultät für Maschinenbau
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)

Erstgutachter: Prof. Dr. Robert Stieglitz
Zweitgutachter: Dr. Klaus-Peter Weiss
Betreuender Mitarbeiter: Dipl.-Phy. Christoph Bayer

01. Oktober 2014 – 24. Februar 2015

Karlsruher Institut für Technologie
Fakultät für Maschinenbau
Kaiserstr. 12
76128 Karlsruhe

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Arbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Änderungen entnommen wurde.

Karlsruhe, 24.02.2015

.....

(Alan Preuß)

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
2. Einführung in die Hochtemperatursupraleitung	3
2.1. Supraleitung	3
2.2. REBCO	5
2.3. REBCO-Bänder	6
2.4. Roebel Assembled Coated Conductor (RACC)	8
3. Niederohmige Lötkontakte für REBCO-Bänder	13
3.1. Löten	14
3.2. Definition des Übergangswiderstandes	15
3.3. Einflussfaktoren auf Übergangswiderstände	15
3.3.1. Kontaktfläche	16
3.3.2. Kontaktanordnung	18
3.3.3. Fertigungsverfahren	20
3.3.4. Stabilisator	21
3.3.5. Lote	23
3.3.6. Weitere Einflussfaktoren	24
3.4. Diskussion	25
3.5. Definition der Versuchsparameter	26
4. Versuche mit REBCO-Bänder	29
4.1. Versuchsmaterialien und Laborausrüstung	29
4.2. Probenvorbereitung und Verzinnen	30
4.3. Lötverfahren und -aufbau	32
4.4. Widerstands- und Kontaktflächenmessung	35
4.5. Versuchsauswertung und Fehlerabschätzung	36
4.6. Ergebnisse und Diskussion	43
4.6.1. Ergebnisse unterschiedlicher Lote	43

4.6.2. Vergleich unterschiedlicher Produktionschargen	46
5. Stromeinkopplung in RACC	49
5.1. Kabelherstellung	49
5.2. Lötverfahren und Widerstandsmessung	50
5.3. Versuchsauswertung und Fehlerabschätzung	51
5.4. Ergebnisse und Diskussion	52
6. Zusammenfassung	55
Literatur	57
A. Anhang	63
A.1. Vergleich der gewichteten und ungewichteten statistischen Auswertung der REBCO-Bandversuche	63
A.2. Frästeilskizzen	63
A.3. Verbesserungsvorschläge zum Versuchsaufbau	66
A.4. Datenbank	69

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Abhängigkeiten der kritischen Größen	4
2.2.	YBCO-Gitterstruktur	5
2.3.	Schematischer Aufbau eines REBCO-Bandes	7
2.4.	Querschnitt durch REBCO-Bänder von AMSC und SPI	8
2.5.	Schematische Abbildung eines Roebelkabels	9
2.6.	Terminals für die Stromeinkopplung in RACC	10
2.7.	Spannungskurven unterschiedlicher Bänder in einem Roebelkabel [4, S. 106]	11
3.1.	Übergangswiderstände nach Jahren [22–41]	14
3.2.	Darstellung von Übergangswiderständen bei unterschiedlichen Kontakt- längen 4 mm breiter REBCO-Bänder	16
3.3.	Darstellung spezifischer Übergangswiderstände bei unterschiedlichen Kon- taktlängen	17
3.4.	Schematische Darstellung verschiedener SPI REBCO-Band Ausrichtungen im Querschnitt	18
3.5.	Schematische Darstellung einer Überlapp- und einer Brückenkonfiguration in HTS-HTS Anordnung im Längsschnitt	19
3.6.	Übergangswiderstände unterschiedlicher Produktionschargen	21
3.7.	Ergebnisse zweier Studien zu Übergangswiderständen unterschiedlicher Stabilisatormaterialien	22
3.8.	Verzinnte Proben im Vergleich zu nicht Verzinnten Proben	25
4.1.	Supraleiter nach Reinigung und Zuschnitt	30
4.2.	Verzinnte Proben	32
4.3.	Vorbereiteter Supraleiter in Überlapp HTS-HTS Anordnung	32
4.4.	Die für die Komprimierung verwendete Zug-Druck-Maschine im CryoMak Labor	33
4.5.	Versuchsaufbau für das Löten unter Druck	33
4.6.	Verlötete Supraleiterpaare unterschiedlicher Lote	34

4.7.	Vorrichtung zur Spannungsmessung	36
4.8.	Ausrichtungsversatz in Überlappanordnung	36
4.9.	Messdaten mit Fitfunktion bei 77 K	37
4.10.	Messergebnisse der REBCO-Bänder	44
4.11.	Vergleich spez. Übergangswiderstände unterschiedlicher Lote	45
4.12.	Vergleich der spez. Übergangswiderstände zweier unterschiedlicher Produktionschargen von SPI REBCO-Bändern mit InSn Kontakten	47
5.1.	Pneumatische Stanze zur Herstellung von RACC	49
5.2.	Spannungsverläufe von InSn gelöteten Roebelkabel	53
A.1.	Skizze des verwendeten Heizblockes	64
A.2.	Skizze des verwendeten T-Stücks	65
A.3.	Vorschlag zur Optimierung des Versuchsaufbaus	66
A.4.	Vorschlag für optimierten Heizblock	67
A.5.	Vorschlag für optimiertes T-Stück	68

Tabellenverzeichnis

3.1.	Spezifische elektrischer Widerstände von Schichtmaterialien bei 77 K [22, 45–47]	18
3.2.	Ergebnisse zu Untersuchungen zum Einfluss der Kontaktanordnung auf den Übergangswiderstand	20
3.3.	Spezifische Widerstände unterschiedlicher Stabilisatormaterialien bei verschiedenen Dicken	22
3.4.	Intrinsische elektrische Widerstände verschiedener Lote bei unterschiedlichen Lotschichtdicken und 77 K	23
3.5.	Physikalische Eigenschaften verschiedener Lote	24
4.1.	Kennwerte der verwendeten Supraleiter	29
4.2.	Übersicht der eingesetzten Loten	30
4.3.	Temperaturen für Heizplatte und LötKolben beim Vorverzinnen	31
4.4.	Typische Versuchsparameter beim Löten unter Druck	35
4.5.	Typische Parametergrößen bei Auswertung mittels eines nicht linearen Modells	38
4.6.	Statistische Auswertung der REBCO-Bänder Versuche	45
4.7.	Vergleich der statistischen Kenngrößen beider Produktionschargen	46
5.1.	Ergebnisse der RACC Spannungsmessung	52

1. Einführung

Heike Kamerlingh Onnes machte im Jahre 1911 eine bemerkenswerte Beobachtung: Der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwand sprunghaft bei einer Temperatur von 4,2 Kelvin. Er taufte dieses Phänomen Supraleitung. In den darauf folgenden sechs Dekaden wurde Supraleitung bei vielen weiteren Materialien nachgewiesen. Zum Ende der 70er Jahre schien es so zu sein, dass Supraleitung auf Temperaturen unterhalb von 30 Kelvin beschränkt sein sollte. Da das Bereitstellen derart tiefer Temperaturen äußerst aufwendig und kostspielig ist, waren die Einsatzgebiete von supraleitenden Materialien begrenzt.

Dies änderte sich als Bednorz und Müller 1986 Supraleitung in einem Lanthan-Barium-Kupfer-Oxid-Gefüge bei einer Temperatur von 30 K nachwiesen [1]. Ein Jahr später folgte die Entdeckung eines Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid (YBCO) Gefüge welches bereits bei 93 K in den supraleitenden Zustand überging [2]. Die Entdeckung erlaubte erstmals den Einsatz von günstigem flüssigem Stickstoff als Kühlmittel und eröffnete so völlige neue Einsatzmöglichkeiten von Supraleitern.

Bevor jedoch Anwendungen mit diesen neuartigen Hochtemperatursupraleitern (HTSL) entwickelt werden konnten, mussten aus den mannigfaltigen Materialien jene identifiziert werden, die den technischen Anforderungen genügten und gleichzeitig industriell herstellbar waren. Es dauerte bis zum Ende der 1990er Jahre bis die erste Generation von HTSL kommerziell verfügbar waren.

Da die Herstellung von HTSL dieser Generation einen großen Anteil von Silber benötigte, waren die Preise rohstoffbedingt entsprechend hoch. Während die ersten Kabel, Strombegrenzer und Stromzuführungen mit HTSL der ersten Generation entwickelt wurden, bemühten sich die Hersteller bereits die zweite Generation von HTSL marktreif zu machen.

Die zweite Generation sollte dabei günstiger zu produzieren sein sowie bessere elektrische und mechanischen Eigenschaften aufweisen. Zur Mitte der ersten Dekade des neuen Jahrtausend waren die HTSL der zweiten Generation in Form von flachen Bändern kommerziell verfügbar. Während anfangs die verfügbare Länge nur einige Meter betrug sind heutzutage bis zu einem Kilometer lange Bänder verfügbar. Seitdem beschäftigen sich

Wissenschaftler rund um den Globus damit aus den kommerziell verfügbaren HTSL der zweiten Generation Anwendungen zu entwickeln.

In diesem Kontext liefert diese Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung von Kabeln aus HTSL der zweiten Generation. Konkret soll die Stromeinkopplung in *Roebel Assembled Coated Conductor* (RACC) untersucht werden um eine homogene Stromverteilung im RACC zu erreichen. Eine solche Stromverteilung ist notwendig, da der Verlust der Supraleitung in einem Band auf Grund zu hohen Stromes zu Wärmeentwicklung im Kabel führt. Diese Erwärmung führt konsequent zu einem Versagen des gesamten Kabels bevor es seine maximale Stromtragkapazität erreicht hat.

Bei der Stromeinkopplung in RACC hat es sich bewährt, das Kabel in Kupferterminals zu löten und so eine Verbindung zur Stromquelle herzustellen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll darauf liegen diesen Lötprozess zu untersuchen. Nach einer Einführung in die Hochtemperatursupraleitung (Kapitel 2) wird eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt mit dem Ziel die entscheidenden Parameter für die Qualität eines Lötkontaktes zwischen HTSL zu identifizieren (Kapitel 3). Um die Ergebnisse der Literaturrecherche zu überprüfen, werden Lötkontakte zwischen HTSL produziert und ihre elektrischen Eigenschaften bestimmt (Kapitel 4). Die Eignung der besten Methoden soll dann bei der Stromeinkopplung von RACC überprüft werden (Kapitel 5).

2. Einführung in die Hochtemperatursupraleitung

In diesem Kapitel sollen zunächst die Grundlagen der Supraleitung skizziert werden und darauf aufbauend, die für diese Arbeit relevante Untergruppe der Hochtemperatursupraleiter genauer beleuchtet werden. Mit dem Wissen um die Stärken und Schwächen der supraleitenden Materialien soll erklärt werden wie es gelingt, sie für technische Anwendungen nutzbar zu machen. Abschließen soll das Kapitel mit Erläuterungen zum RACC.

2.1. Supraleitung

Im supraleitenden Zustand weist ein elektrischer Leiter keinen elektrischen Widerstand auf. Der Übergang von normalleitend – sprich widerstandsbehaftet – zu supraleitend tritt dabei sprunghaft bei einer definierten Temperatur in Erscheinung. Diese Temperatur wird daher als Sprungtemperatur T_c bezeichnet [3, S. 11-22].

Neben dem Verlust des elektrischen Widerstandes weisen Supraleiter eine weitere interessante Eigenschaft auf. Sie verdrängen schwache Magnetfelder aus ihrem Inneren an den Rand. Dieses Phänomen spiegelt einen perfekten Diamagnetismus wieder und wird als Meißner-Ochsenfeld-Effekt bezeichnet [3, S. 23-30].

Steigt das Magnetfeld an können bei einem kritischen Magnetfeld B_{c1} zwei Dinge passieren [3, S. 23-30]

- der supraleitende Zustand bricht zusammen (Typ I)
- das Magnetfeld wird im Inneren des Supraleiters in Flussschläuchen gebündelt und die Supraleitung bleibt makroskopisch erhalten (Typ II)

Steigt das Magnetfeld nun weiter an gehen auch Typ II Supraleiter ab einem gewissen Punkt B_{c2} in den normalleitenden Zustand über. Wie auch die Sprungtemperatur ist das Verhalten eines Supraleiters im Magnetfeld materialspezifisch [3, S. 23-30].

2. Einführung in die Hochtemperatursupraleitung

Relevanz für energietechnische Applikationen besitzen dabei nur Typ II Supraleiter, da bei Typ I Supraleitern schon das Eigenfeld vergleichsweise kleiner Ströme ausreicht um die Supraleitung zusammen brechen zu lassen. Die Stromdichte kann daher neben der Sprungtemperatur und dem kritischen Magnetfeld ebenfalls als kritische Größe betrachtet werden [4, S. 5]. Die Abhängigkeiten der kritischen Größen voneinander sind in Abb. 2.1 veranschaulicht. Um einen stabilen Betrieb im supraleitenden Zustand zu gewährleisten ist also ein Wissen um alle drei kritischen Größen T_c , j_c und B_{c2} im Betriebspunkt nötig.

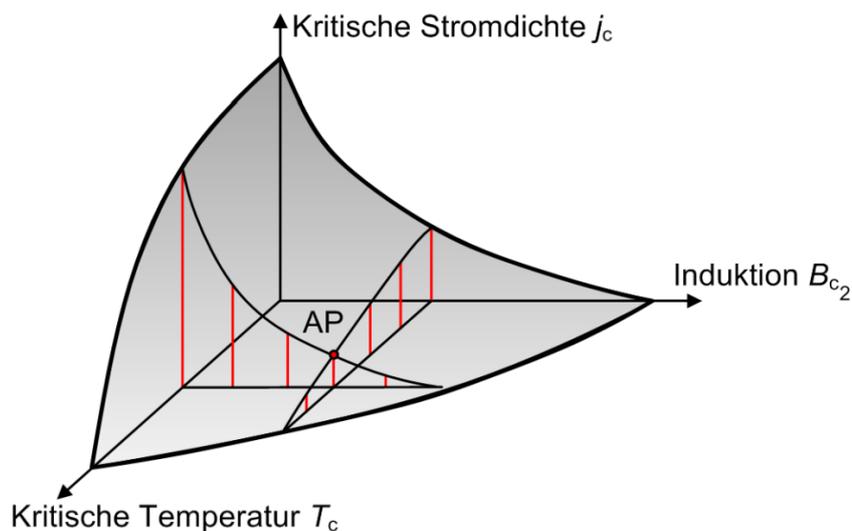


Abbildung 2.1.: Abhängigkeiten der kritischen Größen [5, S. 11]

Vor der Entdeckung der Supraleitung in Kupferoxid-Schichten durch Bednorz & Müller 1986 [1] wurde allgemein angenommen, dass sich Supraleitung auf Temperaturen unterhalb von 30 Kelvin beschränkt. Diese Grenze leitete sich aus den Modellen ab, die die Mechanismen der Supraleitung beschrieben. [6, S. 3]

Mit ihrer Entdeckung teilten Bednorz & Müller das Feld der Supraleitung in zwei Bereiche auf. Supraleiter mit Sprungtemperaturen unterhalb von 30 K werden nun üblicherweise als Tieftemperatursupraleiter bezeichnet (engl. *low temperature superconductor*, LTS) und die Leiter mit Sprungtemperaturen über 30 K als Hochtemperatursupraleiter (engl. *high temperature superconductor*, HTS) bezeichnet. [6, S. 3]

Für technische Applikationen sind zur Zeit drei Gruppen von HTS relevant: Die Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide (BSCCO), die Rare Earth Barium Copper Oxide (REBCO) und die Magnesiumdiboride [4, S. 16]. Häufig werden BSCCO HTSL auch als HTSL der ersten Generation bezeichnet. Diese Arbeit setzt sich mit der zweiten Generation der HTSL auseinander, dem REBCO.

2.2. REBCO

REBCO ist ein Sammelbegriff für eine Gruppe von Hochtemperatursupraleitern die alle der chemischen Summenformel $RE_1Ba_2Cu_3O_\delta$ folgen. Dabei können unterschiedliche Seltene Erden (engl. *Rare Earths*, *RE*) verwendet werden. Der bekannteste Vertreter dieser Gruppe (YBCO) verwendet Yttrium als Seltene Erde und weist eine Sprungtemperatur von 93 K auf [2].

In der perowskitartigen Gitterstruktur von REBCO (s. Abb. 2.2) findet die Supraleitung hauptsächlich in den CuO_2 -Schichten statt, welche in der a-b-Ebene liegen [3, S. 100-104]. Daraus ergeben sich anisotrope supraleitende Eigenschaften für REBCO, da supraleitender Stromtransport nur eingeschränkt senkrecht zur a-b-Ebene möglich ist.

Für die Herstellung technischer Supraleiter ist es also notwendig das Gitterwachstum so zu steuern, dass die CuO_2 -Schichten zueinander ausgerichtet sind. Im Falle polykristalliner Gitter kann ein zu großer Winkelversatz zwischen einzelnen Körnern die Stromdichte um bis zu zwei Größenordnungen reduzieren [7].

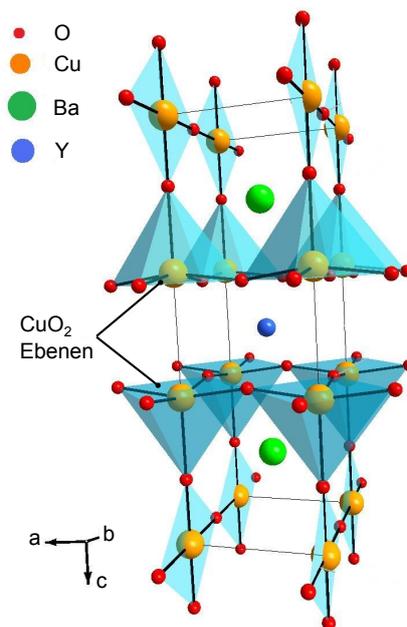


Abbildung 2.2.: YBCO-Gitterstruktur¹

Die Sprungtemperatur von REBCO Supraleiter ist sehr stark vom Sauerstoffgehalt des REBCO Gefüges abhängig. Während bei einem Sauerstoffgehalt von $6.8 < \delta < 7$ die Sprungtemperatur sich relativ konstant verhält, bricht sie für $\delta < 6.8$ rapide ein [8, 9]. Das

¹<https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AYbco.jpg>

Ausbreitungsverhalten von Sauerstoff ist dabei diffusionsgesteuert. Signifikante Diffusion kann bei Temperaturem ab 600 Kelvin erwartet werden [10].

REBCO zeichnet sich dadurch aus, dass es bei höheren Magnetfeldern eine deutlich höhere Stromdichte als HTSL der 1. Generation aufweist. Zudem benötigt die Herstellung von REBCO-Bändern deutlich weniger Silber als HTSL der 1. Generation, wodurch man sich langfristig niedrigere Preise für REBCO verspricht [4, S. 14].

2.3. REBCO-Bänder

Um REBCO als elektrischen Leiter einzusetzen wird es in einer dünnen Schicht auf ein metallisches Substrat aufgebracht. Diese Anordnung wird im englischen als *Coated Conductor* (CC) bezeichnet.

Der Aufbau eines REBCO-Bandes ist in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt. Als Basis für das REBCO dient ein 50 bis 100 μm dickes Substrat welches typischerweise aus einer Nickellegierung besteht. Das Substrat bestimmt dabei maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Bandes. Die elektrischen Eigenschaften hingegen werden von der bis zu 3 μm dicken REBCO-Schicht definiert. Die sich zwischen REBCO und Substrat befindlichen Metalloxidschichten dienen als Diffusionsbarrieren um eine chemische Reaktion zwischen Substrat und REBCO zu verhindern [11]. Die an das REBCO anschließende Silberschicht dient als elektrische Stabilisierung und ermöglicht die Einstellung der gewünschten Sauerstoffkonzentration im REBCO-Gefüge (vgl. Abschnitt 2.2). Umgeben wird der gesamte Komplex mit einem weiteren Stabilisator z.B. aus Kupfer oder Messing.

Die flache Geometrie des Bandes ergibt sich aus der Notwendigkeit die Wachstumsrichtung der REBCO Körner in c-Richtung zu kontrollieren (vgl. Abschnitt 2.2). Dies wird erreicht, indem in die dem REBCO vorhergehenden Schichten eine Textur eingebracht wird. Dadurch kann REBCO epitaxial aufwachsen. Es kommt jedoch beim Kornwachstum zu Gitterbaufehlern wodurch sich die Textur und damit die Kontrolle über die Wachstumsrichtung nach einigen Mikrometern verliert.

Eine Literaturrecherche zeigte, dass in den vergangenen Jahren hauptsächlich Supraleiter der Firmen SuperPower Inc. (SPI) und American Superconductor (AMSC) für Untersuchungen von Lötkontakten verwendet wurden. Daher werden an dieser Stelle nur die Herstellungsverfahren der genannten Firmen beschrieben. Eine umfassendere Übersicht der Herstellungsverfahren REBCO-Bänder produzierenden Unternehmen ist auf [4, S. 22] zu finden.

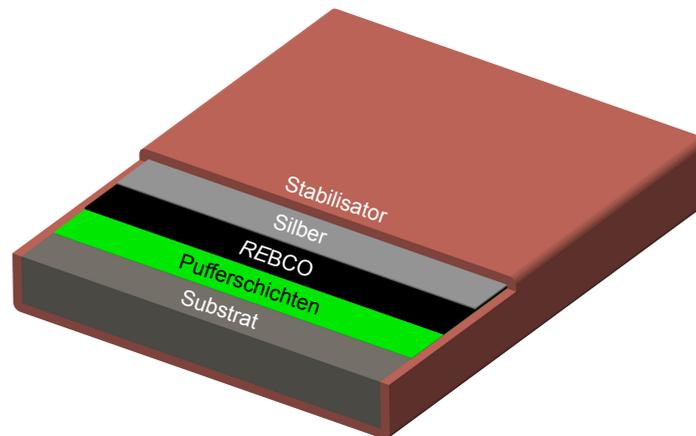


Abbildung 2.3.: Schematischer Aufbau eines REBCO-Bandes

American Superconductor

AMSC verwendet ein Nickel-Wolfram-Substrat in das die benötigte Textur in mittels Walz- und Rekristallisationsglühprozessen direkt eingebracht wird. Dieser Prozess wird auch als *Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate* (RABiTS) bezeichnet [12]. Auf das texturierte Substrat werden durch Kathodenerstäubung (Sputtern) drei etwa 75 nm dicke Pufferschichten aufgebracht. Der REBCO-Film folgt den Pufferschichten und wird mittels chemischer Beschichtungsverfahren (engl. *Metal-Organic Deposition*, MOD) aufgebracht. Der Prozess ist in [13, 14] genauer beschrieben. Typische REBCO-Schichtdicken sind $0,8\ \mu\text{m}$. Als nächstes folgt eine Silberschicht und die Einstellung des optimalen Sauerstoffgehalts. Vor dem Aufbringen der Stabilisatoren wird das Paket auf die gewünschte Breite zugeschnitten. Der Stabilisator aus Kupfer, Messing oder rostfreiem Stahl wird über Wellenlötungen mit dem Rest des Pakets verbunden. [15]

SuperPower Inc.

Ausgangspunkt für REBCO-Bänder von SPI ist ein Hastelloy C276 Substrat. Dieses wird in einem ersten Schritt elektrochemisch auf eine Oberflächenrauheit von etwa 2 nm poliert. Anschließend wird über ionenstrahlgestützte Beschichtung (*Ion Beam Assisted Deposition*, IBAD) eine texturierte MgO Schicht aufgebracht [16]. Es folgen vier epitaxiale Pufferschichten mit Dicken von ungefähr 30 nm. Als Beschichtungsverfahren für das REBCO verwendet SPI die metallorganische chemische Gasphasenabscheidung (engl.

Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD). Der Prozess ist genauer in [17] beschrieben. Gedeckelt wird der REBCO-Film mit einer Silberschicht. Als Stabilisator wird Kupfer gleichmäßig um den gesamten Stapel elektroplattiert. [18]

Als Resultat der unterschiedlichen Herstellungsverfahren weisen die Bänder der beiden Hersteller einen anderen Schichtaufbau auf (s. Abb. 2.4). Während bei SuperPower die Silberschicht direkt im Kontakt mit dem Stabilisator steht, so liegt bei AMSC noch eine Schicht Lot dazwischen. Ebenfalls ist zu erkennen wie bei SPI der Stabilisator das gesamte Band umgibt wohingegen bei AMSC eine Sandwich-Struktur vorliegt welche seitlich mit Lot gefüllt wird.

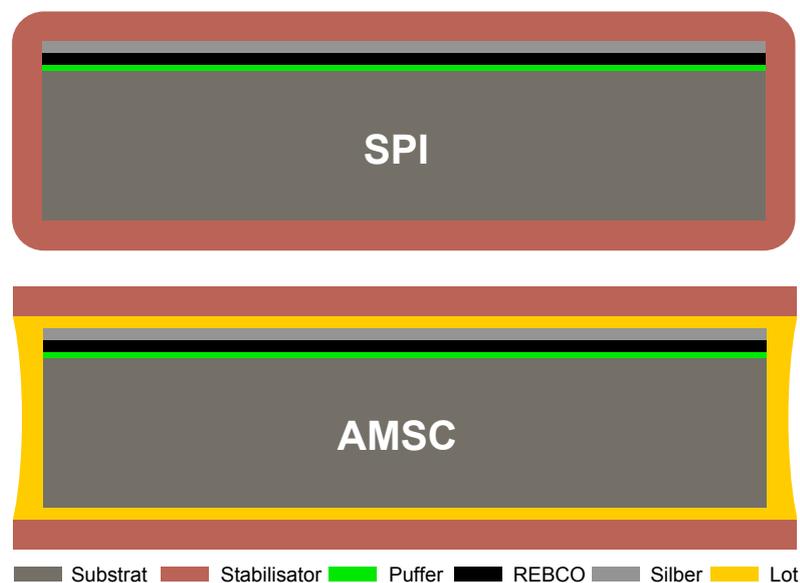


Abbildung 2.4.: Querschnitt durch REBCO-Bänder von SPI und AMSC, nach [15, 18]

Beide Hersteller bieten für ihre etwa 4 mm breiten Bänder kritische Ströme im Bereich von 80 – 140 A an bei 77 K und Eigenfeld.²³

2.4. Roebel Assembled Coated Conductor (RACC)

Auch wenn 140 A bei 77 K und Eigenfeld bereits sehr beachtlich für einen so schmalen Leiter ist, so benötigten beispielsweise Magnete in der Regel deutlich höhere Ströme. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit Kabel zu entwickeln, die einzelne REBCO-Bändern kombinieren. Das *Roebel Assembled Coated Conductor* ist ein solches Kabelkonzept.

²www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html,

³www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire

Das Konzept geht auf Ludwig Roebel zurück, der nach Möglichkeiten suchte Wechselstromverluste in elektrischen Leitern auf Grund von induzierten Wirbelströmen zu reduzieren. Konkret ging es dabei um flache, massive Leiter, wie sie damals in Generatoren eingesetzt wurden. Erfolg hatte er, in dem er die massiven Leiter in kleinere, von einander isolierte Stränge aufspaltete und diese miteinander verwob. Dieses Prinzip wurde 1912 umgesetzt und patentiert.⁴

In Anlehnung an Roebels Idee werden REBCO-Bändern in periodische, meanderförmige Strukturen gestanzt und anschließend miteinander verwoben. Dies ist in Abbildung 2.5 schematisch für fünf Bänder gezeigt. Es ist erkennbar, wie die einzelnen Bänder entlang der Kabelachse ständige ihre Position verändern und dennoch ein makroskopisch gerades Kabel bilden. Bisher realisierte Roebel-Kabel beinhalten zwischen 9 und 45 Bänder [19].

Ähnlich wie bei Roebels ursprünglichen Ansatz können durch die Transposition der einzelnen Bänder die Wechselstromverluste durch das RACC-Konzept deutlich reduziert werden.

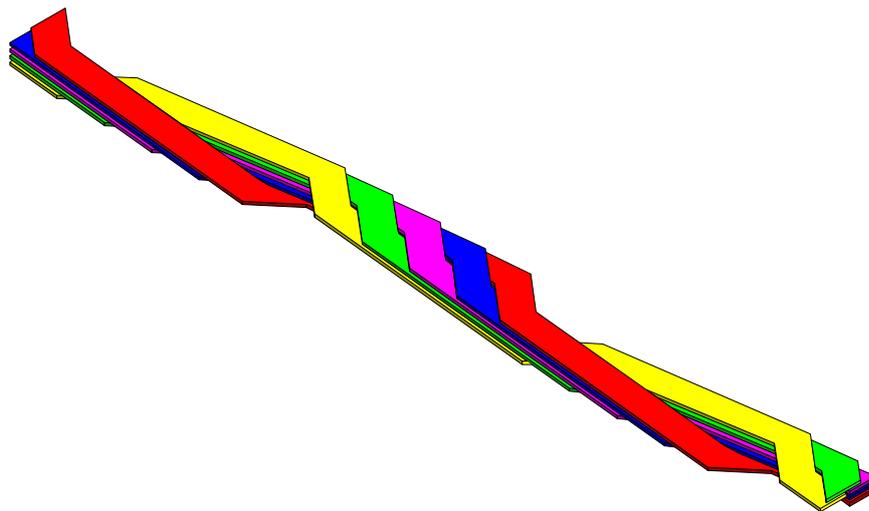


Abbildung 2.5.: Schematische Abbildung eines Roebelkabels mit fünf Bändern [4, S. 89]

Für die Zuführung von Strom in ein RACC wird dieses in der Regel in Kupferterminals, wie sie schematisch in Abbildung 2.6 gezeigt sind, eingelötet.

Das Lot hat die Funktion einen Kontakt zwischen der unebenen Oberfläche des RACC mit dem Terminal herzustellen. Um den Strom homogen über alle Bänder verteilen zu können, sind die Terminals in der Regel etwas länger als eine volle Periodenlänge. Damit ist gewährleistet, dass jedes Band für einen kurzen Abschnitt über das Lot direkt mit dem Terminal verbunden ist.

⁴<https://www.mannheim.de/wirtschaft-entwickeln/roebelstab-ludwig-roebel-1878-1934>

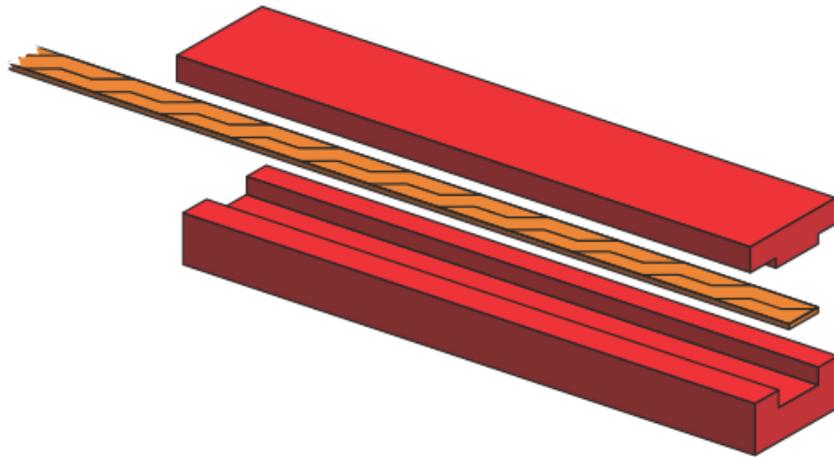


Abbildung 2.6.: Terminals für die Stromeinkopplung in RACC [4, S. 105]

In Abbildung 2.7 sind Spannungskurven unterschiedlicher Bändern in einem Roebelkabel exemplarisch abgebildet. Der plötzliche, nicht lineare Anstieg der Kurven, beschreibt den Übergang zum normalleitenden Zustand beim Erreichen des kritischen Stroms des Bandes. Es ist deutlich erkennbar, dass drei unterschiedliche Kurvenverläufe vorliegen. Dies bedeutet, dass keine homogene Stromverteilung vorliegt. Im Idealfall sollten alle drei Kurven übereinander liegen.

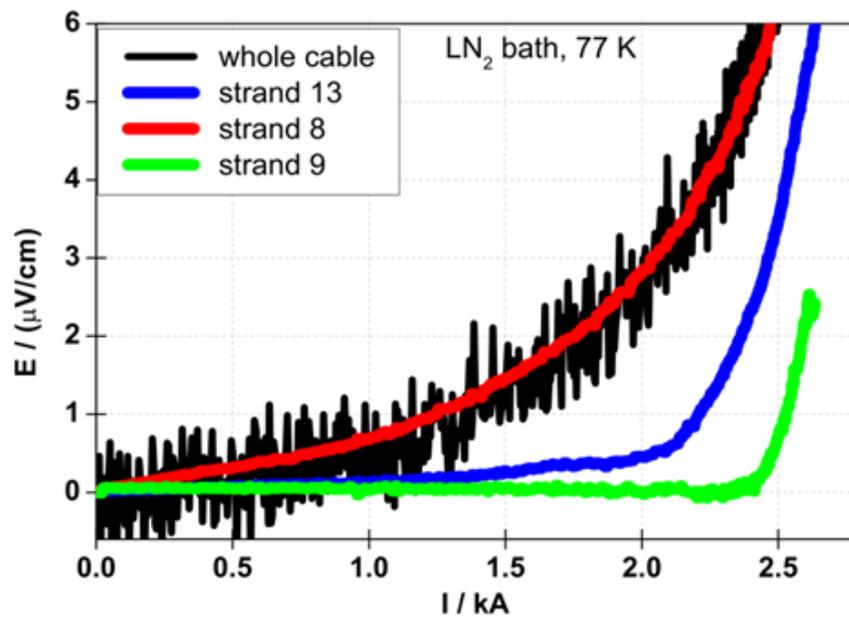


Abbildung 2.7.: Spannungskurven unterschiedlicher Bänder in einem Roebelkabel [4, S. 106]

3. Niederohmige Lötkontakte für REBCO-Bänder

Ziel dieser Arbeit ist es die Stromeinkopplung in RACC zu verbessern und so eine homogene Stromverteilung im Kabel zu gewährleisten. Es soll nach Möglichkeit in jedem Band des RACC derselbe Strom fließen. Dafür muss der elektrische Widerstand nach zwei Kriterien optimiert werden. Er muss klein sein, sowohl die Widerstände zwischen Bändern und Terminal als auch der Widerstand zwischen den einzelnen Bändern. Weiterhin sollten die einzelnen Widerstände zwischen den Bändern und dem Terminal möglichst identisch sein um zu gewährleisten, dass jedem Band dieselbe Menge an Strom zugeführt wird [19].

In der Vergangenheit wurden drei unterschiedliche Methoden zur Herstellung von Kontakten zwischen Supraleitern untersucht.

1. Mechanische Verbindungen [20]
2. Diffusionsglühen der Silberschichten der REBCO-Bänder [21]
3. Löten [22]

Mechanische Verbindungen bilden die einfachste Art einer elektrischen Verbindung, erzeugen jedoch die höchsten elektrischen Widerstände. Diffusionsglühen hat das Potential die geringsten Widerstände zu erreichen erfordert jedoch einen aufwendigeren Prozess. Wie bereits in Abschnitt 2.2 erläutert sind die elektrischen Eigenschaften von REBCO maßgeblich vom Sauerstoffgehalt des Gitters abhängig. Um diese Eigenschaften zu erhalten, muss der Sauerstoffdiffusion beim Diffusionsglühen vorgebeugt werden.

Das Löten bietet gute elektrische Kontakte und bei Auswahl der entsprechenden Parameter einen einfach durchzuführenden Prozess.

Abbildung 3.1 zeigt eine große Anzahl der bisher veröffentlichten Widerstände von Lötkontakten. Es lässt sich erkennen, dass die Ergebnisse einer sehr großen Streuung unterliegen. Daher soll im Folgenden untersucht werden welche Prozessparameter diese Streuung hervorrufen und wie ein Lötkontakt ausgelegt werden muss, um möglichst geringe und reproduzierbare Widerstände zu erzielen.

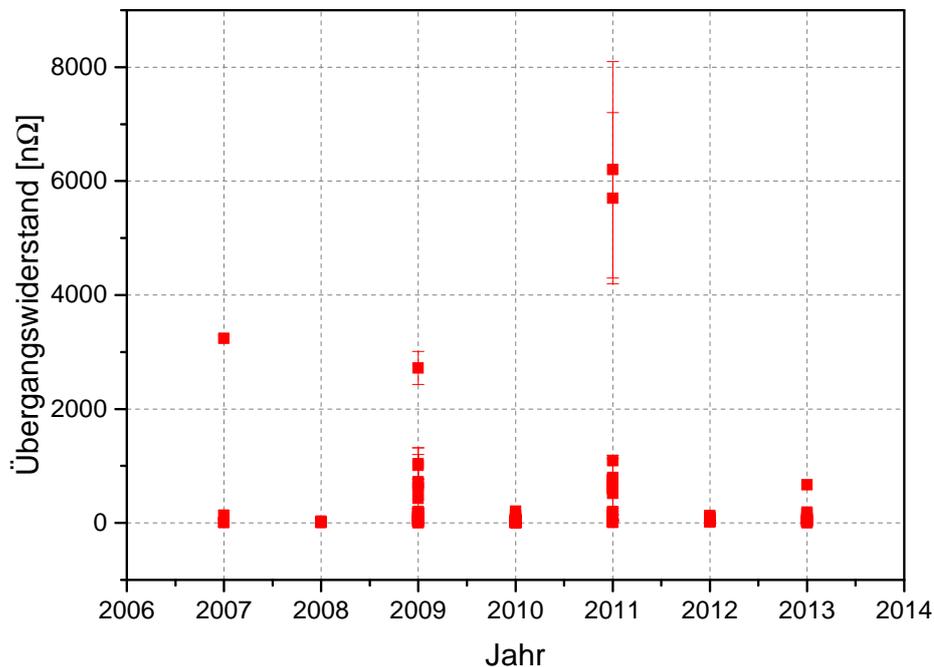


Abbildung 3.1.: Übergangswiderstände nach Jahren [22–41]

Bevor auf die einzelnen Prozessparameter eingegangen wird, soll zunächst der Begriff des Lötens und des Übergangswiderstandes eingeführt werden.

3.1. Löten

Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Verbinden und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen entsteht [42, S. 210].

Ob ein Werkstück lötlbar ist, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab (vgl. DIN 8514). Einer der Wichtigsten ist die Benetzbarkeit des Werkstoffes mit Lot. Sie beeinflusst dabei maßgeblich die Fähigkeit eines Lotes in den Spalt zwischen zwei Werkstücken zu fließen, wie er bspw. zwischen den Bändern eines RACC vorliegen (vgl. Abschnitt 2.4). Eine gute Benetzbarkeit liegt vor wenn der Benetzungswinkel möglichst klein ist. [42, S. 210]

Um eine gute Benetzung zu gewährleisten werden metallisch blanke Werkstückoberflächen benötigt. Daher müssen die Werkstoffoberflächen vor dem Löten von Oxiden und Fremdschichten wie bspw. Fetten befreit werden. Um Oxide zu entfernen, die sich während

des Lötens bilden, werden Flussmittel eingesetzt. Diese werden entweder unmittelbar vor dem Löten auf das Werkstück aufgetragen oder sind bereits dem Lot zugesetzt. Flussmittelrückstände sollten nach dem Löten vom Werkstück entfernt werden, da sie oft korrosiv wirken. Wichtig ist außerdem, dass Flussmittel und Lot aufeinander abgestimmt sind, da ein Flussmittel nur seine Funktion erfüllen kann wenn seine Schmelztemperatur unterhalb der des verwendeten Lotes liegt [42, S. 215-216].

Um die Degradation des Supraleiters durch bspw. Sauerstoffdiffusion (vgl. Abschnitt 2.2) zu vermeiden, ist der Einsatz vergleichsweise geringer Löttemperaturen erforderlich. Bei Löttemperaturen unterhalb von 450 °C wird von Weichlötungen gesprochen [42]. SPI und AMSC empfehlen Löttemperaturen von unterhalb 200 °C¹ bzw. 175 °C²

3.2. Definition des Übergangswiderstandes

In dieser Arbeit sei der Übergangswiderstand als der ohmsche Widerstand definiert, der zwischen zwei verlöteten supraleitenden REBCO-Bändern beim Anlegen eines Stroms auftritt.

Der so definierte Übergangswiderstand setzt sich nach [43, S. 1-17] aus zwei Komponenten zusammen. Einerseits den intrinsischen elektrischen Widerständen $R_{Material}$ der Schichtmaterialien zwischen den Supraleitern. Andererseits aus Kontaktwiderständen $R_{Kontakt}$, die an den Grenzflächen zwischen zwei Materialien entstehen können. Für einen beliebigen Übergangswiderstand R gilt dann

$$R = \sum R_{Material} + \sum R_{Kontakt} \quad (3.1)$$

Alle im Folgenden diskutierten Einflussfaktoren beschäftigen sich also damit, wie sie sich auf die beiden Anteile des Übergangswiderstandes auswirken.

3.3. Einflussfaktoren auf Übergangswiderstände

Für die im Folgenden durchgeführten Analysen wurden die Ergebnisse der Veröffentlichungen [22–41] anhand von 22 Merkmalen in einer Datenbank zusammengefasst. Diese kann im Anhang eingesehen werden.

¹www.superpower-inc.com/system/files/SP_Soldering+Instructions_2014_v1.pdf

²www.amsc.com/library/AMPSPLICING_AN_A4_0112.pdf

3.3.1. Kontaktfläche

Die Vergrößerung der Kontaktfläche adressiert das Problem großer Kontaktwiderstände zwischen Grenzflächen, in diesem Fall Lot und den angrenzenden Materialien. Die Modellvorstellung nach [43, S. 1-17] ist, dass jede technische Oberfläche eine gewisse Rauheit aufweist. Daher gibt es an der Grenze zwischen zwei Oberflächen Bereiche an denen kein Kontakt zwischen den Oberflächen besteht. Soll sein elektrischer Strom zwischen den beiden Oberflächen fließen, so ist er auf die Bereiche beschränkt, an denen die Oberflächen tatsächlich in Kontakt stehen. Dadurch entwickelt sich ein sogenannter Engewiderstand. Vergrößert man die makroskopische Kontaktfläche vergrößern sich die mikroskopischen Kontaktbereiche entsprechend; der Engewiderstand sinkt.

Da in der Regel nur die flachen Seiten der REBCO-Bänder miteinander verbunden werden ergibt sich die Kontaktfläche, vereinfacht, aus der Breite des Bandes und der Kontaktlänge. In den Abbildungen 3.2 sind die Ergebnisse einer Reihe von Untersuchungen an 4 mm breiten Supraleitern mit unterschiedlichen Kontaktlängen dargestellt.

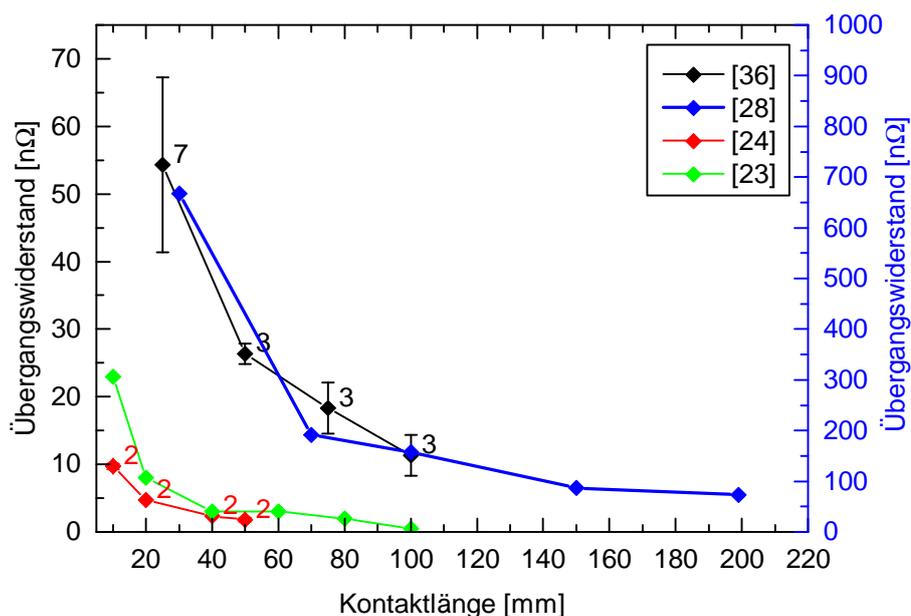


Abbildung 3.2.: Darstellung von Übergangswiderständen bei unterschiedlichen Kontaktlängen [23, 24, 28, 36]

Die blaue Messreihe ist der rechten Skala zugeordnet, die übrigen der Linken.

Der Übergangswiderstand R scheint umgekehrt proportional mit der Kontaktlänge L abzunehmen.

$$R \propto \frac{1}{L} \quad (3.2)$$

Um diese Abhängigkeit von der Kontaktlänge zu berücksichtigen hat es sich etabliert den spezifischen Übergangswiderstand R_s anzugeben. Er ist das Produkt aus Übergangswiderstand R und Kontaktfläche A und wird üblicherweise in $n\Omega \text{ cm}^2$ angegeben.

$$R_s = A \cdot R \quad (3.3)$$

Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist verhält sich der spezifische Übergangswiderstand über die Kontaktlänge in erster Näherung konstant. Daher bildet er einen geeigneten Vergleichswert für die Berücksichtigung der Kontaktlänge.

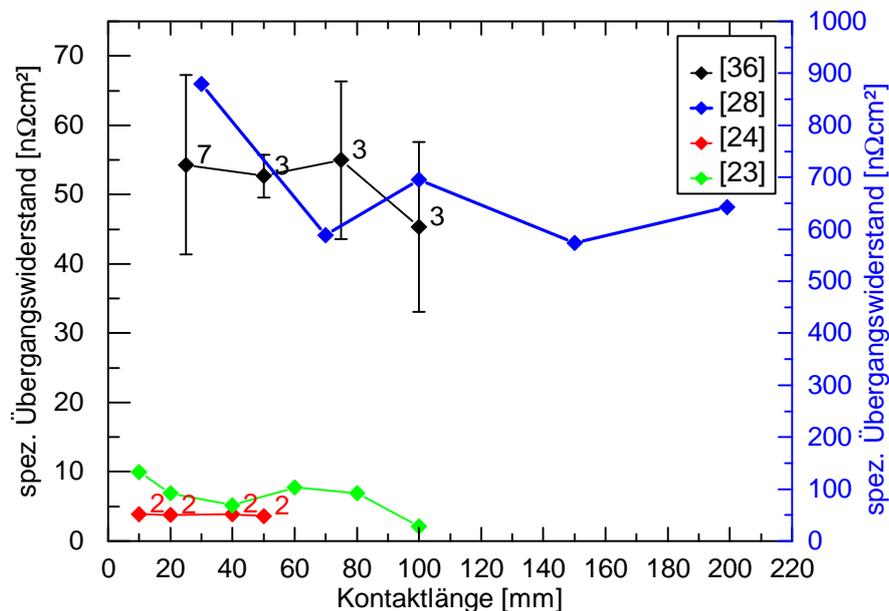


Abbildung 3.3.: Darstellung spezifischer Übergangswiderstände bei unterschiedlichen Kontaktlängen [23, 24, 28, 36]

Eine weitere Größe, die in Verbindung mit der Kontaktlänge steht, ist die Stromekoppellänge (engl. *current transfer length*). Sie beschreibt die Länge die benötigt wird bis der Strom vollständig von einer REBCO-Schicht zur nächsten geflossen ist. Sie dient zum einen als Grenzwert für die minimale Kontaktlänge und zum anderen gibt sie an wie weit der Spannungsabnehmer bei der Messung des Übergangswiderstandes vom Ort der Stromekopplung entfernt sein muss. Für 6 mm breite REBCO-Bänder mit Kupferstabilisator wurde die Stromekoppellänge zu $\lambda \ll 1 \text{ cm}$ gemessen [20, 44].

3.3.2. Kontaktanordnung

Aus Abschnitt 2.3 geht hervor das REBCO-Bänder auf Grund ihrer Schichtstruktur anisotrope Materialeigenschaften besitzen. Dabei gibt es drei grundlegende Schichtkombinationen. Zur Beschreibung dieser Kombinationen wird ein REBCO-Band der Einfachheit halber in zwei Hälften aufgeteilt. REBCO-, Silber- und eine Stabilisatorschicht bilden die HTS-Seite. Pufferschichten, Substrat und eine Stabilisatorschicht bilden die Substrat- oder Sub-Seite.

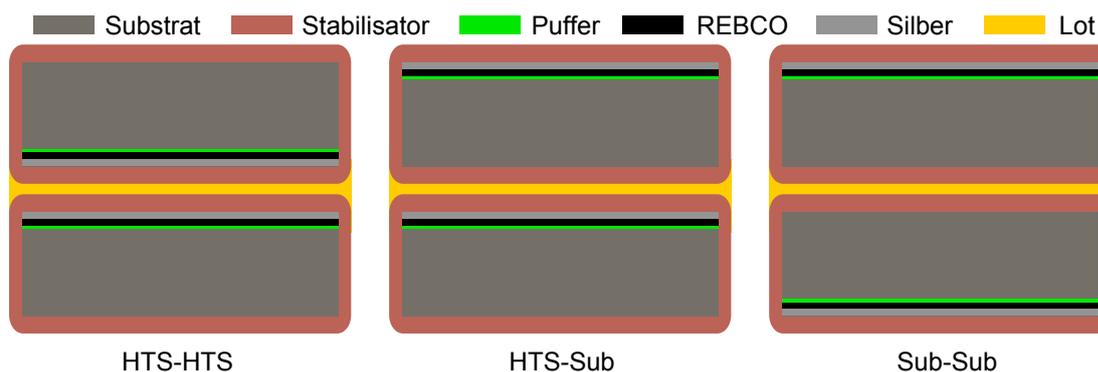


Abbildung 3.4.: Schematische Darstellung verschiedener SPI REBCO-Band Ausrichtungen im Querschnitt

Aus Abbildung 3.4 wird ersichtlich, dass es für einen Strom zwei Möglichkeiten gibt von einer REBCO-Schicht zur nächsten fließen.

1. Er kann durch die dazwischen liegenden Schichten fließen
2. Er kann außen über den Stabilisator fließen

In jedem Fall muss die verbindende Lotschicht passiert werden. Betrachtet man die spezifischen elektrischen Widerstände der verschiedenen Schichtmaterialien (s. Tab. 3.1) kann abgeschätzt werden wie der Strom von REBCO-Schicht zu REBCO-Schicht fließt.

Tabelle 3.1.: Spezifische elektrischer Widerstände von Schichtmaterialien bei 77 K [22, 45–47]

Hastelloy C-276	Ni-W-Legierung	Silber	Kupfer	Puffer
nΩ m	nΩ m	nΩ m	nΩ m	nΩ m
1235	268	2,88	2,13	5000

Da der spezifische Widerstand von Kupfer und Silber bei 77 K sehr ähnlich ist, wird der Strom bei einer HTS-HTS Ausrichtung, bei kleinen Kontaktwiderständen an den

Grenzflächen zur Silberschicht, zum Großteil über die Silberschicht fließen. Der Grund dafür ist, dass die Querschnittsfläche des Silbers sehr viel größer ist als die des Stabilisators.

Anders stellt sich es sich in der HTS-Sub und in der Sub-Sub Ausrichtung dar. Da es sich bei den Pufferschichten um isolierend wirkende Materialien handelt, ist ihr elektrischer Widerstand entsprechend hoch. Das bedeutet, dass selbst bei 12 mm breiten Bändern der Großteil des Stroms über die Stabilisatoren fließt.

Je nach Anordnung ergeben sich also andere Anforderungen für den Stabilisator. In einer HTS-HTS Anordnung sollte der Stabilisator möglichst dünn sein um den Materialwiderstand gering zu halten. Bei einer HTS-Sub oder Sub-Sub Anordnung erscheint jedoch ein dickerer Stabilisator sinnvoll um den elektrischen Widerstand durch Vergrößerung der Querschnittsfläche zu reduzieren.

Diese Überlegungen beziehen sich jedoch nur auf SPI REBCO-Bänder. Da bei AMSC die Stabilisatoren das Band nicht vollständig umgeben (vgl. Abb. 2.4), ist in dem Fall ein dünnerer Stabilisator zu empfehlen.

Neben der bisher diskutierten Ausrichtung der REBCO-Bänder werden außerdem zwei Arten von Kontaktkonfigurationen unterschieden. In Abbildung 3.5 sind diese, eine Überlapp- und Brückenanordnung, in einer HTS-HTS Ausrichtung schematisch abgebildet.

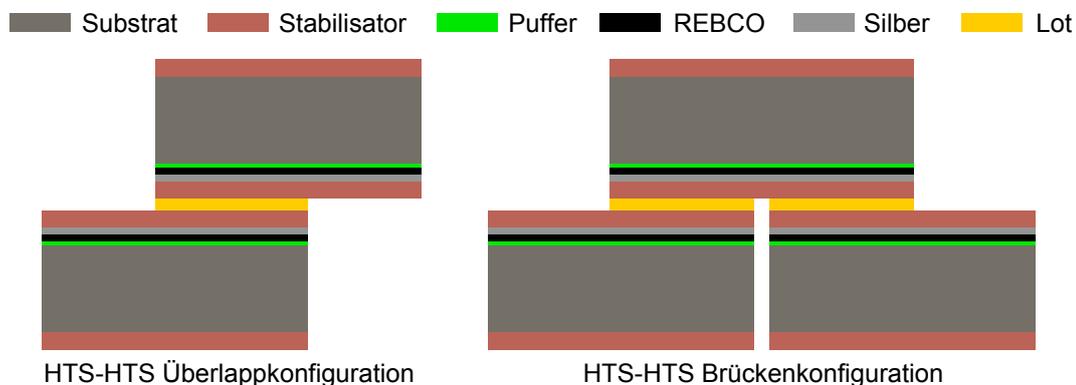


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung einer Überlapp- und einer Brückenkonfiguration in HTS-HTS Anordnung im Längsschnitt

Betrachtet man die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen bzgl. den Kontaktanordnungen (s. Tab. 3.2) so wird deutlich, dass die Überlapp HTS-HTS Anordnung die besten Übergangswiderstände erzielt. Weiterhin ist zu erkennen, dass es in der Überlapp HTS-HTS Konfiguration nur geringe Unterschiede zwischen den Übergangswiderständen vergleichbarer REBCO-Bänder verschiedener Hersteller gibt. Dies gilt jedoch nicht in der HTS-Sub Ausrichtung. Dort weisen Bänder von SPI deutlich geringere Übergangswiderstände auf als Vergleichbare von AMSC.

3. Niederohmige Lötkontakte für REBCO-Bänder

Die berichteten Ergebnisse der Brücken HTS-HTS Anordnung entsprechen bereits sehr gut theoretischen Abschätzungen. Bei einer Brücken HTS-HTS Anordnung muss der Strom im Vergleich zu einer Überlapp Anordnung die doppelte Anzahl an Schichten durchlaufen bei gleichzeitig halber Kontaktfläche. Daher ergibt sich $R_{\text{Brücke}} = 4 \cdot R_{\text{Überlapp}}$.

Tabelle 3.2.: Ergebnisse zu Untersuchungen zum Einfluss der Kontaktanordnung auf den Übergangswiderstand

Überlapp		Brücke	Hersteller	Stabilisator	Quelle
HTS-HTS	HTS-Sub	HTS-HTS			
$R_s \pm s$	$R_s \pm s$	$R_s \pm s$			
$\text{n}\Omega \text{ cm}^2$	$\text{n}\Omega \text{ cm}^2$	$\text{n}\Omega \text{ cm}^2$		Material, μm	
$60,96 \pm 30,48$	$528,32 \pm 111,76$	–	SPI	Kupfer, 20	[33]
$71,12 \pm 60,96$	$731,52 \pm 60,96$	–	SPI	Kupfer, 20	[33]
$3,772 \pm 0,22$	–	$17,14 \pm 1,85$	SPI	Kupfer, 20	[24]
$73,15 \pm 24,38$	$1267,97 \pm 341,38$	–	AMSC	Kupfer, 50	[33]
$73,15 \pm 36,58$	$1231,39 \pm 377,95$	–	AMSC	Kupfer, 50	[33]
$167,64 \pm 33,53$	$3039,87 \pm 324,10$	–	AMSC	Messing, 110	[33]
$6,48 \pm 2,62$	$160,13 \pm 18,624$	–	AMSC	Kupfer, 40	[23]

Die Überlapp HTS-HTS Ausrichtung hat sich auf Grund der beschriebenen Ergebnisse als Standard für Untersuchungen von Lötkontakten an REBCO-Bändern etabliert. Daher sei im Folgenden, wenn nicht explizit anders beschrieben, von einer Überlapp HTS-HTS Konfiguration auszugehen.

3.3.3. Fertigungsverfahren

Abschnitt 3.3.2 zeigte, dass die Übergangswiderstände von Bändern unterschiedlicher Hersteller bei bestimmten Kontaktkonfigurationen deutlich voneinander abweichen. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Fertigungsverfahren einen starken Einfluss auf die Übergangswiderstände nehmen. Die Problematik besteht jedoch darin, dass schon die Übergangswiderstände unterschiedlicher Produktionschargen desselben Fertigungsverfahrens nicht konstant zu sein scheinen.

In Abbildung 3.6 sind die Ergebnisse einer Untersuchung abgebildet die eine Vielzahl unterschiedlicher Produktionschargen miteinander verglich. Auf der X-Achse sind die Identifikationsnummern der unterschiedlichen Produktionschargen abgebildet. Es handelte sich um ein SCS4050-AP von SPI. Die 4 mm breiten Bänder wurden vom Hersteller aus einem 12 mm breiten Band geschnitten. Der Suffix in der Identifikationsnummer beschreibt

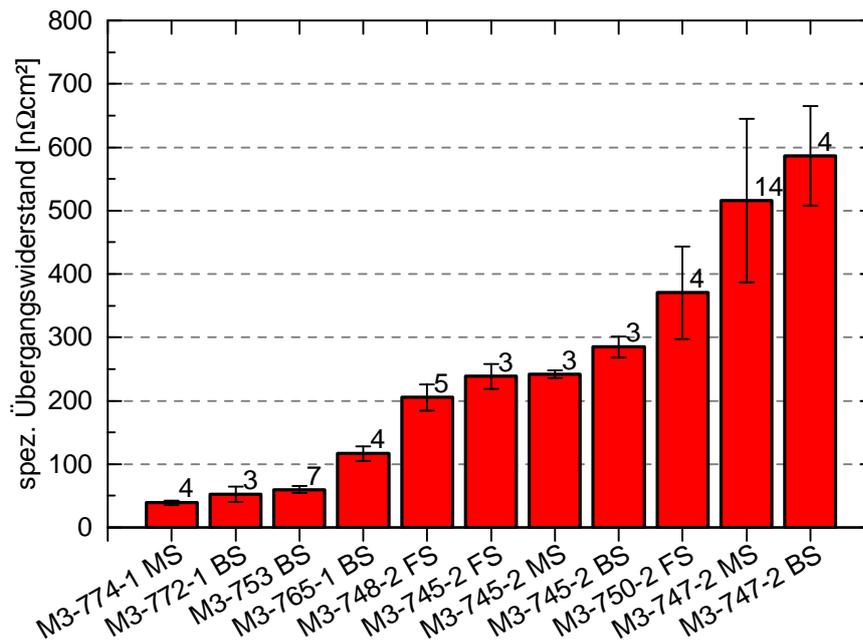


Abbildung 3.6.: Übergangswiderstände unterschiedlicher Produktionschargen von SPI Bändern bei gleichen Stabilisatordicken [36]

die Position des 4 mm breiten Supraleiters im Originalband. FS, MS, BS steht für *front-slit*, *middle-slit* bzw. *back-slit*. Die Zahlen oberhalb der Balken geben den Umfang der Stichprobe an.

Es ist zu sehen das der Unterschied zwischen dem geringsten und größten Widerstand etwa eine Größenordnung beträgt.

3.3.4. Stabilisator

Regulär sind REBCO-Bänder mit einem Kupferstabilisator einer gewissen Dicke versehen. Es sind jedoch auch Messing, Edelstahl oder nicht stabilisierte Bänder erhältlich.

Abbildung 3.7 zeigt Ergebnisse zweier Untersuchungen an AMSC REBCO-Bändern mit unterschiedlichen Stabilisatormaterialien und -dicken. Die Zahlen über den Balken geben die Stabilisatordicke in Mikrometern an. Es sei besonders auf die Achsenunterbrechung hingewiesen. Die Stichprobe umfasste in beiden Untersuchungen 6 Proben.

Die Übergangswiderstände der Messing stabilisierten REBCO-Bändern liegen zwischen einem Faktor 3 und 10 über denen der Kupfer stabilisierten. Edelstahl stabilisierte weisen einen um zwei Größenordnungen größeren Übergangswiderstand auf als entsprechende Kupfer stabilisierte. Diese Ergebnisse gelten sowohl beim Einsatz von reinen Indium Lot als auch bei InSn.

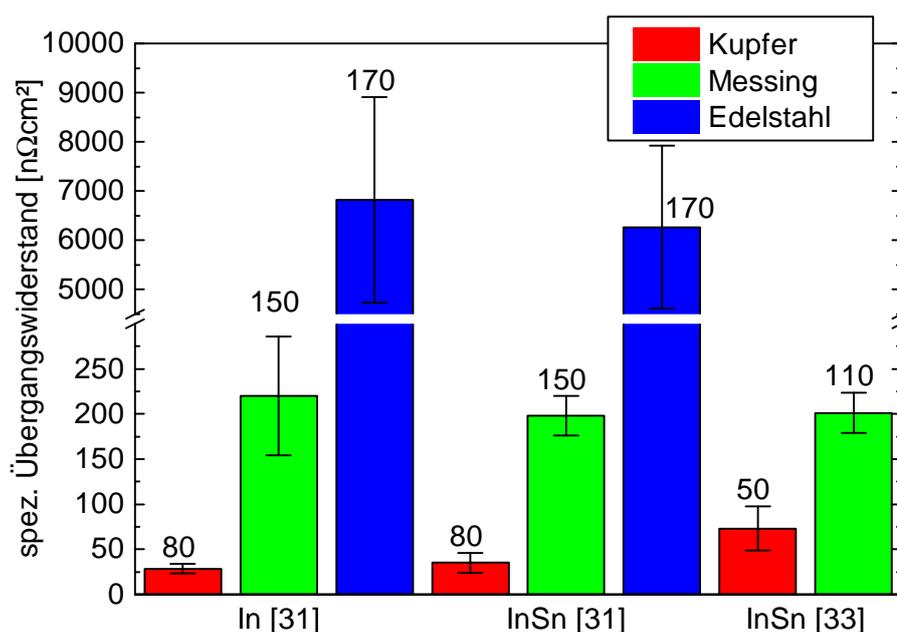


Abbildung 3.7.: Ergebnisse zweier Studien zu Übergangswiderständen unterschiedlicher Stabilisatormaterialien bei AMSC REBCO-Bändern [31, 33]

Wenn man den spezifischen elektrischen Widerstand der unterschiedlichen Stabilisatormaterialien kennt, kann abgeschätzt werden welchen Anteil der Stabilisator am gesamten Übergangswiderstand hat. Für die in Abb. 3.7 abgebildeten Materialien und Dicken wurden entsprechende Abschätzungen in Tabelle 3.3 durchgeführt.

Während der spezifische Widerstand für Kupfer mit 1 bis 2 nΩ cm² klein ist, haben Messing und Edelstahl einen beträchtlichen Anteil am Übergangswiderstand.

Tabelle 3.3.: Spezifische Widerstände unterschiedlicher Stabilisatormaterialien bei verschiedenen Dicken

Stabilisatordicke μm	Kupfer nΩ cm ²	Messing nΩ cm ²	Edelstahl nΩ cm ²
50	1,075	14,25	300
80	1,72	22,8	480
110	2,365	31,35	660
150	3,225	42,75	900
170	3,655	48,45	1020

3.3.5. Lote

Wird von dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Modell ausgegangen, dann kann der Beitrag des Lotes am Übergangswiderstand als der Materialwiderstand des Lotes und der Kontaktwiderstände zu den angrenzenden Materialien beschrieben werden. Anders als bei den bisher diskutierten Faktoren kann durch die Auswahl des Lotes der Kontaktwiderstand beeinflusst werden. Welcher der beiden Anteile größer ist hängt entscheidend von der Dicke der Lotschicht ab. Berichtete Dicken liegen zwischen 1 und 100 μm [22, 31, 34, 35, 40, 48]. Aus Tabelle 3.4 geht hervor das für sehr geringe Schichtdicken der Anteil des Materials in der Regel klein ist. Spätestens jedoch ab Dicken von 20 μm hat er bedeutende Anteile am Übergangswiderstand. Grundlage für die Überschlagsrechnung sind Werte aus Tabelle 3.5.

Tabelle 3.4.: Intrinsische elektrische Widerstände verschiedener Lote bei unterschiedlichen Lotschichtdicken und 77 K

Schichtdicke μm	66In-33Bi $\text{n}\Omega\text{ cm}^2$	100In $\text{n}\Omega\text{ cm}^2$	63Sn-37Pb $\text{n}\Omega\text{ cm}^2$	48Sn-52In $\text{n}\Omega\text{ cm}^2$
1	1,5	0,16	0,25	0,9
2	3	0,32	0,5	1,8
10	15	1,6	2,5	9
20	30	3,2	5	18
50	75	8	12,5	45
100	150	16	25	90

Die zur Verfügung stehenden Weichlote werden von mehreren Faktoren eingeschränkt. Zum einen kann einsetzende Sauerstoffdiffusion die elektrischen Eigenschaften des REBCO-Bandes degradieren (vgl. Abschnitt 2.2). Zum anderen setzt bspw. AMSC ein Wellenlötverfahren mit einem Blei-Zinn-Lot ein um den Stabilisator mit der Silberschicht zu verbinden [31]. Um ein Lösen dieser Verbindung zu vermeiden ist es notwendig ein niedriger schmelzendes Lot zu verwenden.

Tabelle 3.5 listet alle bisher untersuchten Lote mit den, soweit bekannt, relevanten physikalischen Eigenschaften auf. Angegeben ist die Liquidustemperatur T_l , die Solidustemperatur T_s , die spezifischen elektrischen Widerstände ρ bei 77 und 293 K sowie der niedrigste berichtete spezifische Übergangswiderstand R_s für das entsprechende Lot.

Es ist ersichtlich das sich die Widerstände der meisten Lote im Bereich zwischen 30 und 50 $\text{n}\Omega\text{ cm}^2$ bewegen. Ausreißer dazu sind jeweils InBi Lote welche in Abhängigkeit

Tabelle 3.5.: Physikalische Eigenschaften verschiedener Lote

Lot	T_l °C	T_s °C	$\rho(77\text{ K})$ $\mu\Omega\text{ cm}$	$\rho(293\text{ K})$ $\mu\Omega\text{ cm}$	R_s $\text{n}\Omega\text{ cm}^2$	Quellen
66In-33Bi	72	–	15	40	3,6	[25, 49]
100Indium	157	157	1,6	8	28,6	[31, 50]
96.5Sn-3.5Ag	211	221	2,5	12,3	30,5	[33, 49, 50]
60Sn-40Pb	191	183	2,5	15	34	[34, 49, 50]
48Sn-52In	118	118	9	19,5	35,2	[31, 49, 50]
63Sn-37Pb	183	183	2,5	14,5	37	[35, 49, 50]
80In-15Pb-5Ag	154	149	–	13,2	38,8	[36, 50]
40Sn-60Pb	238	183	–	17	42,5	[38, 50]
12Sn-49Bi-18Pb-21In	58	58	–	70,8	46,3	[29, 50]
93Sn-4.6In-2.3Pb	135	–	–	–	56,6	[36]
43Sn-43Pb-14Bi	163	144	–	21	73,2	[33, 50]
33In-67Bi	109	109	–	–	190	[33, 50]

der Zusammensetzung die mit Abstand niedrigsten und höchsten Übergangswiderstände erzielen.

3.3.6. Weitere Einflussfaktoren

In den vorherigen Abschnitten wurden bisher verhältnismäßig gut untersuchte Einflussfaktoren diskutiert. Im Folgenden seinen Einflussfaktoren erwähnt für die es bisher nicht ausreichend statistisch belastbare Untersuchungen gibt oder denen widersprüchliche Veröffentlichungen zu Grunde liegen.

Druck

Es kann als gesichert angesehen werden, dass leichter Druck beim Löten sich positiv auf den Übergangswiderstand auswirkt [23, 48, 51]. Dies kann schon bei einem Druck von 1 MPa beobachtet werden [23]. Unklarheit besteht zur Zeit noch darüber ob höherer Druck den Übergangswiderstand weiter verringert. In [24] wurde eine Probe mehrfach bei Drücken zwischen 1 und 10 MPa gelötet. Dabei konnte keine Verbesserung des Übergangswiderstandes festgestellt werden. In [48] wird jedoch berichtet das erst ab Drücken von ca. 6 MPa keine Verbesserung mehr beobachtet werden.

Bandlote und Pasten

Einige Lote sind auch als flaches Band oder als Paste erhältlich. Dabei ist das Flussmittel bereits dem Lot beigemischt worden. Dadurch kann die Kontaktfläche einfach mit dem

entsprechenden Lot abgedeckt werden, ohne das gesondert verzinnt werden muss. Eine thermische Vorbelastung auf Grund von Verzinnen entfällt also. In Abbildung 3.8 sind fünf Paare von Übergangswiderständen von jeweils Verzinnnten und nicht Verzinnnten Proben abgebildet. Die Zahlen über dem Balken zeigen den Stichprobenumfang an.

Ob der Einsatz von Bandloten oder Pasten zu geringeren Übergangswiderständen führt, kann an Hand der veröffentlichten Daten noch nicht belegt oder widerlegt werden. Jedoch scheint sich ihr Einsatz positiv auf die Reproduzierbarkeit auszuwirken.

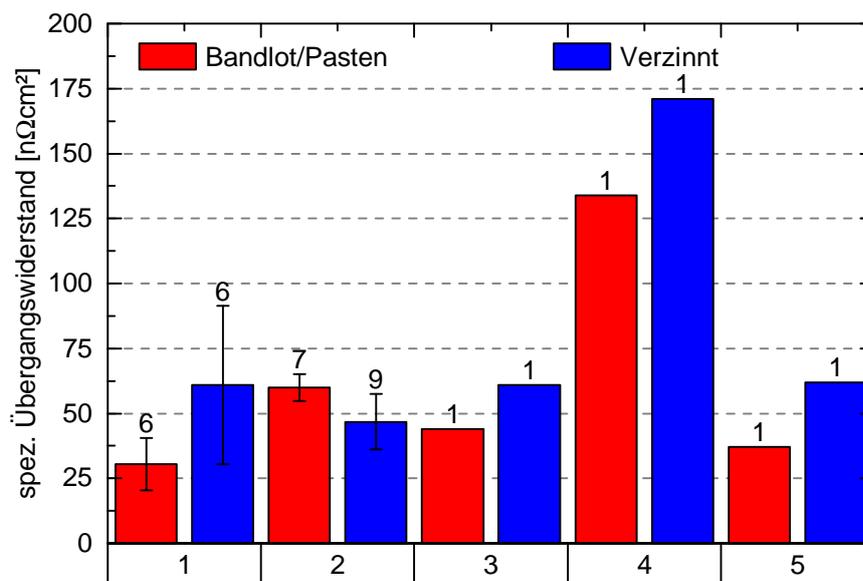


Abbildung 3.8.: Verzinnnte Proben im Vergleich zu nicht Verzinnnten Proben [33, 35, 36]

Sonstiges

Für Abkühlraten von 10 und 3.3 °C min⁻¹ von der Löttemperatur bis zur Raumtemperatur konnte kein signifikanter Unterschied in den Übergangswiderständen festgestellt werden [29].

3.4. Diskussion

Bezogen auf die Problematik der Stromeinkopplung in RACC sind nicht alle Ergebnisse von Untersuchungen an REBCO-Bändern direkt übertragbar. So ist der Zusammenhang der Kontaktlänge und des Übergangswiderstandes sehr gut untersucht und stützt die Theorie, dass eine größere Fläche bei der Stromeinkopplung ebenfalls zu einer homogeneren Stromverteilung in den Bändern des RACC führt. Konkrete Versuche dazu sind jedoch bisher nicht bekannt.

Aus den Überlegungen zur Kontaktanordnung lässt sich festhalten, dass die Stromeinkopplung über die HTS-Seiten der REBCO-Bändern vielversprechend ist. Gelingt eine homogene Stromeinkopplung in ein RACC bereits über die Terminal-Band Kontakte so gibt es keine Bedenken bzgl. der Eignung von REBCO-Bändern unterschiedlicher Hersteller. Ist es jedoch erforderlich, dass die Bändern Inhomogenitäten untereinander ausgleichen empfehlen sich SPI Bändern auf Grund geringerer Übergangswiderstände bei HTS-Sub Anordnungen.

Bezüglich Stabilisatoren lässt sich feststellen, dass selbst bei relativ dicken Stabilisatoren der resistive Anteil von Kupfer verschwindend gering ist. Stabilisatorfreie Supraleiter wurden in dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt, da die Untersuchungen oft nur aus einer einzigen Probe bestanden und somit eine eingeschränkte Aussagekraft besitzen.

Aus der Betrachtung unterschiedlicher Lote kann festgehalten werden, dass man mit einer ganzen Reihe von Loten ähnliche Übergangswiderstände erzielen kann. Es ist also möglich durch die Auswahl des Lotes flexibel auf unterschiedliche Randbedingungen zu reagieren.

Der Einfluss des Druckes auf den Übergangswiderstand ist auch Literaturdaten nur ansatzweise zu entnehmen. Es fehlt noch eine systematische Untersuchung mit statistisch relevanten Stichproben.

Generell lässt sich feststellen, dass reine Prozessparameter wie Löttemperatur, Lötdauer oder Abkühlgeschwindigkeit in vergangenen Untersuchungen wenig Beachtung gefunden haben. Ebenso gibt es bisher noch keine systematischen Untersuchungen ob die diversen, dem Verzinnen vorausgehenden, Oberflächenbehandlungen einen Effekt auf den Übergangswiderstand haben.

3.5. Definition der Versuchsparameter

Rekapituliert man die Einflussfaktoren der letzten Abschnitte fällt auf das es nur bei der Auswahl des Lotes (Zusammensetzung und Form) und bei der Höhe des Druckes Variationsspielräume gibt. Für alle anderen Faktoren gibt es ein klares Optimum das sich zusammenfassen lässt: Überlapp HTS-HTS Anordnungen mit Kupfer stabilisiertern Bänder bei einer möglichst großen Kontaktfläche erzielen die geringsten Übergangswiderstände. Um die eigenen Ergebnisse mit der Literatur vergleichen zu können wurde eben diese Kombination an Parametern für die Versuche an REBCO-Bändern verwendet.

Da starker Druck zu einer Degradation des kritischem Stroms bei RACC führen kann [52], wurde davon abgesehen eine bessere Stromeinkopplung auf Kosten des kritischem Stroms zu erreichen. Als Druck für die Bandversuche wurde 6 MPa gewählt da in [20]

berichtet wird, dass leichte Schwankungen zu keinen signifikanten Änderungen im Übergangswiderstand führen.

Folgende Lote wurden ausgewählt

- 66In-33Bi

Zwar besitzt dieses Indium-Bismut Lot einen vergleichsweise hohen spezifischen Widerstand (vgl. Tab. 3.5) allerdings wurden bei Verwendung dieses Lotes mehrfach sehr gute Übergangswiderstände berichtet [23–25]. Außerdem besitzt es mit 72 °C einen sehr tiefen Schmelzpunkt.

- 60Sn-40Pb

Blei-Zinn Lote sind der Standard beim Weichlöten von elektronischen Bauteilen. Es ist vergleichsweise günstig und einfach verfügbar. AMSC setzt bspw. ein Lot ähnlicher Zusammensetzung ein um den Stabilisator auf das REBCO-Band zu löten. Es besitzt einen sehr geringen spezifischen Widerstand, aber einen vergleichsweise hohen Schmelzpunkt. Es ist das von SPI empfohlene Lot für das Kontaktieren ihrer Supraleiter³.

- 50In-50Sn

Da Indium Zinn nach [31] eine etwas bessere Lötbarkeit aufweist als reines Indium, wurde dieses Lot genauer untersucht. Es liegt mit seinem Schmelzbereich und spezifischen elektrischen Widerstand zwischen InBi und PbSn. Es ist eines der von AMSC empfohlenen Lote für Kontakte ihrer Supraleiter⁴.

Als Flussmittel wurde Spiriflux 330⁵ verwendet da bisher sehr gute Erfahrungen beim Entfernen von Oxidschichten auf Kupferstabilisierten REBCO-Bändern gemacht wurden.

Da die Transpositionsänge der RACC bei 115 mm liegt wurden als Kontaktlänge 100 mm angestrebt.

Auf den Einsatz von Pasten oder Bandloten wurde verzichtet, da zum einen der Nutzen strittig ist und zum anderen ihr Einsatz bei RACC wesentlich komplizierter ist als bei Bändern.

Die berichteten großen Unterschiede von Übergangswiderständen unterschiedlicher Produktionschargen waren der Grund, dass eine zweite Produktionscharge in begrenztem Umfang getestet wurden.

³www.superpower-inc.com/system/files/SP_Soldering+Instructions_2014_v1.pdf

⁴www.amsc.com/library/AMPSPLICING_AN_A4_0112.pdf

⁵www.spirig.com/index.php?id=112&L=1

4. Versuche mit REBCO-Bänder

In Kapitel 3 wurden zahlreiche Parameter und Einflussgrößen bezüglich der Übergangswiderstände von Lötkontakten zwischen zwei REBCO-Bändern beleuchtet. Hierbei wurde das Verlöten zweier REBCO-Bänder mit direkt gegenüberliegenden HTS Seiten eindeutig als Optimum identifiziert. Somit verbleibt als vielversprechendste Variable zur Minimierung des Übergangswiderstandes das Lot. Es wurden drei Lote bestimmt die im Folgenden genauer untersucht werden sollen. Dafür werden pro Lot zehn REBCO-Band Paare miteinander verlötet und ihr Übergangswiderstand gemessen. Die gewonnenen Daten sollen als Grundlage für die Auswahl eines Lotes bzw. von Lotten für die Versuche an RACC dienen.

Da berichtet wurde, dass der Übergangswiderstand stark von der Produktionscharge des REBCO-Bandes abhängen kann, wird eine zweite Produktionscharge in geringerem Umfang untersucht um festzustellen ob dieses Ergebnis reproduziert werden kann.

4.1. Versuchsmaterialien und Laborausüstung

Die verwendeten Supraleiter stammen aus SuperPower's SCS Produktreihe¹. Die Kennwerte der benutzten Supraleiter sind in Tabelle 4.1 einzusehen; die der Lote in Tabelle 4.2.

Tabelle 4.1.: Kennwerte der verwendeten Supraleiter

Produktionscharge	Breite mm	Dicke mm	I_c A	Stabilisatordicke mm	Stabilisator
M4-69-4 BS	4.0	0.15	114	0.10	Kupfer
M3-1072-3	4.1	0.15	115	0.11	Kupfer

Das verwendete Flussmittel, Spiriflux 330², wird nach DIN 8511-2 der Flussmittelgruppe F-SW 23-25 zugeordnet. Zur Reinigung der Proben und entfernen von Fremdschichten

¹www.superpower-inc.com

²www.spirig.com/index.php?id=112&L=1

wurde Scotch-Brite WR-RL eingesetzt³. Als Wärmequellen wurden eine PZ 44 Heizplatte⁴ mit 3300 W und/oder ein Weller WECP-20 LötKolben⁵ mit abgeflachter Spitze eingesetzt.

Tabelle 4.2.: Übersicht der eingesetzten Loten

Lot	Zusammensetzung Gewicht-%	Schmelztemperatur °C	Hersteller
Indium Bismut	33,3 % In 33,7% Bi	72	Chemet
Indium Zinn	50% In 50% Sn	125	Chemet
Blei Zinn	40% Pb 60% Sn	191	Stannol

4.2. Probenvorbereitung und Verzinnen

Der Supraleiter wurde vor dem Verzinnen auf folgende Art und Weise behandelt:

1. Zuschnitt und Nummerierung des Supraleiters auf ca. 17 cm lange Stücke
2. Abreiben des Zuschnitts mittels Scotch Brite zum entfernen von Oxidationen und Fremdschichten, 15 bis 20 mal
3. Reinigung der abgeriebenen Fläche von Rückständen mittels Isopropanol

In Abbildung 4.1 ist eine Probe nach der oben geschilderten Behandlung abgebildet.

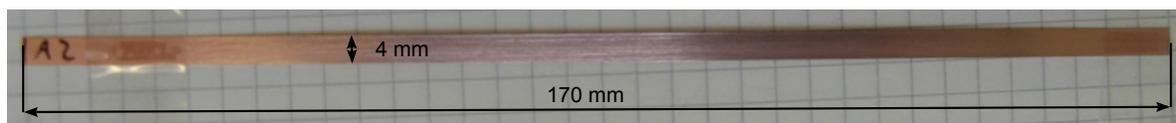


Abbildung 4.1.: Supraleiter nach Reinigung und Zuschnitt

Nachdem jeweils 10 bis 20 Bänder in dieser Art und Weise präpariert wurden, folgte das Verzinnen. Dazu wurde die Heizplatte zunächst, abhängig vom verwendeten Lot (s. Tab. 4.3), aufgeheizt. Die Temperaturen scheinen zunächst unnötig hoch, im Vergleich mit der Schmelztemperatur der Lote, jedoch stellt sich, vor allem zu Beginn, auf der Heizplatte ein Temperaturgradient von 50 bis 70 °C zu den Rändern hin ein. Experimente zeigten das die REBCO-Bänder erst bei Temperaturen von über 275 °C degradierten, wenn sie nicht länger

³schleifen.3mdeutschland.de

⁴www.gestigkeit.de

⁵www.weller.de

Tabelle 4.3.: Temperaturen für Heizplatte und LötKolben beim Vorverzinnen

Lot	Heizplattetemperatur	LötKolbentemperatur
	°C	°C
InBi	120	175
InSn	185	250
PbSn	220	300

als 3 min dieser Wärme ausgesetzt waren. Um die Heizplatte nicht durch Lotrückstände zu verunreinigen wurde sie mit handelsüblicher Aluminium-Folie abgedeckt.

Anschließend durchlief jede Probe folgenden Prozess:

1. Benetzen eines etwa 11 cm langen Abschnitts mit Flussmittel. Dabei ist darauf zu achten, dass der Supraleiter auch an den Rändern vollständig benetzt ist.
2. Nach einigen Sekunden Einwirkzeit wird überschüssiges Flussmittel abgewischt.
3. Platzieren des Supraleiters auf der Heizplatte. Für eine bessere Wärmeübertragung wurde der Supraleiter auf dem mit Flussmittel bedeckten Abschnitt mit Lotdraht auf die Heizplatte gedrückt. Auf dem nicht behandelten Abschnitt wurde der Supraleiter mit einem Holzstück oder einer Pinzette auf die Heizplatte in Position gehalten.
4. Sobald das Lot schmilzt wird dieses über den mit Flussmittel benetzten Bereich gleichmäßig verteilt. Falls es lokal zu Unebenheiten kommt, können diese mit dem LötKolben behandelt werden.
5. Nach vollständiger Benetzung der mit Flussmittel behandelten Fläche wird der Supraleiter wieder von Heizplatte entfernt.
6. Reinigung des Supraleiters mit Isopropanol zum entfernen möglicher Flussmittelrückstände.

In Abbildung 4.2 sind exemplarisch drei verzinnte Proben abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die Lotschicht verhältnismäßig dick ist. Da es bei Vorversuchen mit Kupferbändern, welche mit wenig Lot verzinkt wurden, zu Kontaktproblemen kam wurde sicherheitshalber mehr Lot als notwendig aufgebracht.

Für das Verzinnen sollten pro Probe etwa 4 bis 5 Minuten geplant werden.

Um die Prozesszeit beim Verlöten möglichst kurz zu halten wurden jeweils zwei verzinnte Proben in eine Überlapp HTS-HTS Anordnung gebracht und an den Enden des



Abbildung 4.2.: Verzinnte Proben (1) InBi (2) InSn (3) PbSn

Überlapps mittels eines Lotkolbens kurz erhitzt. Dadurch waren jeweils zwei Proben miteinander kontaktiert (s. Abb. 4.3) wodurch ein aufwändiges Ausrichten beim Verlöten der Proben entfällt.

Als Überlapplänge wurden 10 cm angestrebt.



Abbildung 4.3.: Vorbereiteter Supraleiter in Überlapp HTS-HTS Anordnung

4.3. Lötverfahren und -aufbau

Die Lötverbindung zwischen den so vorbereiteten Probenpaar sollte dadurch hergestellt werden, dass die Proben nochmals über den Schmelzpunkt des Lotes erhitzt werden und mit einem definierten Druck zusammengepresst werden bis das Lot erstarrt.

Für den angestrebten Druck von 6 MPa wird eine Kraft von 2400 N benötigt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten wie diese Kraft aufgebracht werden kann z.B. über Gewichte, Federn oder Schraubenverbindungen. Für diesen Anwendungsfall erschien es jedoch am einfachsten eine der Zug-Druck-Maschinen (Abb. 4.4) des CryoMaK⁶ Labors zu verwenden.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.5 gezeigt. Der mit mehreren Bohrungen versehene Heizblock diente zum Aufheizen der Proben und bestand aus Aluminium. In der Bohrung entlang des Blockes wurde eine 500 W Heizpatrone platziert. Der für die Temperaturregelung verwendete Sensor wurde etwa 2 mm unterhalb der Lötfläche platziert.

Als Gegenstück zum Heizblock diente das abgebildete T-Stück. Der Vorteil des T-Stückes ist, dass eine optische Überwachung des Lötprozesses möglich ist. Zwischen Heizblock und Maschinenaufnahme wurde sicherheitshabler noch ein weiterer Edelstahlblock platziert. Alle Werkstückflächen die mit Anderen in Kontakt standen waren plangefräst.

Das Löten verlief nach folgendem Schema

⁶CryoMaK steht für Cryogene Materialtests Karlsruhe und ist Teil des Instituts für Technische Physik (ITEP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT); www.itep.kit.edu/92.php



Abbildung 4.4.: Die für die Komprimierung verwendete Zug-Druck-Maschine im CryoMak Labor

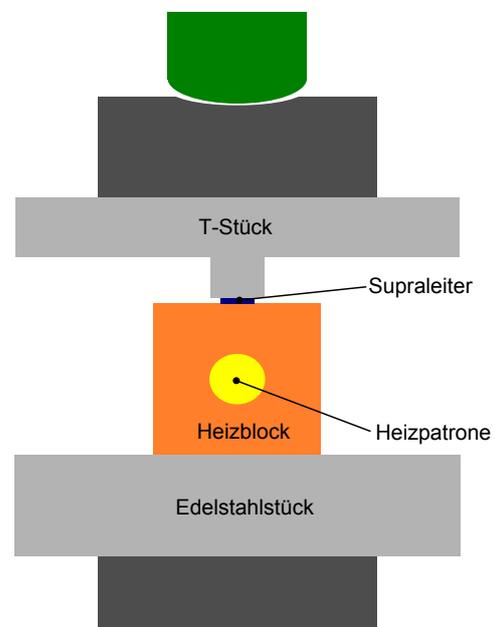
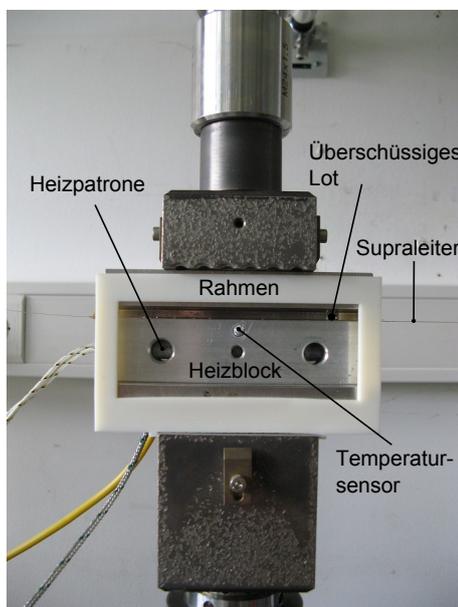


Abbildung 4.5.: Versuchsaufbau für Löten unter Druck; links realer Aufbau; rechts ein schematischer Querschnitt

4. Versuche mit REBCO-Bänder

1. Auflegen und fixieren der Probe mittels Kaptonband auf dem Heizblock
2. Auflegen des Edelstahl T-Stücks
3. Aufheizen des Heizblockes auf die Lot spezifischen Temperaturen (s. Tab. 4.4)
4. Visuelle Überwachung bis das Lot geschmolzen ist
5. Aufbringen der Kraft
6. Abschalten der Wärmezufuhr und warten bis die Temperatur etwa 10 °C unterhalb der jeweiligen Schmelztemperatur liegt
7. Aufheben der Kraft
8. T-Stück abheben
9. Probe vom Heizblock entfernen
10. Reinigen des Aluminiumblocks mittels Scotch-Brite von Lotrückständen

Abbildung 4.6 zeigt exemplarisch wie Proben unterschiedlicher Lote nach durchlaufen des oben beschriebenen Schemas aussahen.



Abbildung 4.6.: Verlötete Supraleiterpaare unterschiedlicher Lote
(1) InBi (2) InSn (3) PbSn

Da der Temperaturverlauf nicht automatisch aufgezeichnet wurde, wurden diesbezüglich einige Kennwerte dokumentiert. Diese sind gemittelt in Tabelle 4.4 für die verschiedenen Lote wiedergegeben. Die Nenntemperatur ist die Temperatur, welche am Temperaturregler eingestellt wurde. Die Ruhetemperatur ist die eingestellte Reglertemperatur während des Probenwechsels. Die Aufheizdauer gibt den Zeitraum an, der benötigt wurde, um von der Ruhetemperatur ausgehend das Lot zu schmelzen. Die Abkühldauer beschreibt den Zeitraum vom Abschalten der Wärmezufuhr bis zum Erreichen der Ruhetemperatur.

Da sich die gesamte Anlage mit der Zeit erwärmte nahm die Aufheizdauer bei späteren Proben leicht ab, während sich die Abkühldauer leicht erhöhte. Übergreifend betrachtet lag die Prozessdauer zwischen 5 und 7 min pro Probe.

Tabelle 4.4.: Typische Versuchsparameter beim Lötten unter Druck

Lot	Aufheizdauer	Abkühldauer	Max. Temp.	Nenntemp.	Ruhetemp.
	s	s	°C	°C	°C
InSn	128	116	150	140	110
PbSn	201	152	210	205	165
InBi	89	132	95	80	60

4.4. Widerstands- und Kontaktflächenmessung

Der Übergangswiderstand wurde indirekt über eine Strom-Spannungs-Messung bestimmt. Die dafür eingesetzte Vier-Kontakt-Messung verlief nach folgendem Schema

1. Säubern der Proben mittels Scotch-Brite.
2. Aufbringen von Flussmittel im Bereich der Spannungsabnehmer.
3. Auflöten der Spannungsabnehmer, auf den supraleitenden Seiten der REBCO-Bänder, typischerweise mit einem Abstand von 13 cm.
4. Einspannen der Probe in die für die Stromeinkopplung vorgesehene Vorrichtung (Abb. 4.7).
5. Abkühlen in einem offenen Stickstoffbad auf 77 K.
6. Messung und Aufzeichnung der Spannung bei 0 A für 60 bis 90 s.
7. Nullen des Nanovoltmeters über die gemittelte Spannung.
8. Beginn der Messung.

Die Spannung wurde mittels eines HP 34420 A Nanovoltmeters gemessen. Der Strom wurde über einen NI USB 6629 A/D-Wandler erfasst. Die Stromanstiegsrate betrug zu Beginn $0,5 \text{ A s}^{-1}$ wurde jedoch im Verlauf der Messungen auf 1 A s^{-1} angehoben.

Die Abbildung 4.7 zu sehenden Spannungsabnehmer bestehen aus Kapton isolierten Kupferdrähten.

Zur Bestimmung des spezifischen Übergangswiderstandes wurde nach Abschluss der Widerstandsmessung die Kontaktfläche bestimmt. Dafür wurden die Länge L und die Breite B des Überlapps mittels eines Messschiebers gemessen (s. Abb. 4.8).

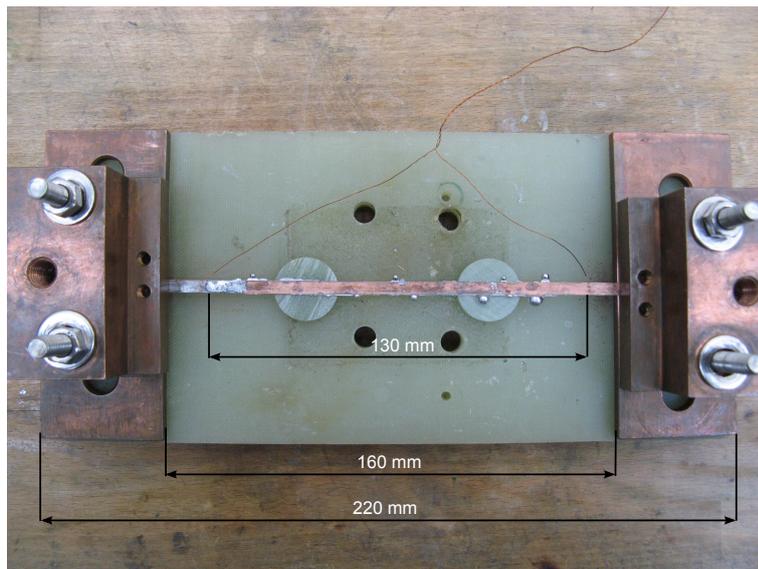


Abbildung 4.7.: Vorrichtung zur Spannungsmessung

Mit der bekannten Breite a des ursprünglichen Bandes lässt sich so über

$$A = L \cdot a - \frac{L(B - a)}{2}$$

die Fläche des Überlapps bestimmen.

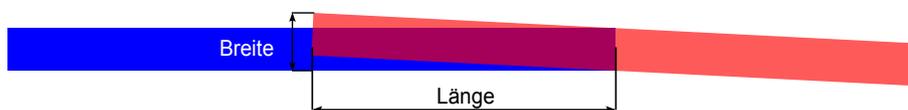


Abbildung 4.8.: Ausrichtungsversatz in Überlappanordnung

4.5. Versuchsauswertung und Fehlerabschätzung

Nach dem *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) [53] ist das Ergebnis einer Messung nur eine Annäherung an den wahren Wert der Messgröße. Daher ist ein Messergebnis nur vollständig, wenn eine zugehörige Messunsicherheit angegeben ist. Im Folgenden sollen daher die Messunsicherheiten bestimmt und der weitere Verlauf der Auswertung erläutert werden.

Vereinfachung des physikalischen Modells

Trägt man die Messdaten einer typischen Messung in einem Spannungs-Strom-Diagramm auf (s. Abb. 4.9) so erhält man einen für jede Probe charakteristischen Kurvenverlauf. Der zunächst lineare Anstieg ist auf den Übergangswiderstand der Probe zurückzuführen. Der

darauffolgende nicht lineare Bereich beschreibt den Zusammenbruch der Supraleitung ab einem gewissen kritischen Strom I_c .

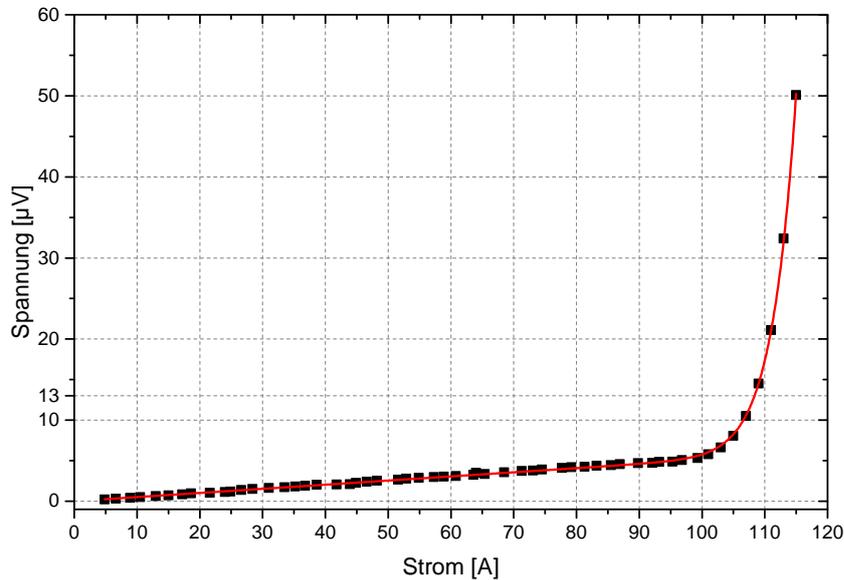


Abbildung 4.9.: Messdaten mit Fitfunktion bei 77 K

Wie die rote Kurve im Diagramm zeigt lässt sich dieser Verlauf sehr gut über

$$U = RI + U_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (4.1)$$

beschreiben. R ist der gesuchte Übergangswiderstand der Verbindung, I der Strom, I_c der kritische Strom, U_c die kritische Spannung und n ein probenspezifischer Exponent [22]. Dank entsprechender Software ist die iterative Anpassung nicht linearer Funktionen mit mehreren Variablen heute in der Regel problemlos möglich. Problematisch ist diese Auswertung jedoch in der Hinsicht, dass iterativ die besten Werte für R , I_c und n gesucht werden. Mit anderen Worten: Eine größere Abweichung von R vom Erwartungswert kann zu einer besseren Anpassung von I_c und n führen. Da jedoch nur R Untersuchungsgegenstand ist, kann dadurch ein Fehler in der Auswertung entstehen.

Um diese Problematik zu umgehen muss abgeschätzt werden unter welchen Randbedingungen der Einfluss der Parameter I_c und n vernachlässigbar klein ist. Aus Gl. 4.1 geht hervor, dass alle betroffenen Parameter ausschließlich im nicht linearen Term der Gleichung auftreten.

Zunächst wird ein Anhaltspunkt benötigt, als was *vernachlässigbar klein* gelten kann. Dafür betrachten wir die Messgenauigkeit des Nanovoltmeters $u_{U, \text{Nanovoltmeter}}$. Im eingesetzten Betriebszustand nach Nullen liegt diese nach Handbuch bei etwa $u_{U, \text{Nanovoltmeter}} = 20 \text{ nV}$.

Als vernachlässigbar kleine Spannung definieren wir daher alles was kleiner ist als 1 % der Messgenauigkeit des Nanovoltmeters, also 200 pV.

Um realistische Werte für U_c , I_c und n für die Abschätzung zu erhalten, können mit entsprechender Software die Messdaten nach Gl. 4.1 ausgewertet werden. Nachdem alle subjektiv unrealistischen Anpassungskurven aussortiert wurden, kann man die Parameter statistisch auswerten (s. Tab. 4.5).

Tabelle 4.5.: Typische Parametergrößen bei Auswertung mittels eines nicht linearen Modells

Parameter	Einheit	\bar{x}	s	Ungünstigstes Szenario
I_c	A	119,61	3,36	109,53
n	–	30,32	4,90	15,62
U_c	μV	8,35	4,31	21,28

Setzt man nun ein 3σ bzw. $3s$ Kriterium und betrachtet das ungünstigste Szenario, dann ergibt sich nach

$$I_{max} = n \sqrt{\frac{u_{V,Nanovoltmeter} \cdot 0,01}{U_c}} = {}^{15,62} \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-5}}{21,28}} \cdot 109,53 \text{ A} = 52,20 \text{ A}$$

Es kann also bei der Auswertung bis zu einen Strom von 52,20 A für 99,7 % aller Messreihen nach der obiger Definition ein lineares Modell eingesetzt werden.

Der Übergangswiderstand kann also aus den Messdaten des Intervalls $0 \text{ A} < I < 52 \text{ A}$ durch

$$U = RI \tag{4.2}$$

berechnet werden.

Messunsicherheiten bei Strom- und Spannungsmessungen

Nachdem das Messintervall bzw. das Auswertungsintervall definiert wurde, kann nun genauer betrachtet werden wie groß die Fehler der einzelnen Messungen sind.

Die Spannungsmessung erfolgte mit Hilfe eines HP 34420A Nanovoltmeter, dessen Messgenauigkeit ergibt sich laut Handbuch bei Temperaturen von $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ für den verwendeten Messbereich zu

$$u_{U,Nanovoltmeter} = U_{ablese} \cdot 50 \cdot 10^{-6} + 20 \text{ nV}$$

Zur Abschätzung von U_{ablese} können wieder die Messdaten bei 50 A herangezogen werden. Danach liegt die Spannung bei 50 A im Mittel bei $1,53 \pm 1,22 \mu\text{V}$. Der Anteil der Ablesegenauigkeit liegt also im Bereich von hundert Pikovolt. Diese können jedoch gegenüber dem konstanten Anteil von 20 nV vernachlässigt werden.

Die Strommessung erfolgte indirekt über die Messung einer Spannung an einem $0,1 \text{ m}\Omega$ großen Widerstand mit Hilfe eines NI 6229 A/D-Wandlers. Für den eingesetzten Messbereich ergibt sich dessen Messgenauigkeit für einen Temperaturbereich von $25 \pm 10^\circ\text{C}$ zu

$$u_{U,\text{AD-Wandler}} = U_{\text{ablese}} \cdot 135 \cdot 10^{-6} + 31,2 \mu\text{V} + 3,6 \mu\text{V}$$

Die abgelesene Spannung U_{ablese} am Widerstand bewegt sich für einen Strom $< 55 \text{ A}$ im Millivoltbereich, daher kann dieser spannungsabhängige Anteil ebenfalls vernachlässigt werden.

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes soll für $25 \pm 10^\circ\text{C}$ berücksichtigt werden. Der linearisierte Temperaturkoeffizient für diesen Bereich beträgt für Kupfer $0,003862 \text{ K}^{-1}$ [45]. Dadurch ergibt sich die Unsicherheit für den Kupferwiderstand zu

$$u_R = 0,1 \mu\Omega \cdot 10 \text{ K} \cdot 0,003862 \text{ K}^{-1} = 0,003862 \mu\Omega$$

Über die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung können nun die Unsicherheiten u_R und $u_{U,\text{AD-Wandler}}$ zur Gesamtunsicherheit der Strommessung u_I zusammengeführt werden

$$I = \frac{U}{R}$$

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial U}\right)^2 u_{U,\text{AD-Wandler}}^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R}\right)^2 u_R^2}$$

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 u_{U,\text{AD-Wandler}}^2 + \left(\frac{U(I = 50 \text{ A})}{R^2}\right)^2 u_R^2}$$

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{1}{0,1 \text{ m}\Omega}\right)^2 (34,8 \mu\text{V})^2 + \left(\frac{1,53 \mu\text{V}}{(0,1 \text{ m}\Omega)^2}\right)^2 (0,003862 \mu\Omega)^2}$$

$$u_I = 0,348 \text{ A}$$

Zusammengefasst betragen die Messunsicherheiten also

$$u_U = \pm 20 \text{ nV} \text{ und } u_I = \pm 0,348 \text{ A}$$

Die Temperatur ist natürlich nicht die einzige Größe die zur Messunsicherheit beiträgt. So können zweifellos Luftdruckschwankungen zu Änderungen der Stickstoff Siedetemperatur führen. Oder der Widerstand des Shunts kann sich zwischen den Eichmessungen durch Korrosion ändern. Daher ist es wichtig entsprechende Überlegungen zu Messunsicherheiten im experimentellen Aufbau anzustellen. Es zeigt sich jedoch schon am Beispiel der Fehlerfortpflanzung für die Strommessunsicherheit, dass im Idealfall diese Beiträge vernachlässigbar klein sind.

Ausgleichsrechnung

Um die Auswertung transparent zu gestalten soll im Folgenden erläutert werden wie die Ergebnisse der (Teil)-Auswertungen mit ihren zugehörigen Unsicherheiten miteinander verknüpft wurden.

In [54, S. 6-1] werden dafür zwei Situationen unterschieden

1. Wenn sich eine Größe aus einem funktionalen Zusammenhang ergibt, also nicht direkt gemessen wird (s. Gl. 4.2)
2. Wenn eine Größe aus bereits fehlerbehafteten Messreihen bestimmt werden soll

Der erste Fall angewendet auf die vorliegenden Messdaten im entsprechenden Messintervall ist die lineare Regression. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten kann mit Hilfe der linearen Regression der wahrscheinlichste Wert für den Übergangswiderstand mit einer gewissen Unsicherheit berechnet werden. Da es sich bei der linearen Regression um eine Standardmethode handelt, sei sie an dieser Stelle nicht weiter diskutiert. Details können in [54–56] nachgeschlagen werden.

Da jede Probe zweifach gemessen wurde existieren zwei leicht unterschiedliche Werte für jeweils Übergangswiderstand und Unsicherheit. Für Messungen an gleichen Proben könnte noch argumentiert werden, dass eine Regression über die Messdaten aller Messungen durchgeführt werden könnte. Diese Herangehensweise wird jedoch spätestens dann problematisch, wenn die Übergangswiderstände inklusive Unsicherheiten verschiedener Proben miteinander verknüpft werden müssen

Nach [54, S. 6-3ff.] kann bei dieser Problematik ein gewichteter Mittelwert eingesetzt werden. Dieser berechnet sich über

$$\bar{x} = \frac{\sum p_i x_i}{\sum p_i} \quad ; \text{ mit } p_i = \frac{c_i}{s_i^2} \quad (4.3)$$

mit x_i als Messpunkte, s_i den Standardabweichungen und c_i einem weiterem Gewichtungsfaktor. Da die Gewichtung nur anhand der Standardabweichung erfolgen soll wird c_i gleich eins gesetzt. Die dazugehörige Standardabweichung berechnet sich über

$$\max \left(s_{int}^2 = \frac{1}{\sum p_i}, s_{ext}^2 = \frac{\sum p_i (x_i - \bar{x})^2}{(N-1) \cdot \sum p_i} \right) \quad (4.4)$$

mit N als Größe der Stichprobe.

Behandlung von Ausreißern

Bei der Auswertung von Messreihen können Einzelwerte, die von den übrigen Einzelwerten stark abweichen, d.h. ausreißerverdächtige Einzelwerte, das Ergebnis verfälschen; sie sind deshalb vorab besonders zu betrachten [S. 10, DIN 53804-1].

Bevor die Messwerte der Proben der entsprechende Lote gemittelt wurden, wurde jedoch eine Ausreißerprüfung durchgeführt. Diese ist im Folgenden für die InBi Messreihe exemplarisch wiedergegeben.

Nach DIN 53804-1 wird, für Messreihen mit weniger als 30 Proben, die Ausreißerprüfung nach Dixon empfohlen. Dazu werden zunächst die Einzelwerte aufsteigend geordnet. Bei 10 Messpunkten gilt dann ein Messpunkt als Ausreißer, wenn

$$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$$

größer ist als 0,477 bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ bzw. 0,597 bei $\alpha = 0,01$. Für die InBi Messreihe ergibt sich

$$\frac{139,16 - 65,96}{139,16 - 22,29} = 0,626$$

Damit muss die Probe mit dem höchsten Übergangswiderstand nicht bei der Berechnung des Mittelwertes der Messreihe berücksichtigt werden.

Unsicherheit des spez. Übergangswiderstandes

Für die Berechnung des spezifischen Übergangswiderstands ist die Bestimmung der Überlappfläche erforderlich. Diese wurden wie in Abschnitt 4.4 beschrieben durchgeführt. Für Messschieber wird üblicherweise ein Fehler angenommen, der der Hälfte des kleinsten Skalenabschnitts entspricht. Für den verwendeten Messschiebers würde dies 0,025 mm entsprechen. Auf Grund von Lotrückständen im Messbereich wurde jedoch von einer Messunsicherheit von 0,1 mm ausgegangen. Sowohl für die Längen- als auch für die Breitenmessung.

Für die Berechnung der Unsicherheit des spezifischen Übergangswiderstands ist die Fehlerfortpflanzung zu berücksichtigen. Der spezifische Übergangswiderstand berechnet sich zu

$$R_s = R \cdot A = R \left(La - \frac{L(B-a)}{2} \right) \quad (4.5)$$

mit R als Übergangswiderstand, L der Überlapplänge, a der Breite der REBCO-Bänder und B der Breite des Übergangs wie er in Abb. 4.8 definiert ist. Nach [57, S. 54] ergibt sich der Gesamtfehler des spezifischen Übergangswiderstandes u_{R_s} zu

$$u_{R_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_s}{\partial R_j}\right)^2 u_R^2 + \left(\frac{\partial R_s}{\partial L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial R_s}{\partial B}\right)^2 u_B^2} \quad (4.6)$$

mit Gl. (4.5) ist die Gesamtmessunsicherheit für den spezifischen Widerstand

$$u_{R_s} = \sqrt{\left(La - \frac{L(B-a)}{2}\right)^2 u_R^2 + \left(\frac{3}{2}Ra - \frac{1}{2}RB\right)^2 u_L^2 + \left(-\frac{1}{2}RL\right)^2 u_B^2} \quad (4.7)$$

Als Beispiel betrachten wir die Probe 5/6. Die gemessene Länge beträgt 100,6 mm, die Breite 4,1 mm, der Widerstand 49,718 nΩ mit einer Standardabweichung von 0,421 nΩ. Damit ergibt sich

$$\begin{aligned} u_{5/6} = & \left(\left(100,6 \cdot 4 - \frac{100,6(4,1-4)}{2} \right)^2 0,421^2 \right. \\ & + \left(\frac{3}{2}49,718 \cdot 4 - \frac{1}{2}49,718 \cdot 4,1 \right)^2 0,1^2 \\ & \left. + \left(\frac{1}{2}49,718 \cdot 100,6 \right)^2 0,1^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ n}\Omega \text{ mm}^2 \quad (4.8) \end{aligned}$$

$$u_{5/6} = 307,04 \text{ n}\Omega \text{ mm}^2 = 3,07 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2 \quad (4.9)$$

4.6. Ergebnisse und Diskussion

4.6.1. Ergebnisse unterschiedlicher Lote

In den Abbildungen 4.10 sind die Messergebnisse der Lote abgebildet; man beachte die variierenden Skalierungen der Ordinatenachsen. Auf den Abzissen sind die Probennummern aufgetragen. Aus den Abbildungen ist zu entnehmen, dass von den 30 Proben drei als Ausreißer zu bewerten sind. Zwei sind dabei eindeutig als solche in der PbSn Messreihe zu identifizieren, ein Weiterer kann über eine Ausreißerprüfung nach Dixon in der InBi Messreihe bestimmt werden.

Alle Diagramme enthalten den Messfehler der Messpunkte; allerdings sind sie teilweise so klein, dass sie die Symbolgröße nicht übersteigen. Daraus lässt sich ableiten, dass der Auswertungsintervall bis 50 A und eine Stromanstiegsrate von 1 A s^{-1} für eine sehr präzise Auswertung ausreichend ist.

Im Widerstandsdiagramm des PbSn Lotes ist der vom REBCO-Band Hersteller für diese Kontaktconfiguration angegebene Referenzwert von $20 \text{ n}\Omega$ eingezeichnet. Unter Vernachlässigung der Ausreißer liegen alle Messpunkte unterhalb des Referenzwertes.

Durch die Multiplikation des Übergangswiderstandes mit der Kontaktfläche erhält man die spezifischen Widerstände. Diese zeigen wie erwartet einen größeren Fehler auf Grund der Fehlerfortpflanzung. Durch die Berücksichtigung der Kontaktfläche kommt es ebenfalls dazu das sich Messpunkte relativ zu den Übrigen leicht verbessern, bspw. Probe 7/8 oder 49/50.

Einen besseren Vergleich der unterschiedlichen Lote erlaubt Abbildung 4.11 und Tabelle 4.6. Die Abbildung zeigt die spezifischen Übergangswiderstände unter Vernachlässigung der Ausreißer im Vergleich. In der Tabelle sind die Mittelwerte \bar{x} und Standardabweichungen s der abgebildeten Messreihen angegeben. Im Anhang sind die entsprechenden Werte für eine nicht gewichtete Auswertung einzusehen (s. A.1).

Aus der Abbildung 4.11 ist offensichtlich, dass die Proben des InBi Lotes eine deutlich größere Streuung aufweisen als die der anderen Lote. Allerdings sind die Messfehler bei den höheren Widerständen größer, weshalb sie bei Berechnung des Mittelwertes geringer gewichtet sind. Dies spiegelt sich entsprechend in der Standardabweichung der Messreihe wieder (s. Tab. 4.6).

Im Vergleich zu den beiden anderen Loten ist InBi der am wenigsten geeignete Kandidat für Untersuchungen an RACC. Der verhältnismäßig hohe Widerstand ist auf Grund des hohen intrinsischen Materialwiderstands (s. Tab. 3.5) zu erwarten gewesen, die große Streuung und die damit einhergehende schlechte Reproduzierbarkeit bilden das eigentliche Problem.

4. Versuche mit REBCO-Bänder

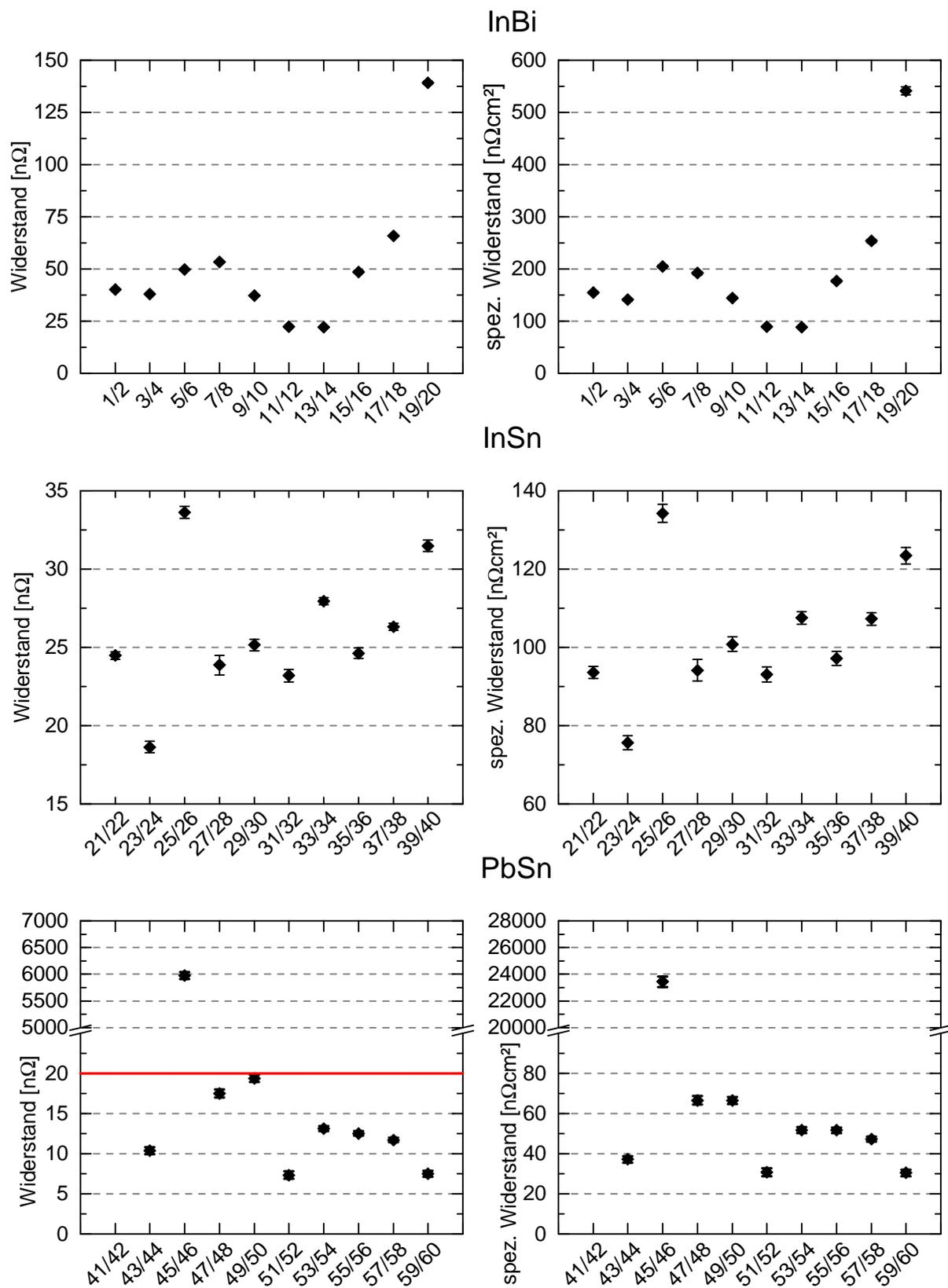


Abbildung 4.10.: Messergebnisse der REBCO-Bänder: Von oben nach unten InBi, InSn, PbSn; links Widerstand, rechts spez. Widerstand

Tabelle 4.6.: Statistische Auswertung der REBCO-Bänder Versuche

Lote	Übergangswiderstand		spez. Übergangswiderstand	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
	n Ω	n Ω	n Ω cm ²	n Ω cm ²
InBi	38,40	5,18	134,19	16,96
InSn	26,18	1,14	101,41	4,85
PbSn	12,15	1,29	47,13	4,49

Vergleicht man die Mittelwerte der Übergangswiderstände (s. Tab. 4.6) so kann festgestellt werden, dass sich die spez. Übergangswiderstände deutlich voneinander abgrenzen mit PbSn als bestes Kontaktlot.

Diese deutliche Abstufung deutet an, dass der Materialwiderstand der Lote noch signifikante Anteile zu haben scheint. Eine Optimierung des Verzinnens könnte also ein Ansatz sein um die Übergangswiderstände zu reduzieren. Nach den Ergebnissen von [34] scheint der Einsatz von Bandloten ein vielversprechender Ansatz um die Lotschicht Dicke zu reduzieren und damit den intrinsischen Anteil (vgl. Tab. 3.4) auf ein vernachlässigbares Niveau zu bringen.

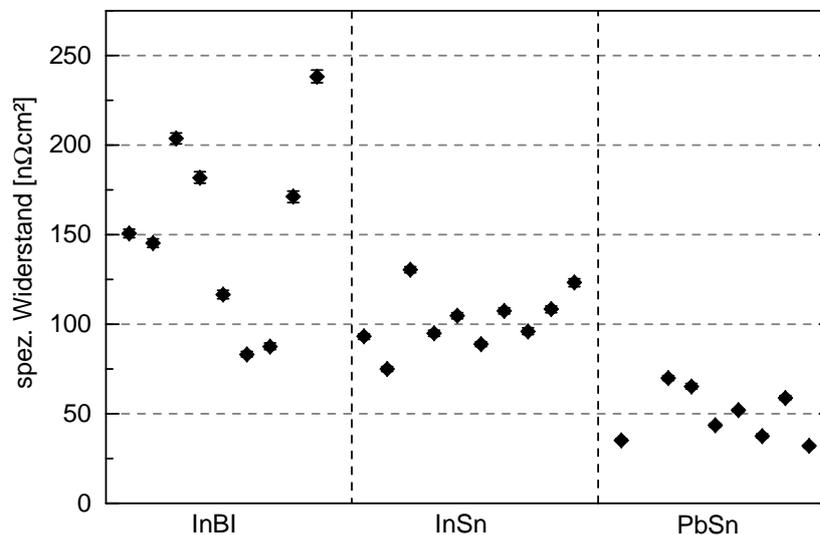


Abbildung 4.11.: Vergleich spez. Übergangswiderstände unterschiedlicher Lote

Erfolgt die Auswahl der Lote für die Stromeinkopplung in RACC ausschließlich an Hand der Ergebnisse der Übergangswiderstände, so ist PbSn die offensichtlich beste Wahl. Es erzielt die geringsten Übergangswiderstände mit der kleinsten Streuung. Jedoch ist es auf

Grund seiner hohen Schmelztemperatur nicht für den Einsatz an AMSC REBCO-Bändern geeignet. Zudem ist Blei ein Schwermetall und erfordert bei der Handhabung und Lagerung besondere Maßnahmen. Auf Grund der Toxizität suchen auch die Lothersteller vermehrt nach Alternativen zu Blei.

Da InSn eine Lösung der beschriebenen Probleme von Blei bietet und die Streuung der beiden Lote praktisch identisch ist, erscheint es sinnvoll neben PbSn auch InSn für die Stromeinkopplung in RACC zu untersuchen.

4.6.2. Vergleich unterschiedlicher Produktionschargen

Wie bereits in Abschnitt 3.5 erwähnt wurden zwei unterschiedliche Produktionschargen von Supraleitern untersucht. Da der Probenumfang klein war wurde, auf Grund der Ausreißer von PbSn, InSn als Lot für die Untersuchungen verwendet.

Im direkten Vergleich der Produktionschargen (s. Abb. 4.12) ist ersichtlich, dass die zweite Produktionscharge (M3-1072-3) einen leicht höheren Übergangswiderstand aufweist bei sehr ähnlichen Standardabweichungen (s. Tab. 4.7). Der geringe Unterschied der Standardabweichungen deutet an, dass der Lötprozess für beide Versuchsreihen vergleichbar ist. Daraus kann man ableiten, dass der leichte Anstieg des Übergangswiderstandes auf unterschiedliche Kontaktwiderstände der REBCO/Silber- und der Silber/Stabilisator-Grenzflächen zurückzuführen ist.

Tabelle 4.7.: Vergleich der statistischen Kenngrößen beider Produktionschargen

Lote	Übergangswiderstand		spez. Übergangswiderstand	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
	nΩ	nΩ	nΩ cm ²	nΩ cm ²
M4-69-4	26,18	1,14	101,41	4,85
M3-1072-3	31,36	1,45	122,76	6,15

Damit können die Beobachtungen aus [36] bestätigt werden. Auf Grund dieser Problematik erscheint es sinnvoll in zukünftigen Arbeiten weitere Produktionschargen zu untersuchen. Da die untersuchten Produktionschargen bereits 1 bzw. 2 Jahre alt waren, sind aktuellere Produktionschargen von besonderem Interesse.

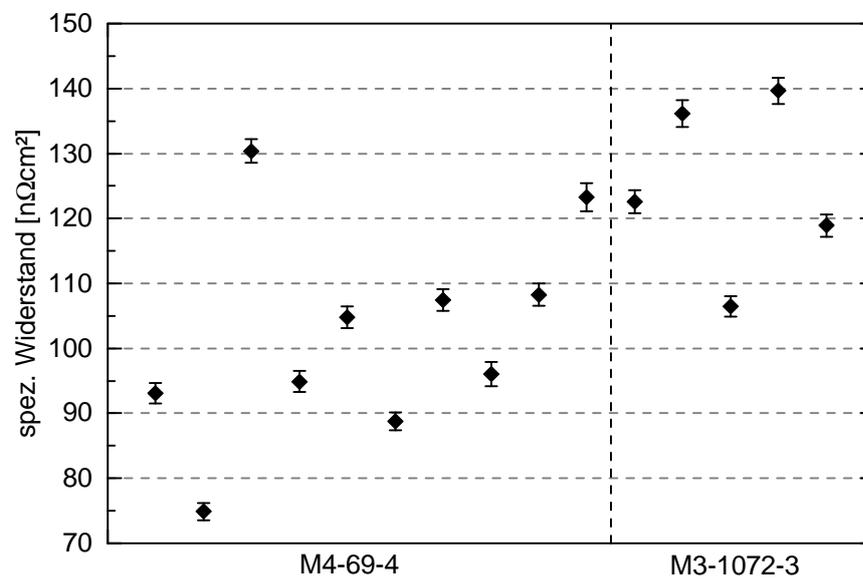


Abbildung 4.12.: Vergleich der spez. Übergangswiderstände zweier unterschiedlicher Produktionschargen von SPI REBCO-Bändern mit InSn Kontakten

5. Stromeinkopplung in RACC

Im vorherigen Kapitel wurden die Übergangswiderstände zwischen zwei REBCO-Bändern bei 3 unterschiedlichen Lote bestimmt. Es stellte sich heraus, dass zwei dieser Lote vielversprechende Kandidaten für die Stromeinkopplung in RACC sind. Im Folgenden soll erläutert werden wie Lötkontakte zwischen RACC und dem Einkoppelterminal ausgeführt wurden und welche Ergebnisse bei den beiden Lote erzielt wurden. Der Übergang von Band zu Band Kontakten zu Band zu Terminal Kontakten ist in dem Sinne unproblematisch, da es sich in beiden Fällen um Kupferoberflächen handelt, die miteinander verbunden werden.

5.1. Kabelherstellung

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erläutert, werden für Roebel Kabel REBCO-Bänder in eine meanderförmige Struktur gestanzt und anschließend verwoben. Das Stanzen wurde automatisiert mit der in Abbildung 5.1 abgebildeten pneumatischen Stanze durchgeführt. Insgesamt wurden pro Kabel 10 Bänder gestanzt und mit einander verwoben. Die Transpositions-länge betrug 115,72 mm

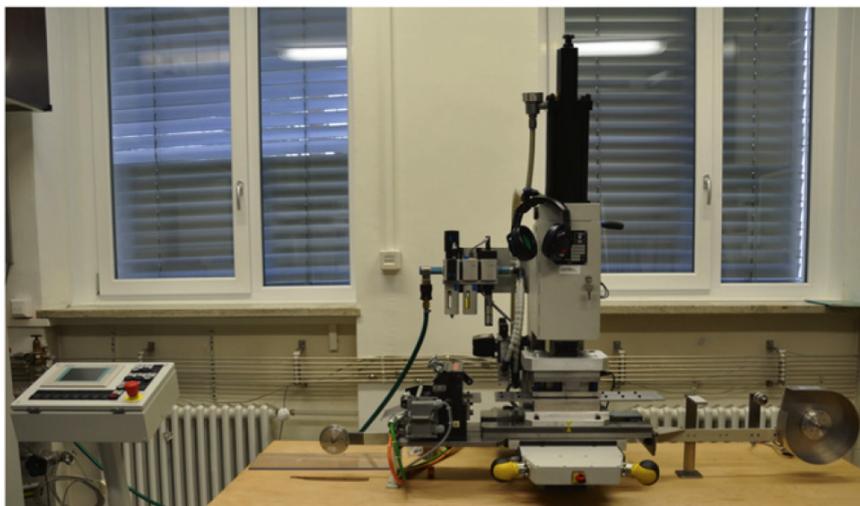


Abbildung 5.1.: Pneumatische Stanze zur Herstellung von RACC [19]

5.2. Lötverfahren und Widerstandsmessung

PbSn Lötverfahren

Das Löten mit PbSn verlief wie folgt:

1. Erwärmen der Kupferterminals auf einer PZ-44 Heizplatte; Nenntemperatur 215 °C.
2. Auffüllen der Endstücke mit Lot.
3. Auftragen von Spirflux 330 auf das Roebelkabel.
4. Einbetten des Roebelkabels in das mit Lot gefüllte Terminal.
5. Aufbringen von zusätzlichem Flussmittel in Bereichen des Kabels in denen zunächst keine Vollständig Benetzung erreicht wurde.
6. Schließen des Kupferterminals und leichte Kompression um überflüssiges Lot zu verdrängen.
7. Entfernen des Terminals von der Heizplatte.

Zur abschließenden Komprimierung der Terminals wurden die bereits in Abschnitt 4.3 verwendeten Anlagen eingesetzt. Um eine Degradation des Kabels auf Grund zu hohen Druckes zu vermeiden wurde eine Kraft von 500 N angestrebt. Gemittelt über die Fläche des Roebelkabels ergibt sich daraus ein Druck von 1,05 MPa

Dieses Verfahren führte jedoch zu keiner erfolgreichen Stromeinkopplung in das RACC. Die Ergebnisse zeigten eine vollständige Degradation des Kabels. Als mögliche Ursachen wurden folgende Untersuchungen angestellt.

Als erstes wurde untersucht ob die Löttemperatur in Kombination mit einer langen Löttdauer für die Degradation verantwortlich sein kann. Dafür wurden REBCO-Bänder auf einer Heizplatte auf 250 °C über verschiedene Zeiträume erhitzt. Nach 30 min war der kritische Strom eines Bandes um etwa 20 % degradiert.

Der zweite Untersuchungsgegenstand war die gewählte Kraft beim Komprimieren der Terminals. Dafür wurde das baugleiche mit InSn gelötete Kabel mit Druck belastet und die kritischen Ströme der einzelnen Bänder gemessen. Im Bereich bis 1 kN nahm der kritische Strom um etwa 10 % ab. Bei einer Kraft von 9 kN betrug die Degradation ungefähr 50 %

Abschließend wurde noch untersucht ob das Flussmittel zu Degradation eines gestanzten REBCO-Bandes führt. Dafür wurden die gestanzten Bänder in Flussmittel eingelegt. Nach einer Stunde im Flussmittelbad betrug die Degradation des Bandes ungefähr 7 %

Damit lässt sich festhalten, dass für sich allein genommen keiner der drei Faktoren eine vollständige Degradation des Kabels erklären kann. Möglicherweise führte die Kombination

der drei untersuchten und weitere unbekanntes Faktoren zum Versagen.

InSn Lötverfahren

Der Prozess für InSn verlief nach dem Schema

1. Erwärmen der Kupferterminals auf einer PZ-44 Heizplatte; Nenntemperatur 150 °C
2. Auffüllen der Endstücke mit Lot
3. Aufragen des Flussmittels auf das Roebelkabel
4. Verzinnen des Kabels in einem InSn Bad auf der Heizplatte
5. Einbetten des Roebelkabels in das mit Lot gefüllte Terminal
6. Schließen des Kupferterminals und Komprimierung über ein 5,3 kg Gewicht
7. Entfernen des Terminals von der Heizplatte

Anders als beim PbSn wurde ein Kolophonium basiertes Flussmittel eingesetzt. Ebenfalls wurde auf eine abschließende Komprimierung der Terminals verzichtet.

Messung des kritischen Stroms

Um zu überprüfen ob der Strom homogen über die einzelnen Bänder des Roebelkabels verteilt ist, wurden die Spannungs-Strom-Kurven jedes Einzelbandes ermittelt. Die dafür notwendigen Spannungsabnehmer wurden an den Enden der Kabel aufgelötet. Für Spannungsmessung wurde ein Keithley 2182A Nanovoltmeter eingesetzt. Die Spannungsmessung der unterschiedlichen Bänder erfolgte mit Hilfe eines Agilent 34970A Multiplexer bei konstanten Strom.

Die Spannung wurde jeweils für alle Bänder in 5 A Schritten erfasst. Als Gleichstromquelle fungierte ein NTS 2000M-10 Netzteil.

5.3. Versuchsauswertung und Fehlerabschätzung

Als Maß für eine homogene Verteilung des Stroms im Roebelkabel können die kritischen Ströme der einzelnen Bänder betrachtet werden. Um diese zu bestimmen werden die Spannungskurven der Bänder bestimmt. In einem ersten Schritt werden die linearen Anteile der Spannung herausgerechnet, diese können nach dem Schema welches in Abschnitt 4.5 bestimmt werden, so dass sich der Verlauf durch

$$U = U_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (5.1)$$

beschreiben lässt. Um Diagramme unterschiedlicher Veröffentlichungen besser miteinander vergleichbar zu machen, wird diese Gleichung mit dem Abstand der Spannungsabnehmer normiert, in diesem Fall 40 cm. Es ergibt sich das elektrische Feld

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (5.2)$$

Es hat sich etabliert für REBCO das $1 \mu\Omega \text{ cm}^{-1}$ Kriterium für die Bestimmung des kritischen Stroms einzusetzen [4, S. 10]. Dadurch lässt sich aus den Kurvenverläufen des elektrischen Feldes direkt der kritische Strom ablesen

Für die Bestimmung des Exponenten werden die Kurvenverläufe des elektrischen Feldes in einer doppelt logarithmischen Achsenauftragung abgebildet und eine lineare Regression der Messpunkte auf dem Intervall E_c bis $10 \cdot E_c$ durchgeführt [4, S. 10]. Die Steigung der Regressionsgeraden entspricht dem Exponenten n .

Für die Messgenauigkeit des Netzteils gibt der Hersteller $\pm 0,5\%$ des Nennwertes an.

Für die Messgenauigkeit der Spannungsmessung muss anders als in Abschnitt 4.5 der Spannungsbereich berücksichtigt werden.

$$u_{\text{Nanovoltmeter}} = \begin{cases} 40 \text{ nV}, & \text{für } V \leq 10 \mu\text{V} \\ 500 \text{ nV}, & \text{für } 10 \mu\text{V} < V \leq 100 \mu\text{V} \end{cases} \quad (5.3)$$

5.4. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 5.2 zeigt die Verläufe der elektrischen Felder der einzelnen Bändern im Kabel¹. Zunächst lässt sich feststellen, dass die Verläufe kaum voneinander zu unterscheiden sind. Daraus lässt sich bereits schließen, dass der Strom sehr homogen über alle Bänder verteilt ist.

Tabelle 5.1.: Ergebnisse der RACC Spannungsmessung

	kritische Strom	Exponent n
	A	–
Mittelwert	458,7	12,97
Standardabweichung	2,17	0,3
Messunsicherheit	2,29	–

¹Band 7 unterlag einer Messstörung und ist nicht abgebildet.

Als quantitative Größe können die kritischen Ströme der einzelnen Bändern mit dem $1 \mu\text{V cm}^{-1}$ -Kriterium bestimmt werden. Betrachtet man nun den Mittelwert, die Standardabweichung und die Messunsicherheit beim mittleren kritischem Strom (s. Tab. 5.1) so ist ersichtlich, dass die Standardabweichung im Bereich der Messunsicherheit liegt. Mit anderen Worten: Die Stromverteilung über die einzelnen Bändern ist so homogen, dass ihre Abweichungen mit dem gegebenen Messaufbau nicht aufgelöst werden können. Es ist eine perfekte Stromeinkopplung in das RACC gelungen.

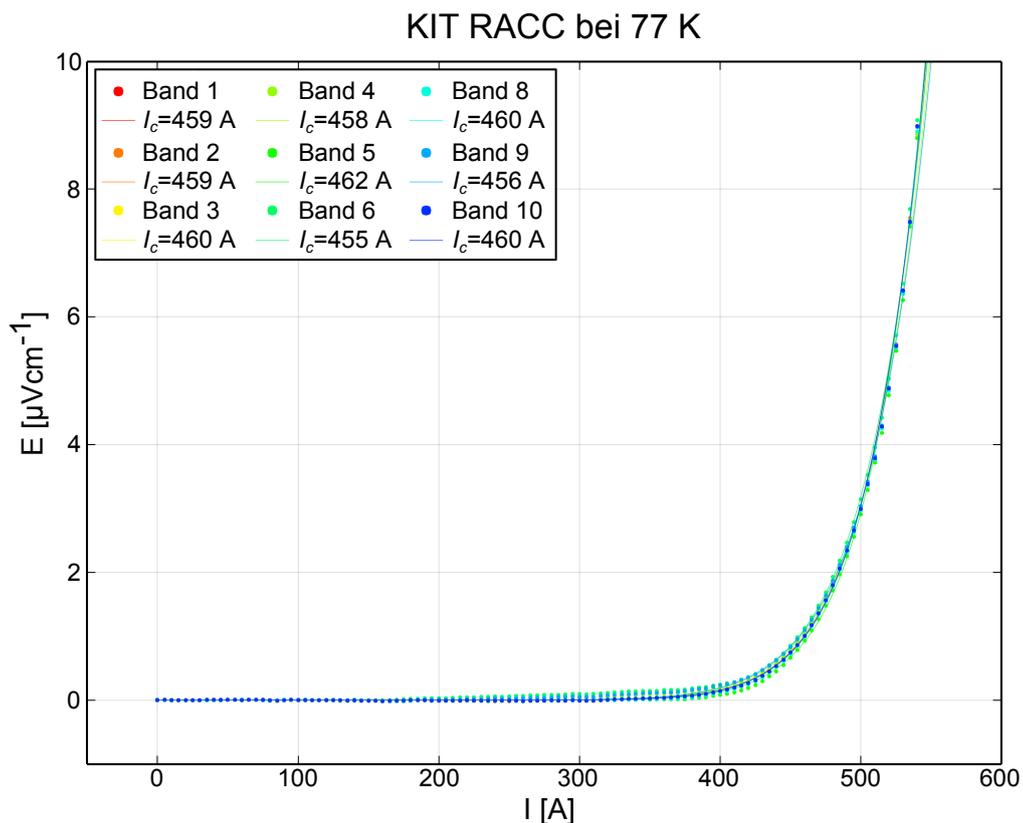


Abbildung 5.2.: Spannungsverläufe von InSn gelöteten Roebelkabel

Mit diesem Ergebnis als Ausgangspunkt, kann in weiteren Arbeiten untersucht werden ob mit dem Verfahren vergleichbare Erfolge auch an den verschiedenen RACC Varianten, mit bspw. mehr Bändern, erzielt werden können.

Das Ergebnis verdeutlicht, rückblickend auf Kapitel 4, dass die erzielten Übergangswiderstände von InSn ausreichend sind um eine ideale Stromeinkopplung zu erreichen. Damit stellt InSn nicht nur eine Alternative zu den bleihaltigen Loten dar sondern bietet auf Grund seiner geringeren Schmelztemperatur einen eindeutigen Vorteil.

6. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war eine Optimierung der Lötprozesse bei der Stromeinkopplung in RACC. Im Zuge dessen wurden die Ergebnisse zahlreicher Veröffentlichungen im Themenbereich des Lötens von *REBCO*-Bändern in einer Datenbank zusammengefasst. Mit Hilfe dieser Datenbank war es möglich die Parameter zu identifizieren, die maßgeblich den Übergangswiderstand einer Lötverbindung bestimmen. Der Übergangswiderstand einer Lötverbindung war in dieser Arbeit von besonderem Interesse, da er entscheidend die Stromeinkopplung in RACC beeinflusst. Interessant war dabei nicht nur der Wert des Übergangswiderstands, sondern auch wie gut sich dieser reproduzieren ließ.

Einen besonderen Einfluss hatte die Produktionscharge der *REBCO*-Bänder auf den Übergangswiderstand. Besonders in dem Sinne, dass der Anwender keine Möglichkeiten hat diesen Parameter zu beeinflussen und es im ungünstigen Fall nicht möglich ist einen geringen Übergangswiderstand zu erzielen. Um zu untersuchen ob dieses Problem auch bei aktuelleren Produktionschargen auftritt sind weitere Arbeiten in diesem Bereich empfehlenswert

Auf Grund dieser Problematik wurde bereits in dieser Arbeit eine weitere Produktionscharge untersucht. Sie zeigt im Mittel einen um $22 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$ höheren Übergangswiderstand.

Nach Identifikation geeigneter Prozessparameter wurden Versuchsreihen mit drei unterschiedlichen Loten durchgeführt: InSn, PbSn und InBi. Das Ziel dieser Versuche war es zum einen Erfahrungen mit den Loten zu sammeln. Zum anderen eine statistisch aussagekräftige Datenbasis zu generieren, die eine Bewertung für die Eignung der Lote bzgl. der Stromeinkopplung in RACC zuließ.

Das Ergebnis der Versuche an *REBCO*-Bändern war, dass es zwei geeignete Lote gibt: InSn und PbSn. Beide zeigten eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Übergangswiderstände. Während PbSn geringere Werte im Übergangswiderstand als InSn erzielt, blieben dennoch Bedenken auf Grund der Toxizität von Blei. Ebenfalls ist der Einsatz von PbSn auf Grund seiner hohen Schmelztemperatur nicht bei allen *REBCO*-Bändern möglich.

Von den zwei untersuchten Verfahren erzielte das InSn Verfahren eine ideal homogene Stromverteilung und kann somit für weitere Untersuchungen an RACC Bändern empfohlen werden.

Literatur

- [1] J. G. Bednorz und K. A. Müller. “Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”. In: *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 64.2 (1986), S. 189–193. ISSN: 0722-3277.
- [2] M. K. Wu u. a. “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure”. In: *Phys. Rev. Lett.* 58.9 (1987), S. 908–910.
- [3] W. Buckel und R. Kleiner. *Supraleitung : Grundlagen und Anwendungen*. 7. Lehrbuch Physik. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. ISBN: 978-3-527-41139-9.
- [4] C. Barth. “High Temperature Superconductor Cable Concepts for Fusion Magnets”. Diss. 2013. ISBN: 978-3-7315-0065-0.
- [5] C. Schacherer. “Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung supraleitender resistiver Strombegrenzer”. Diss. 2009. ISBN: 978-3-86644-412-6.
- [6] T. P. Sheahen. *Introduction to high-temperature superconductivity*. New York: Plenum Press, 1994. ISBN: 0-306-44793-2.
- [7] D. Dimos u. a. “Orientation Dependence of Grain-Boundary Critical Currents in Y-Ba₂-Cu₃-O_{7-δ} Bicrystals”. In: *Phys. Rev. Lett.* 61.2 (1988), S. 219–222. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.61.219>.
- [8] Y. Thimont u. a. “Determination of the critical temperature and oxygen content variations along the c-axis of YBCO epitaxial films”. In: *Journal of Physics Conference Series* 234.1 (2010). URL: http://iopscience.iop.org/1742-6596/234/1/012003/pdf/1742-6596%5C_234%5C_1%5C_012003.pdf.
- [9] R. J. Cava u. a. “Single-phase 60-K bulk superconductor in annealed Ba₂-Y-Cu₃-O_{7-δ} (0.3 < δ < 0.4) with correlated oxygen vacancies in the Cu-O chains”. In: *Phys. Rev. B* 36.10 (1987), S. 5719–5722. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.36.5719>.
- [10] J. E. Diosa, R. A. Vargas und B. Mellander. “Oxygen diffusion in Y_{1-x}Pr_xBa₂Cu₃O_{7-δ} observed by resistivity measurements”. In: *Journal of Physics Condensed Matter* 9.22 (1997), S. 4621–4626. URL: <http://iopscience.iop.org/0953-8984/9/22/014/>.
- [11] Y. Iijima u. a. “In-plane texturing control of Y-Ba-Cu-O thin films on polycrystalline substrates by ion-beam-modified intermediate buffer layers”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 3.1 (1993), S. 1510–1515.

- [12] A. Goyal u. a. “Epitaxial superconductors on rolling-assisted biaxially-textured substrates (RABiTS): a route towards high critical current density wire”. In: *Applied Superconductivity* 4 (1996), S. 403–427. ISSN: 0964-1807.
- [13] M. W. Rupich u. a. “Metalorganic Deposition of YBCO Films for Second-Generation High-Temperature Superconductor Wires”. In: *MRS Bulletin* 29.8 (2004), S. 572–578. ISSN: 1938-1425. URL: http://journals.cambridge.org/article%5C_S0883769400016043.
- [14] U. Schoop u. a. “Second generation HTS wire based on RABiTS substrates and MOD YBCO”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15.2 (2005), S. 2611–2616.
- [15] S. Fleshler u. a. “Scale-up of 2G wire manufacturing at American Superconductor Corporation”. In: *Physica C Superconductivity* 469.15-20 (2009), S. 1316–1321. ISSN: 0921-4534.
- [16] J. R. Groves u. a. “Texture development in IBAD MgO films as a function of deposition thickness and rate”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 11.1 III (2001), S. 2822–2825.
- [17] V. Selvamanickam u. a. “MOCVD-Based YBCO-Coated Conductors”. In: *MRS Bulletin* 29.8 (2004), S. 579–582. ISSN: 1938-1425. URL: http://journals.cambridge.org/article%5C_S0883769400016055.
- [18] D. Hazelton u. a. “High-performance 2G HTS wire for efficient and reliable electricity supply”. In: *Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on*. Sep. 2010, S. 42–46.
- [19] W. Goldacker u. a. “Roebel cables from REBCO coated conductors: A one-century-old concept for the superconductivity of the future”. In: *Superconductor Science and Technology* 27.9 (2014). URL: <http://iopscience.iop.org/0953-2048/27/9/093001/>.
- [20] N. Bagrets u. a. “Investigation of REBCO conductor tape joints for superconducting applications”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* PP.99 (2014), S. 1.
- [21] R. Nast u. a. “(RE)BCO Coated Conductor Joints in Dependence on Uniaxial Pressures”. In: *Physics Procedia* 36 (2012), S. 1614–1619. ISSN: 1875-3892. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212022547>.
- [22] D. K. Park u. a. “Analysis of a Joint Method Between Superconducting YBCO Coated Conductors”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 17.2 (Juni 2007), S. 3266–3269. ISSN: 1051-8223.
- [23] H.-S. Shin u. a. “Bending Strain Characteristics of the Transport Property in Lap-Jointed Coated Conductor Tapes”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 19.3 (Juni 2009), S. 2991–2994. ISSN: 1051-8223.

-
- [24] H.-S. Shin und M. Dedicataria. "Comparison of the Bending Strain Effect on Transport Property in Lap- and Butt-Jointed Coated Conductor Tapes". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 20.3* (Juni 2010), S. 1541–1544. ISSN: 1051-8223.
- [25] H.-S. Shin, M. Dedicataria und S.-S. Oh. "Critical Current Degradation Behavior in Lap-Jointed Coated Conductor Tapes With IBAD Substrate Under Uniaxial Tension". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 20.3* (Juni 2010), S. 1447–1450. ISSN: 1051-8223.
- [26] K. S. Chang u. a. "Joint Characteristics of YBCO Coated Conductor by Removing a Metallic Stabilizer". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 18.2* (Juni 2008), S. 1220–1223. ISSN: 1051-8223.
- [27] C. Baldan u. a. "Electrical and Superconducting Properties in Lap Joints for YBCO Tapes". In: *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 26.5* (2013), S. 2089–2092. ISSN: 1557-1939.
- [28] C. Baldan u. a. "Evaluation of Electrical Properties of Lap Joints for BSCCO and YBCO Tapes". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 19.3* (Juni 2009), S. 2831–2834. ISSN: 1051-8223.
- [29] K. S. Chang u. a. "Experimental Analysis of a Splice Method Between YBCO Coated Conductors on Various Bending Diameters". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 20.3* (Juni 2010), S. 1577–1580. ISSN: 1051-8223.
- [30] K. S. Chang u. a. "An Experimental Study on the Joint Methods Between Double Pancake Coils Using YBCO Coated Conductors". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 21.3* (Juni 2011), S. 3005–3008. ISSN: 1051-8223.
- [31] Y. Zhang u. a. "Solderability study of RABiTS-based {YBCO} coated conductors". In: *Physica C: Superconductivity 471.15–16* (2011), S. 437–443. ISSN: 0921-4534.
- [32] K. S. Chang u. a. "Repetitive Over-Current Characteristics of the Joints Between the YBCO Coated Conductor". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 19.3* (Juni 2009), S. 2419–2422. ISSN: 1051-8223.
- [33] R. C. Duckworth u. a. "Voltage distribution and mechanical strength in splice joints made from as manufactured YBCO coated conductors". In: *AIP Conference Proceedings 1219.1* (2010), S. 370–379.
- [34] R. Tediosi u. a. "Low Temperature and Magnetic Field Performance of Spliced Commercial YBCO CC". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 22.3* (Juni 2012), S. 6600804–6600804. ISSN: 1051-8223.
- [35] J. Lu u. a. "Lap Joint Resistance of YBCO Coated Conductors". In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 21.3* (Juni 2011), S. 3009–3012. ISSN: 1051-8223.

- [36] Y. Kim u. a. “YBCO and Bi2223 Coils for High Field LTS/HTS NMR Magnets: HTS-HTS Joint Resistivity”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 23.3 (Juni 2013), S. 6800704–6800704. ISSN: 1051-8223.
- [37] R. Walsh u. a. “The 77-K Stress and Strain Dependence of the Critical Current of YBCO Coated Conductors and Lap Joints”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 22.1 (Feb. 2012), S. 8400406–8400406. ISSN: 1051-8223.
- [38] Y. Terazaki u. a. “Measurement of the Joint Resistance of Large-Current YBCO Conductors”. In: *Plasma and Fusion Research* 7 (2012), S. 2405027–2405027.
- [39] M. Sugano u. a. “Stress Tolerance and Fracture Mechanism of Solder Joint of YBCO Coated Conductors”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 17.2 (Juni 2007), S. 3067–3070. ISSN: 1051-8223.
- [40] H. S. Kim u. a. “Joint Characteristics of the YBCO Coated Conductor (CC) by Chemical Etching”. In: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 19.3 (Juni 2009), S. 2835–2838. ISSN: 1051-8223.
- [41] K. Isozaki u. a. “Influence of Repeated Tensile Stresses on Current Transfer Characteristics of YBCO Coated Conductors With Solder Joints”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 24.3 (2014). ISSN: 1051-8223.
- [42] A. H. Fritz, Hrsg. *Fertigungstechnik*. 8. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-76695-7.
- [43] E. Vinaricky, Hrsg. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen : Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*. 2. Berlin: Springer, 2002. ISBN: 3-540-42431-8.
- [44] M. Polak, P. N. Barnes und G. A. Levin. “YBCO/Ag boundary resistivity in YBCO tapes with metallic substrates”. In: *Superconductor Science and Technology* 19.8 (2006), S. 817. URL: <http://stacks.iop.org/0953-2048/19/i=8/a=022>.
- [45] R. A. Matula. “Electrical Resistivity of Copper, Gold, Palladium and Silver”. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 8.4 (1979), S. 1147–1298.
- [46] J. Lu, E. S. Choi und H. D. Zhou. “Physical properties of Hastelloy® C-276™ at cryogenic temperatures”. In: *Journal of Applied Physics* 103.6 (2008). URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/103/6/10.1063/1.2899058>.
- [47] H.-P. Krämer und W. Schmidt. “Vorrichtung zur Strombegrenzung vom resistiven Typ mit bandförmigem Hoch- T_c -Supraleiter”. DE102004048648B4 10.08.2006. 2006.
- [48] G. Celentano. “Development and testing of HTS joint techniques - Final Meeting”. 2013.
- [49] N. Bagrets, C. Barth und K.-P. Weiss. “Low Temperature Thermal and Thermo-Mechanical Properties of Soft Solders for Superconducting Applications”. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 24.3 (2013).

-
- [50] I. Corporation. *Solder Alloy Directory*. URL: <http://documents.indium.com/qdynamo/download.php?docid=453>.
- [51] G. Celentano. "Design Assessment Studies WP12-DAS01 Superconducting Magnets Interim report ". 2012.
- [52] D. Uglietti, R. Wesche und P. Bruzzone. "Effect of transverse load on the critical current of a coated conductor Roebel cable". In: *Superconductor Science and Technology* 26.7 (2013), S. 74002. URL: <http://stacks.iop.org/0953-2048/26/i=7/a=074002>.
- [53] JCGM. *Evaluation of Measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Joint Committee for Guides in Metrology. Sep. 2008.
- [54] H. Gränicher. *Messung beendet - was nun? Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und Auswertung von Messungen*. 2. vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH Zürich, 1996. ISBN: 3-519-13659-7.
- [55] D. Meschede. *Gerthsen Physik*. 24. Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-12894-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12894-3>.
- [56] L. Fahrmeir. *Regression : Modelle, Methoden und Anwendungen*. Hrsg. von T. Kneib und S. Lang. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-642-01837-4. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-01837-4>.
- [57] H. Bernstein. *Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-365-80054-9-8. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00549-8>.
- [58] C. Bayer. *Low resistive soldering joints for HTS tapes*. 2013.
- [59] U. Floegel-Delor u. a. "Copper – HTS hybrid conductor architecture". In: *Journal of Physics: Conference Series* 234.2 (2010), S. 022008.

A. Anhang

A.1. Vergleich der gewichteten und ungewichteten statistischen Auswertung der REBCO-Bandversuche

Der Vollständigkeit halber sei die statistische Auswertung auch für ein ungewichtetes Vorgehen angegeben. Die Unterschiede der Mittelwerte \bar{x} sind mit Ausnahme der InBi Messreihe marginal. Die Standardabweichungen s sind jedoch beim gewichteten Vorgehen deutlich kleiner.

Messung	Einheit	Ungewichtet		Gewichtet	
		\bar{x}	s	\bar{x}	s
InBi Widerstand	n Ω	41,96	14,27	38,40	5,18
InBi spez. Widerstand	n Ω cm ²	160,68	53,32	134,19	16,96
InSn Widerstand	n Ω	25,93	4,26	26,18	1,14
InSn spez. Widerstand	n Ω cm ²	102,68	16,61	101,41	4,85
PbSn Widerstand	n Ω	12,42	4,31	12,15	1,29
PbSn spez. Widerstand	n Ω cm ²	47,73	14,32	47,13	4,49
InSn ₂ Widerstand	n Ω	31,76	3,20	31,36	1,45
InSn ₂ spez. Widerstand	n Ω cm ²	124,75	13,47	122,76	6,15

A.2. Frästeilskizzen

Für das Lötten unter Druck wurden zwei Frästeile benötigt. Die Skizzen der entsprechenden Bauteile sind im Folgenden abgebildet.

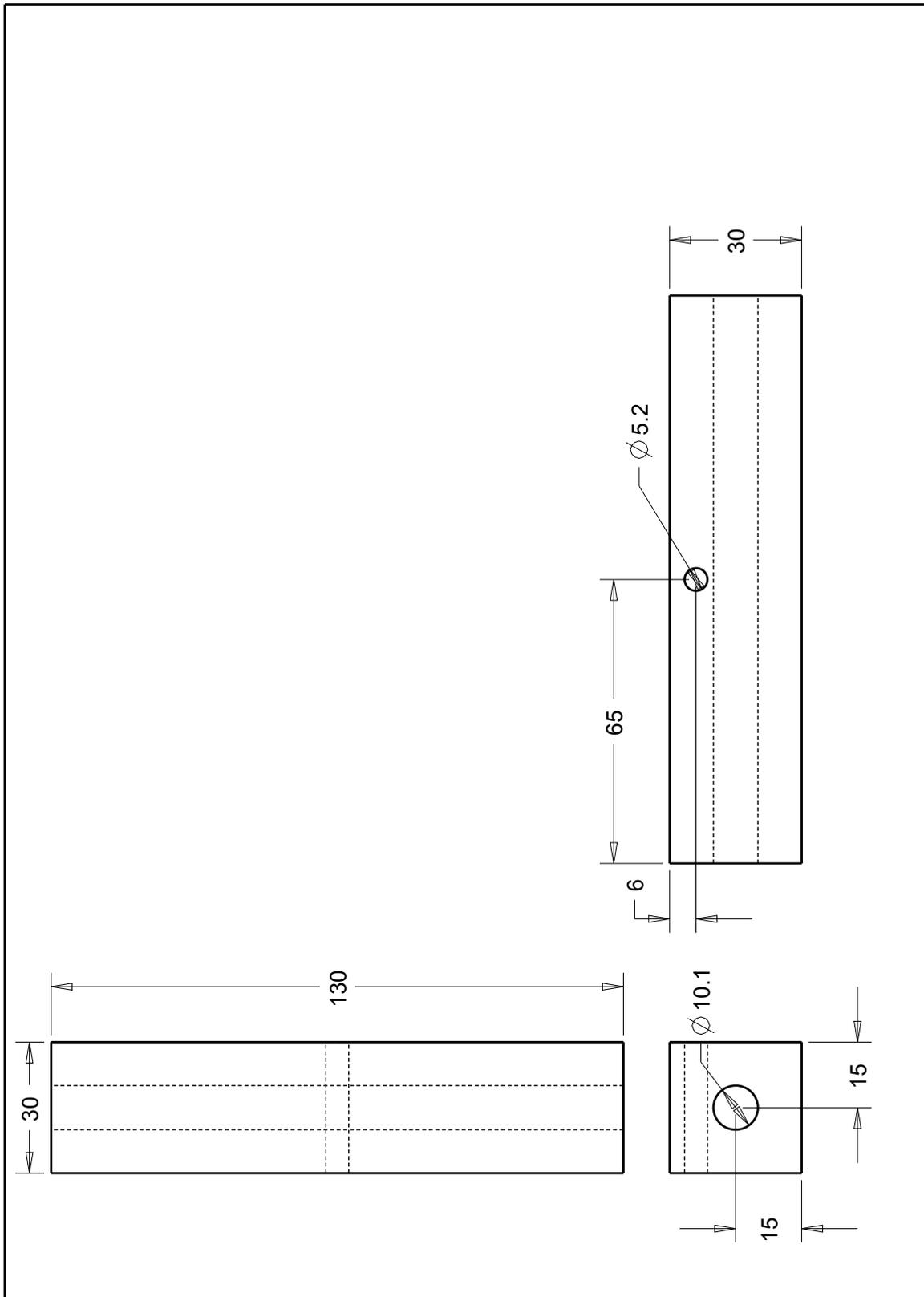


Abbildung A.1.: Skizze des verwendeten Heizblockes

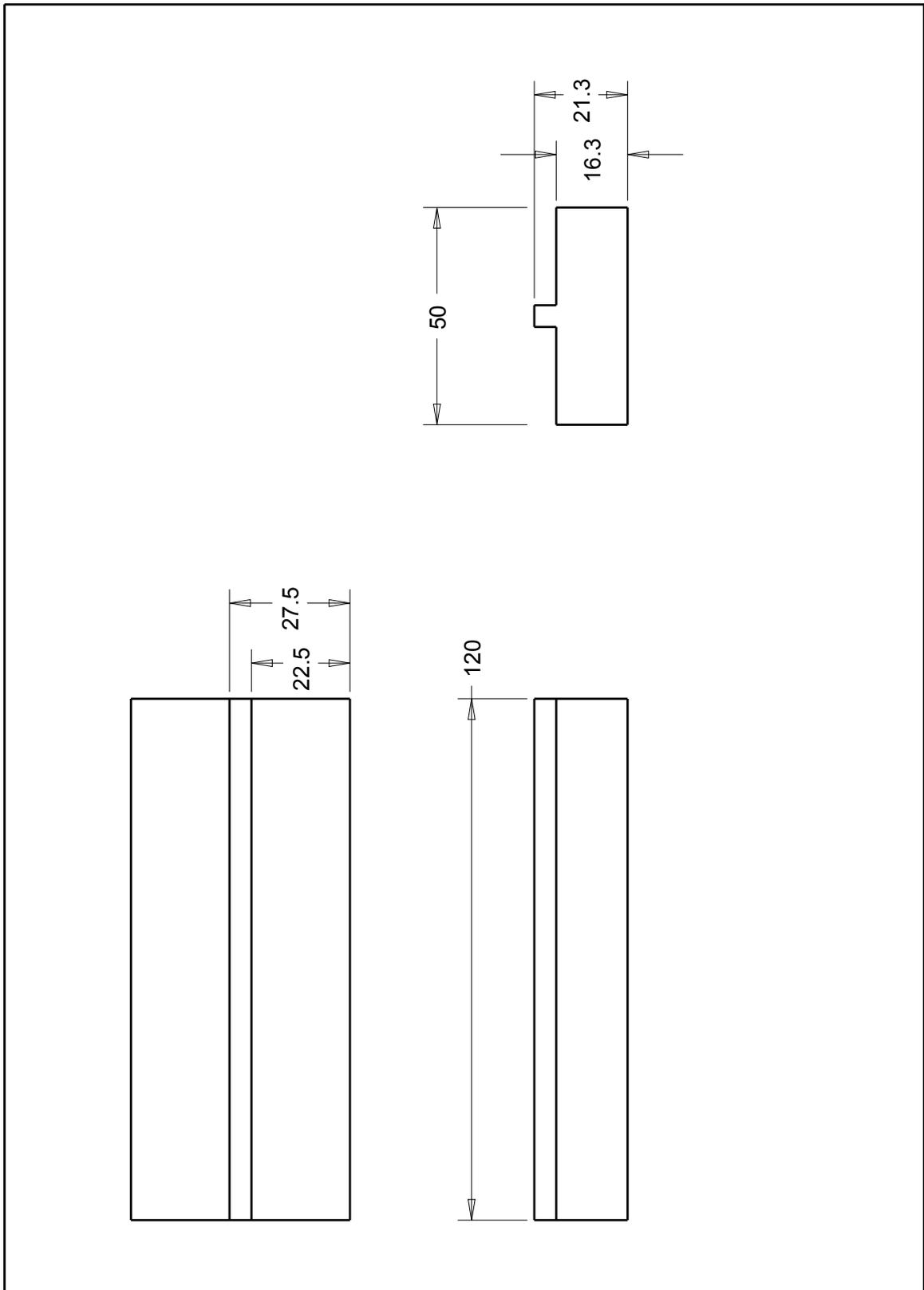


Abbildung A.2.: Skizze des verwendeten T-Stücks

A.3. Verbesserungsvorschläge zum Versuchsaufbau

Aus der Erfahrungen der Lötversuche lassen sich einige Verbesserungen für den Versuchsaufbau ableiten. Ziel war es auf die Kontaktierung der *REBCO*-Bänder verzichten zu können, eine Reduzierung des Kontaktversatzes zu erreichen und trotzdem in der Lage zu sein den Prozess visuell überwachen zu können.

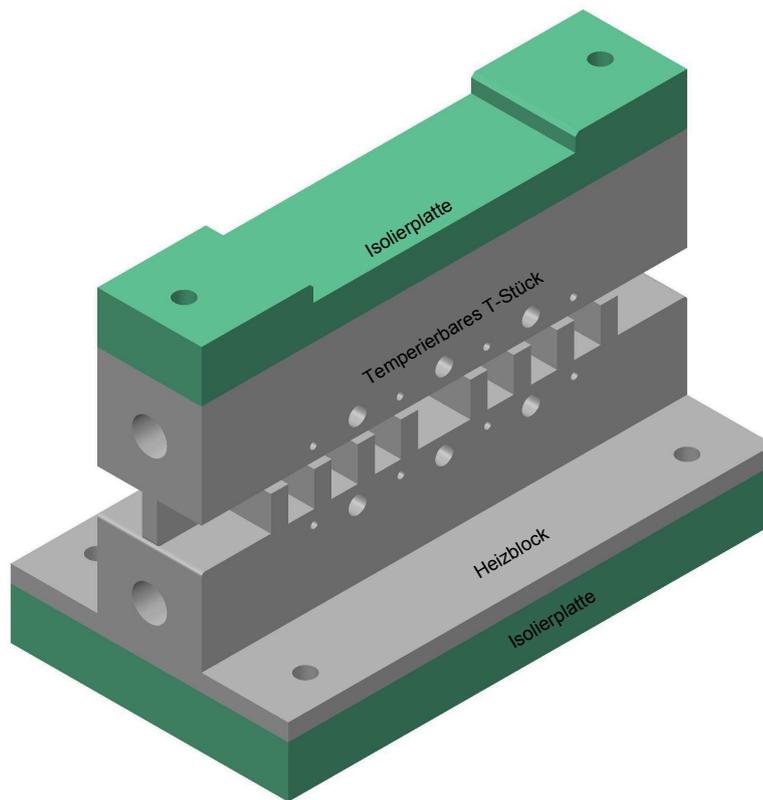


Abbildung A.3.: Vorschlag zur Optimierung des Versuchsaufbaus

Um auf die Kontaktierung verzichten zu können und den Kontaktversatz zu reduzieren ist eine Führung der *REBCO*-Bänder notwendig. Dies wurde in Form der abgebildeten Rippen umgesetzt, diese erlauben es visuell zu überprüfen ob die Schmelztemperatur des Lotes erreicht wurde. Über die Abstände der Rippen voneinander, können verschiedene Kontaktlängen eingestellt werden.

Da für Versuche kurzer Kontaktlängen und geringer Drücke die erforderlichen Kräfte auch über Gewichte aufgebracht werden können wurde der Fuß des Heizblockes verbreitert. Dadurch verleiht er der Baugruppe mehr Stabilität und dient gleichzeitig als Schnittstelle zu unterschiedlich ausgeführten thermischen Isolierplatten.

Ein temperierbares T-Stück wurde in den durchgeführten Versuche nicht benötigt, jedoch kann es für manche Versuchsszenarien sinnvoll sein.

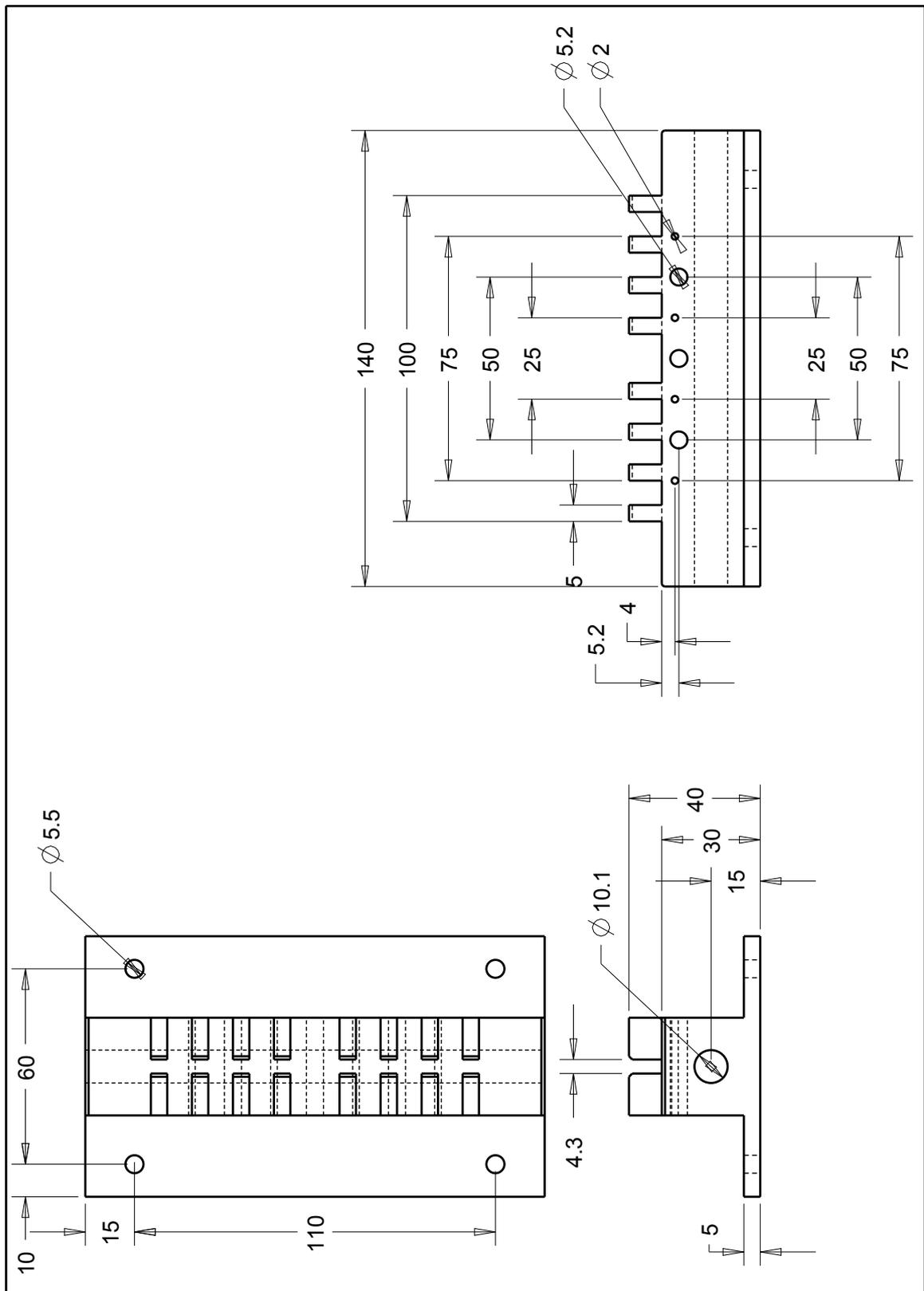


Abbildung A.4.: Vorschlag für optimierten Heizblock

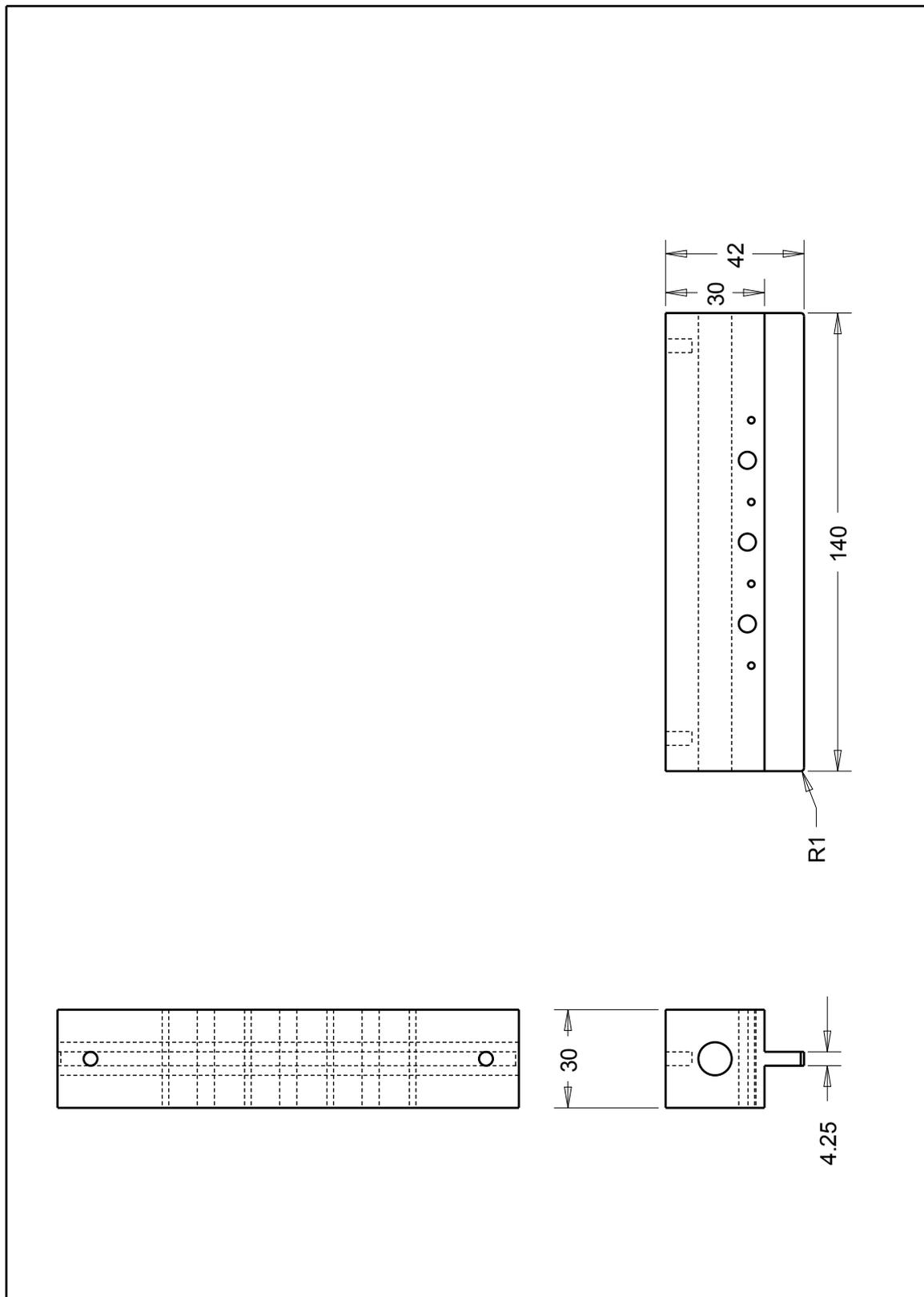


Abbildung A.5.: Vorschlag für optimiertes T-Stück

A.4. Datenbank

In der folgenden Datenbank sind die Ergebnisse einer Vielzahl von Veröffentlichungen mit Bezug auf Lötkontakte zwischen REBCO-Bändern zusammengefasst. Es wurden folgende Abkürzungen verwendet

T_s	Schmelztemperatur
R	Übergangswiderstand
R_s	spezifischer Übergangswiderstand
s	Standardabweichung
n	Stichprobenumfang
L	Kontaktlänge
A	Kontaktfläche
T	Löttemperatur
t	Stabilisator Dicke

A. Anhang

Solder	Compostion	T_g °C	Solder Type	Flux	R nΩ	s nΩ	R_s nΩ cm ²	s nΩ cm ²	n	L mm	A mm ²	Contact Alignment	Heat Source	T °C	Pretinning	Surface Preparation	Pressure MPa	Superconductor	Manufacturer	Stabilizer	t μm	Batch	Source
InBi	66In33Bi	71			0,5		2,16		1	100	432	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron				Applied		AMSC	Copper	40		[23]
InBi					1,6		3,2		1	50	200	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					3		3,6		1	30	120	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi	66In33Bi	71			4,3		3,6		1	20	83,8	Lap, HTS-HTS	Hot Plate			Cleaned	1	YBCO	SuperPower	Copper	20		[25]
InBi					3,1		3,72		1	30	120	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					9,4		3,76		1	10	40	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					4,7		3,76		1	20	80	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					4,7		3,76		1	20	80	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					2,4		3,84		1	40	160	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					2,4		3,84		1	40	160	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					3,2		3,84		1	30	120	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					2		4		1	50	200	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					10		4		1	10	40	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi	66In33Bi	71			3		5,18		1	40	172,8	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron				Applied	AMSC	Copper	40		[23]	
InBi	66In33Bi	71			14		6,05		1	10	43,2	Lap, HTS-HTS	Hot Plate				5	AMSC	Copper	42		[23]	
InBi	66In33Bi	71			14		6,05		1	10	43,2	Lap, HTS-HTS	Hot Plate				10	AMSC	Copper	43		[23]	
InBi					8		6,4		1	20	80	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi	66In33Bi	71			8		6,91		1	20	86,4	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron				Applied	AMSC	Copper	40		[23]	
InBi	66In33Bi	71			2		6,91		1	80	345,6	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron				Applied	AMSC	Copper	40		[23]	
InBi	66In33Bi	71			16		6,91		1	10	43,2	Lap, HTS-HTS	Hot Plate				1	AMSC	Copper	41		[23]	
InBi	66In33Bi	71			3		7,78		1	60	259,2	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron				Applied	AMSC	Copper	40		[23]	
InBi	66In33Bi	71			10,4		8,32		1	20	80	Lap, HTS-HTS	Hot Plate			Cleaned	1	SmBCO	KERI	Copper	20		[25]
InBi	66In33Bi	71			20		8,64		1	10	43,2	Lap, HTS-HTS	Hot Plate				0,1	AMSC	Copper	40		[23]	
SnPb			Paste		4,52		9,04		1	50	200	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	190			Applied	344C	AMSC	x			[26]
InBi					23		9,2		1	10	40	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi	66In33Bi	71			23		9,94		1	10	43,2	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron				Applied	AMSC	Copper	40		[23]	
InBi	66In33Bi	71			5,8		10,07		1	40	173,6	Lap, HTS-Substrate	Soldering Iron				Applied	SuperPower	Copper	20		[23]	
InBi	66In33Bi	71			12,8		11,11		1	20	86,8	Lap, HTS-Substrate	Soldering Iron				Applied	SuperPower	Copper	20		[23]	
InBi					7,3		14,6		1	50	200	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					7,6		15,2		1	50	200	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
SnPb			Paste		7,01		15,25		1	50	217,5	Lap, HTS-HTS	Hot Plate	190			Applied	344C	AMSC	Copper	50		[26]
InBi					9,6		15,36		1	40	160	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					9,7		15,52		1	40	160	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					21,3		17,04		1	20	80	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
SnPb		183			2,3		17,4		1	63	762,3	Lap, HTS-HTS	Heater Block		Yes	As manufactured	Applied	SCS12050	SuperPower	Copper			[27]
InBi					22,3		17,84		1	20	80	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					15,3		18,36		1	30	120	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					15,4		18,48		1	30	120	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					48,2		19,28		1	10	40	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
InBi					49,2		19,68		1	10	40	Bridge, HTS-HTS	Hot Plate	120	Yes	Cleaned with ethyl alcohol	1	SCS4050	SuperPower	Copper			[24]
SnPb	63Sn37Pb	183			16,1		21		1	30	120	Lap, HTS-HTS		200			Applied	AMSC	x				[28]
InSn	48Sn52In	116			17,6		23		1	30	120	Lap, HTS-HTS		150			Applied	AMSC	x				[28]
SnPb		180	Paste		11,95		23,9		1	50	200	Lap, HTS-HTS	Heater Block	200			1,47	SCS4050	SuperPower	Copper	40		[29]
SnPb		180	Paste		10		24		1	60	240	Lap, HTS-HTS	Heater Block	190			166,71	SCS4050	SuperPower	Copper	20		[30]
In	100In	157		Alpha 260HF or Kester 135	26	5	28,6	5,5	6	25	110	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron	165	Yes	Cleaned with ethanol/methanol	Applied	344C	AMSC	Copper	80		[31]
InBi	66In33Bi	71			13		28,6		1	50	220	Lap, HTS-HTS		160				344C	AMSC	Copper	50		[32]
SnPb		180	Paste		14,4		28,8		1	50	200	Lap, HTS-HTS		200			1,47	SCS4050	SuperPower	Copper	40		[29]
SnAg	96,5Sn3,5Ag	221			30	10	30,48	10,16	6	25,4	101,6	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron	226-231	Yes	As manufactured	Applied	SCS4050	SuperPower	Copper	20		[33]
InBi	66In33Bi	71			23,4		30,89		1	30	132	Lap, HTS-HTS		160				344C	AMSC	Copper	50		[32]
SnAg	94SnAg4	221		Spirflux 330	13,77	3,53	32,47	2,75	4	2,03	244	Lap, HTS-HTS		230-240	Yes	Citric acid, purified water, ethanol	10Nm, M8 Screw	SCS12050	SuperPower	Copper			[58]
SnPb		183					32,48		1	10,1		Lap, HTS-HTS		200	Yes	nitric acid, 70°C	9,7	SCS4050 AP	SuperPower	Copper			[48]
SnPb	60Sn40Pb	191	Ribbon 250 μm	Rosin Flux			32,7		1			Lap, HTS-HTS	Hot Plate	< 250	No	Cleaned	Applied	SCS4050	SuperPower	Copper	20		[34]
SnPb		183					33,38		1	13		Lap, HTS-HTS		210	Yes	nitric acid, 70°C	7,54	SCS4050 AP	SuperPower	Copper			[48]
SnPb		180	Paste		16,75		33,5		1	50	200	Lap, HTS-HTS		200			1,47	SCS4050	SuperPower	Copper	40		[29]
SnPb		180	Paste		7		33,6		1	120	480	Lap, HTS-HTS		190			166,71	SCS4050	SuperPower	Copper	20		[30]

A. Anhang

SnPbBi	43Sn43P16Bi	163	Paste	2720	290	3039,87	324,1	6	25,4	111,76	Lap, HTS-Substrate	Heater Block	168-173	Yes	As manufactured	Applied	344B	AMSC	Brass	110	[33]
In	100In	157				6043		1	9,8		Lap, HTS-HTS	Heater Block		Yes	nitric acid, 70°C	8	Amperium	AMSC	Copper		[48]
InSn	48Sn52In	118	Alpha 260HF or Kester 135	5700	1500	6270	1650	6	25	110	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron	165	Yes	Cleaned with ethanol/methanol	Applied	344S	AMSC	Steel	170	[31]
In	100In	157	Alpha 260HF or Kester 135	6200	1900	6820	2090	6	25	110	Lap, HTS-HTS	Soldering Iron	170	Yes	Cleaned with ethanol/methanol	Applied	344S	AMSC	Steel	170	[31]
InBi	66In33Bi	71		3240		7047		1	50	217,5	Lap, Sub-Sub	Hot Plate	80			Applied	344C	AMSC	Copper	50	[22]
SnPb				50				1			Lap, HTS-HTS					Applied	SCS4050	SuperPower	x		[40]
SnPb				71				1			Lap, HTS-HTS					Applied	344C	AMSC	x		[40]
In	100In	157		46				1			Lap, HTS-HTS					Applied	344C	AMSC	x		[40]
InBi				43				1			Lap, HTS-HTS					Applied	SCS4050	SuperPower	x		[40]
In	100In	157		23				1			Lap, HTS-HTS					Applied	SCS4050	SuperPower	x		[40]
SnPb				65				1			Lap, HTS-HTS					Applied	344S	AMSC	x		[40]
InBi				64				1			Lap, HTS-HTS					Applied	344C	AMSC	x		[40]