

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik

**Langzeitverhalten von Schweißverbindungen mit
Aluminiumleitungen für
Hybrid- und Elektrofahrzeuge**

Klaus Peter Reske

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Herzog
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. S. Kindersberger
Univ.-Prof. Dr.-Ing. St. Großmann
2. Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 23.01.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 23.05.2015 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von 2011 bis 2014 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München.

Ich möchte an dieser Stelle den Menschen danken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger für die Anregung des Themas und für die wertvolle Unterstützung im Verlauf der Arbeit. Ferner danke ich Herrn Prof. Großmann für das Interesse an der Arbeit und Herrn Prof. Herzog für die Leitung der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt den zahlreichen Industriepartnern für die Bereitstellung der Prüfmaterialien und für die Herstellung der Schweißverbindungen. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Hamminger (Fa. Rosenberger) für die Durchführung der mechanischen Prüfungen und die Anfertigung der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen bedanken.

Darüber hinaus gebührt mein Dank allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Lehrstuhls, deren Erfahrung und Sachkenntnis mir bei der Durchführung dieser Arbeit geholfen haben. Ich danke zudem den Studenten, deren Arbeiten einen Teil zu dieser Arbeit beigetragen haben. Nicht zuletzt danke ich meinen Korrekturlesern für die investierte Zeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich unterstützten, wann immer es nötig war.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Erkenntnisstand	3
2.1	Grundlagen zum elektrischen Kontakt.....	3
2.1.1	Verbindungsflächen	4
2.1.2	Verbindungswiderstand	5
2.2	Alterungsmechanismen elektrischer Verbindungen.....	6
2.2.1	Materialwanderung	7
2.2.2	Reibkorrosion.....	9
2.2.3	Chemische Alterung.....	11
2.2.4	Kriechen des Leitermaterials	12
2.3	Einfluss der Beschichtung auf das Langzeitverhalten lösbarer Multimaterialverbindungen	13
2.3.1	Schichtwerkstoffe für Steckverbindungen.....	13
2.3.2	Schichtwerkstoffe für Multimaterialverbindungen.....	14
2.3.3	Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer Stromschienenverbindungen.....	14
2.4	Langzeitverhalten stoffschlüssiger Aluminium-Multimaterialverbindungen	17
2.5	Galvanisieren von Aluminium	21
2.6	Ausgewählte Schweißverfahren zur Herstellung elektrischer Verbindungen.....	22
2.6.1	Ultraschallschweißen	22
2.6.2	Laserstrahlschweißen	23
2.6.3	Widerstandsschweißen.....	25
2.7	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	28
3	Langzeitverhalten von geschweißten Aluminium- Multimaterialverbindungen in KFZ-Bordnetzen	30
3.1	Modellverbindung	30
3.2	Prüflinge.....	32
3.3	Methoden und Prüfverfahren zur Bewertung der Alterung	40
3.3.1	Bestimmen des Gesamtwiderstands der Doppelverbindungen.....	40

3.3.2	Bestimmen der Verbindungstemperatur.....	41
3.3.3	Ermitteln der Strombelastbarkeit.....	42
3.3.4	Schälversuche.....	43
3.3.5	Zugversuche.....	45
3.3.6	EDX-Analyse.....	45
3.4	Modellierung der Komponenten des Gesamtwiderstandes einer Doppelverbindung.....	46
3.4.1	Ultraschallgeschweißte und laserstrahlgeschweißte Verbindungen.....	48
3.4.2	Widerstandsgeschweißte Verbindungen.....	55
3.5	Mechanische Festigkeit der unbelasteten Verbindungen.....	59
3.6	Einfluss von schnellen Temperaturwechseln.....	63
3.7	Einfluss von Temperatur- und Stromzyklen.....	65
3.7.1	Versuchsparameter.....	65
3.7.2	Versuchsaufbau.....	66
3.7.3	Bewertung der Alterung nach Beenden des Versuchs.....	68
3.7.4	Messergebnisse.....	69
3.8	Einfluss von Langzeitbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen.....	77
3.8.1	Versuchsparameter.....	77
3.8.2	Versuchsaufbau.....	78
3.8.3	Bewertung der Alterung nach Beenden des Langzeitversuchs.....	79
3.8.4	Messergebnisse.....	80
3.9	Diskussion der Ergebnisse.....	92
3.9.1	Einfluss von Temperaturwechseln.....	92
3.9.2	Einfluss von Temperatur- und Stromzyklen.....	93
3.9.3	Einfluss von Langzeitbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen.....	95
3.9.4	Bewertung des Langzeitverhaltens.....	101
4	Zusammenfassung.....	103
5	Literatur.....	106
6	Normenverzeichnis.....	114

1 Einleitung

Um die Potenziale des Elektroantriebs voll ausschöpfen zu können, ist es notwendig, hohe elektrische Leistungen zwischen den Komponenten eines Fahrzeugs übertragen. Zu diesem Zweck wird in Bordnetzen aktueller Hybrid- und Elektrofahrzeuge vorwiegend Kupfer als Leitermaterial eingesetzt. Bedingt durch die hohe Leistungsanforderung des elektrischen Antriebsstrangs im Vergleich zu einem konventionellen Bordnetz sind große Leiterquerschnitte erforderlich. Diese Skalierung eines klassischen 12V Kupferbordnetzes bringt jedoch zwei wesentliche Nachteile mit sich: Hohe Materialkosten und große Massen der verwendeten Kupferlegierungen. Alternativ zu Kupfer kann Aluminium als Leitermaterial in KFZ-Bordnetzen eingesetzt werden. Aluminium weist zwar lediglich 63 % der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer auf, die Dichte von Aluminium entspricht aber nur 30 % der Dichte von Kupfer (**Tabelle 1**). Somit ist bei der Verwendung von Aluminium als Leitermaterial zwar der benötigte Nennquerschnitt im Vergleich zu Kupfer um etwa 60 % höher, es ist aber nur ca. 50 % des Metallgewichts erforderlich. Im Zeitraum vom Januar 2007 bis Januar 2014 lag der Preis für Aluminium in Kabeln in der Größenordnung von 200 €/kg, wohingegen der Preis für Kupfer stark schwankte und in der Spitze bis zu Faktor 3,6 über dem Preis für Aluminium in Kabeln lag (**Abbildung 1**). Daher ist beim Einsatz von Aluminiumleitungen zusätzlich zur Gewichtsersparnis eine Kostenreduktion möglich. Aus den genannten Gründen stellt Aluminium eine Alternative zu Kupfer als Leitermaterial in KFZ-Bordnetzen dar.

Tabelle 1: *Vergleich der Eigenschaften von Aluminium und Kupfer*

Material / Quelle	Dichte		Spezifische elektrische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur	
	g/cm ³	%	S·m/mm ²	%
Kupfer [LIP-07]	8,9	100	59,6	100
Aluminium [VIN-02]	2,7	30,3	37,7	63,3

Die Kontaktelemente der einzelnen Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs wie Akkumulator und Elektromotor sind komponentenseitig als Kupfer-Steckverbindungen konzipiert. Daher ist ein Materialübergang von der Aluminiumleitung zu den Kupfer-Steckverbindern erforderlich, wodurch eine Multimaterialverbindung entsteht. Elektrische Verbindungen können während der Nutzungsdauer altern, was mit einem Anstieg des Verbindungswiderstands verbunden ist. Aluminium-Kupfer Verbindungen werden auch in der Elektroenergietechnik beispielsweise bei der Verbindung einer Aluminiummit einer Kupferstromschiene eingesetzt.

In Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer Stromschienen für den Einsatz in der Elektroenergietechnik wird teilweise ein starker Anstieg des Verbindungswiderstands beobachtet, solche Verbindungen sind nicht zwangsweise langzeitstabil [SCH-09]. Insbesondere durch hohe Umgebungstemperaturen können Multimaterialverbindungen beschleunigt altern.

In der vorliegenden Arbeit wird das Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer Verbindungen während der Nutzungsdauer in einem KFZ-Bordnetz untersucht. Das Langzeitverhalten verschiedener Schweißverbindungen wird unter den Betriebsbedingungen in einem KFZ-Bordnetz untersucht. Die mechanische und elektrische Beständigkeit verschiedener Schweißverbindungen wird geprüft, die Alterungsbeständigkeit der Varianten wird verglichen und bewertet.

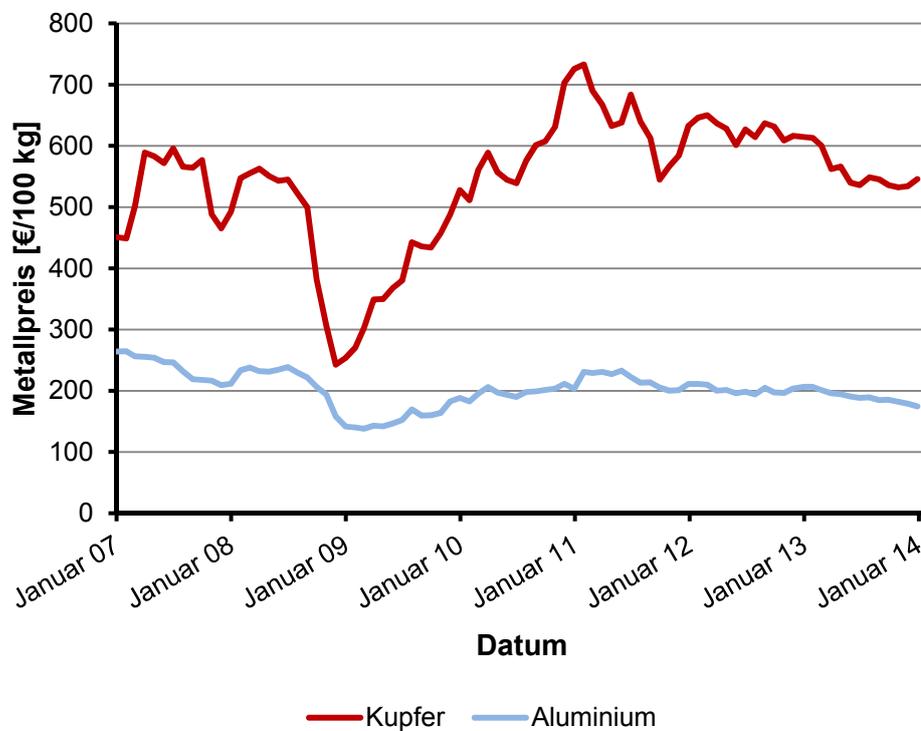


Abbildung 1: *Vergleich des Aluminium- und Kupferpreises im Zeitraum von 2007 bis 2014. Daten von [DEL-14]*

2 Erkenntnisstand

2.1 Grundlagen zum elektrischen Kontakt

Werden mindestens zwei Kontaktelemente miteinander verbunden, entsteht eine elektrische Verbindung. Eine *elektrische Verbindung* ist definiert als „Verbindung zwischen zwei oder mehr Leitern oder zwischen einem leitenden Teil und einem oder mehr Leitern“ [DIN EN 60998-1]. Ein *elektrischer Kontakt* bezeichnet hingegen „leitfähige Teile, die dazu bestimmt sind, elektrischen Durchgang herzustellen, wenn sie einander berühren...“ [DIN EN 60947-1]. In der Literatur sind auch alternative Definitionen zu finden. Holm definiert einen elektrischen Kontakt als „eine lösbare Verbindung zwischen zwei Leitern mit der Aufgabe Strom zu transportieren“ [HOL-67]. Im Folgenden wird der Begriff elektrische Verbindung wie in [DIN EN 60998-1] definiert verwendet, wobei eine elektrische Verbindung aus mehreren Kontaktelementen besteht.

Grundsätzlich wird zwischen während des Betriebs lösbaren und während des Betriebs nicht lösbaren Verbindungsstellen unterschieden (**Abbildung 2**) [SCH-08a]: Die während des Betriebs stets geschlossenen Verbindungen werden unterteilt in unlösbare Verbindungen, bedingt lösbare Verbindungen und Verbindungen zwischen sich bewegenden Teilen.

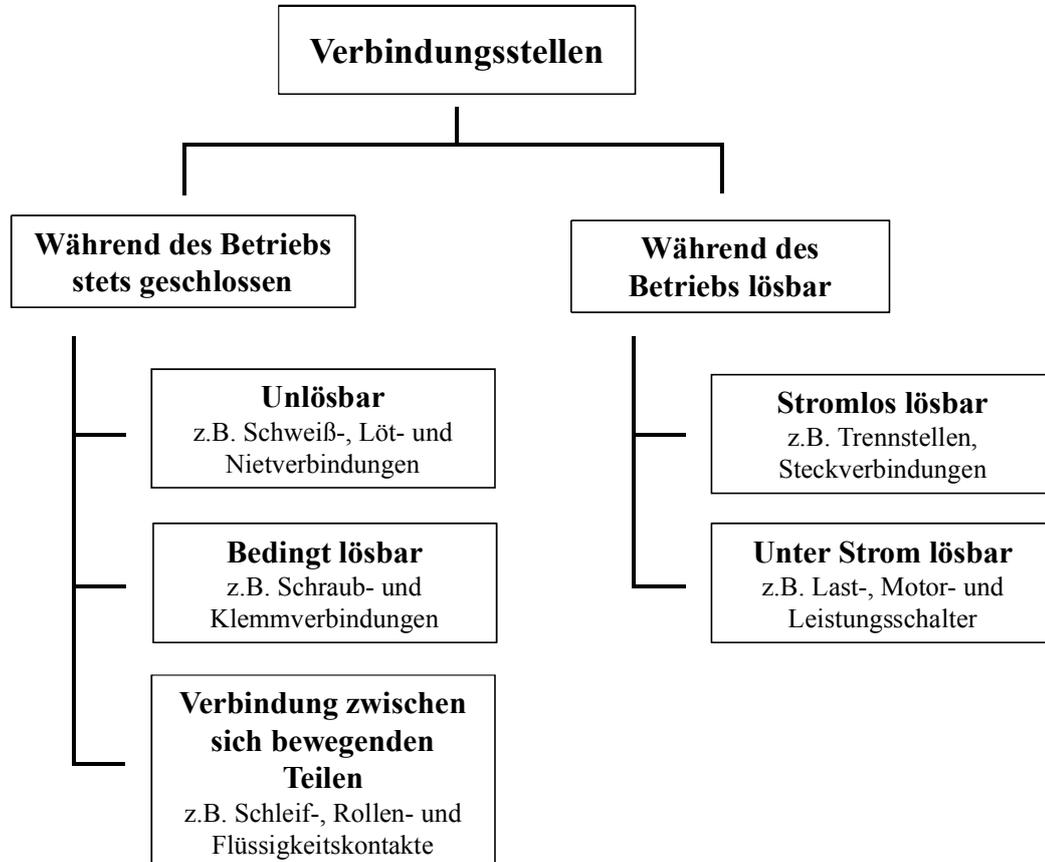


Abbildung 2: Definition elektrischer Verbindungsstellen nach Schoft [SCH-08a]

Beispiele für unlösbare Verbindungen sind Schweiß- und Lötverbindungen, Schraub- und Klemmverbindungen gehören zu den bedingt lösbaren Verbindungen. Verbindungen zwischen sich bewegenden Teilen können z.B. mittels Schleif-, Rollen- und Flüssigkeitskontakten hergestellt werden. Zu den während des Betriebs lösbaren Verbindungen gehören stromlos lösbare Verbindungen wie beispielsweise Steckverbindungen. Leistungsschalter sind hingegen ein Beispiel für unter Stromfluss lösbare Verbindungen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Schweißverbindungen untersucht.

2.1.1 Verbindungsflächen

Die Oberflächen der elektrischen Leiter in einer Schraub- oder Klemmverbindung sind mikroskopisch betrachtet rau. Hierdurch trägt nicht die gesamte Überlappungsfläche der verbundenen Leiter zur Stromübertragung bei. Es werden folgende Flächen definiert (**Abbildung 3**) [HOL-67]:

Scheinbare Verbindungsfläche A_a (engl.: *apparent contact area*):

Diese wird gebildet aus der Überlappungsfläche der verbundenen Leiter. Die Leitung des Stroms erfolgt aber nur über einen Teil der scheinbaren Verbindungsfläche.

Mechanisch tragende Verbindungsfläche A_b (engl.: *load bearing area*):

Werden die Leiter mit der Verbindungskraft zusammengedrückt, ergeben sich mikroskopisch kleine Berührflächen durch die Erhebungen auf den Oberflächen. Die Summe der Berührflächen bildet die mechanisch tragende Fläche, welche leitende und nicht leitende Flächen bzw. Fremdschichten beinhalten kann.

Wahre Verbindungsfläche A_c (engl.: *true contact area*):

Besteht aus den elektrisch leitenden Berührflächen. Durch die Verbindungskraft werden die Fremdschichten teilweise aufgebrochen, sodass eine leitfähige Fläche entsteht.

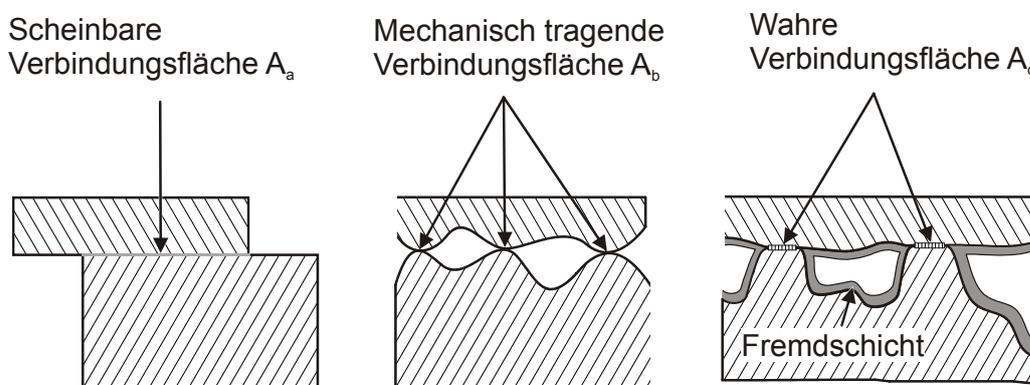


Abbildung 3: *Scheinbare, mechanisch tragende und wahre Verbindungsfläche einer elektrischen Verbindung*

2.1.2 Verbindungswiderstand

Der Widerstand R_V einer elektrischen Verbindung setzt sich aus den Komponenten Bahnwiderstand R_B , Engewiderstand R_E und Filmwiderstand R_F zusammen [HOL-67].

Mit Bahnwiderstand R_B wird der Widerstand bezeichnet, der sich ergeben würde, wenn sich zwei Leiter auf ihrer gesamten scheinbaren Verbindungsfläche A_a berühren würden (**Abbildung 4**, links).

Da die mechanisch tragende Verbindungsfläche kleiner als die scheinbare Verbindungsfläche ist, kommt es zu Einschnürungen des Stromflusses (**Abbildung 4**, Mitte). Der Bereich der wahren Verbindungsfläche A_c , in dem es zu Einschnürungen des Stromflusses kommt, wird als Mikrokontakt bezeichnet. Die stromführenden Kontaktflächen der verbundenen Leiter werden Engstellen (engl.: *a-spots*) genannt. Die Einschnürung des elektrischen Strömungsfeldes ist Ursache des Engewiderstandes R_E (engl.: *constriction resistance*). Der Engewiderstand ist abhängig vom spezifischen Widerstand des Leiter- bzw. Klemmenmaterials in den Mikrokontakten sowie der Anzahl und den Radien der Engstellen.

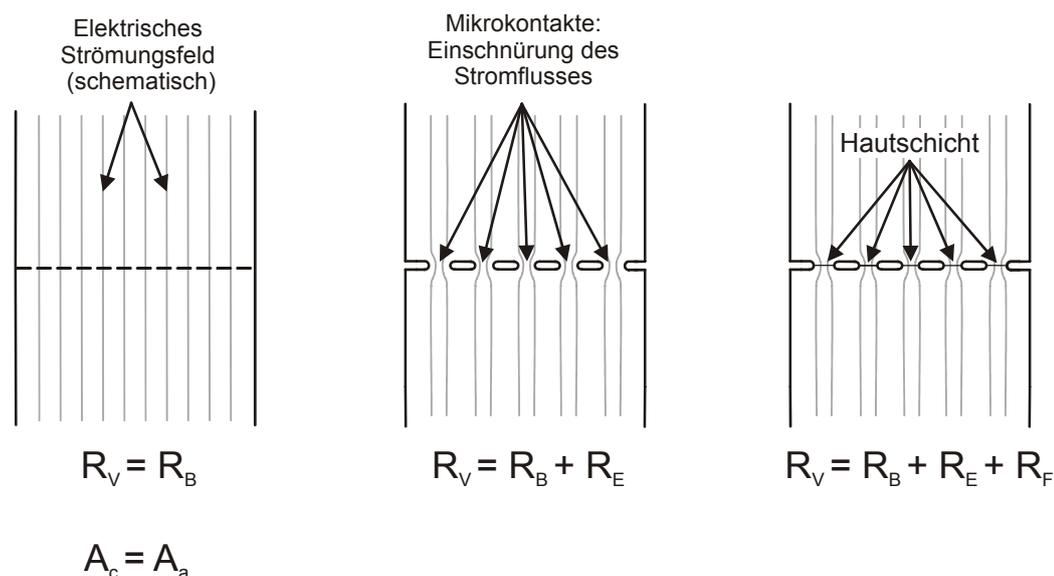


Abbildung 4: Verbindungs-, Bahn-, Enge- und Hautwiderstand

Auch wenn vor der Montage sämtliche Fremdschichten entfernt werden, bilden sich an der Luft binnen weniger Sekunden oder Minuten durch die Adsorptionsprozesse Physisorption und anschließende Chemisorption dünne Hautschichten. Die Hautschichten weisen eine Dicke von bis zu 10 \AA ($1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$) auf und bestehen überwiegend aus Sauerstoff. Sie sind von Elektronen durchtunnelbar und Ursache für den Hautwiderstand R_F (engl.: *film resistance*) (**Abbildung 4**, rechts).

Somit besteht die wahre Verbindungsfläche aus zwei Teilflächen, nämlich der Berührflächen mit rein metallischem Kontakt A_m und der quasimetallischen, mit einer Hautschicht bedeckten Fläche A_{qm} (**Abbildung 5**) [HOL-67].

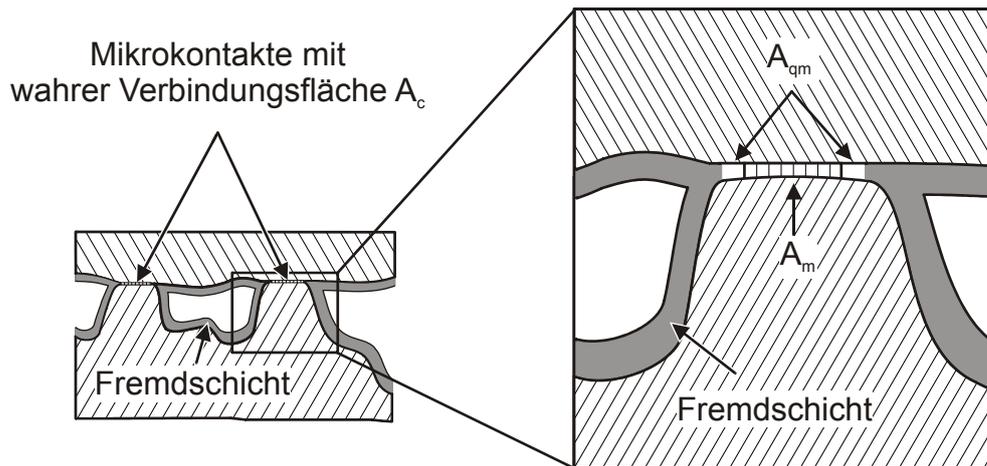


Abbildung 5: Wahre Verbindungsfläche mit den Komponenten metallische und quasimetallische Verbindungsfläche

Oxidschichten und Fremdschichten mit einer Dicke von über 10 \AA werden in der Regel als isolierend definiert. Nimmt man mechanisch tragende Fremdschichten als vollkommen isolierend an, so ergibt sich der Verbindungswiderstand R_V (engl.: *joint resistance*) zu (**Abbildung 4**):

$$R_V = R_B + R_E + R_F \quad (1)$$

2.2 Alterungsmechanismen elektrischer Verbindungen

Durch Alterung wird der elektrische Widerstand einer Verbindung mit der Zeit größer. Ist die Strombelastung konstant, so steigt die in der Verbindung in Wärme umgesetzte Leistung:

$$P_V = R_V * I^2 \quad (2)$$

Hierdurch können Grenztemperaturen der Verbindung überschritten werden. Bedingt durch die Alterung können die Verbindung und die sie umgebende Isolierung, aber auch angrenzende Bauteile zerstört werden [SCH-08a]. Die Alterungsmechanismen sind temperaturabhängig, wobei höhere Temperaturen zu einer beschleunigten Alterung führen [SCH-09].

Verschiedene physikalische, metallurgische und chemische Prozesse in den Mikrokontakten sind Ursache für die Alterung [RUN-89]. Folgende Mechanismen können zu einer Alterung der Verbindung führen [RUN-89]: Materialwanderung in Folge von Interdiffusion zwischen unterschiedlichen Leitermaterialien, Elektromigration in den Bereichen hoher Stromdichten, Reibkorrosion aufgrund von mikroskopischen Bewegungen der Leiter- und Klemmenteile, Abnahme der Verbindungskraft durch Kriechen sowie chemische Reaktionen. Durch die genannten Mechanismen kann der Engewiderstand R_E und infolgedessen auch der Verbindungswiderstand R_V steigen [SCH-08a].

2.2.1 Materialwanderung

In Leiter- und Klemmverbindungen führen unterschiedliche Prozesse zu Materialwanderung. Eine Ursache für Materialwanderung ist ein Konzentrationsgradient der chemischen Bestandteile zwischen Leitern aus unterschiedlichen Leitermaterialien in einer Verbindung [SCH-08a] [RUN-87]. Dies führt zu Interdiffusion der Kontaktpartner. Weiterhin wird durch hohe Stromdichten Elektromigration hervorgerufen [RUN-87]. Auch kann Materialwanderung durch einen Temperaturgradienten (Thermotransport) zwischen den Leitern hervorgerufen werden [RUN-87], [RUN-89].

2.2.1.1 Interdiffusion

Bei der Verbindung unterschiedlicher Leitermaterialien in einer elektrischen Verbindung dringt, bedingt durch den unterschiedlichen chemischen Konzentrationsgradienten, das Material des einen Leiters in den andern ein und umgekehrt (**Abbildung 6**), [SCH-08a]. Es wird zwischen Volumen- und Grenzflächendiffusion unterschieden. Im Falle der Volumendiffusion diffundieren die Atome im Bereich des ungestörten Kristallgitters und im Falle der Grenzflächendiffusion an Fehlstellen wie Versetzungen und Korngrenzen [SCH-08b], [SCH-09]. Beide Arten der Diffusion treten gleichzeitig auf, für Temperaturen unter 300 °C dominiert jedoch die Grenzflächendiffusion [SCH-09]. Insbesondere für Bimetallverbindungen ist Interdiffusion ein wichtiger Alterungsmechanismus [SCH-08b].

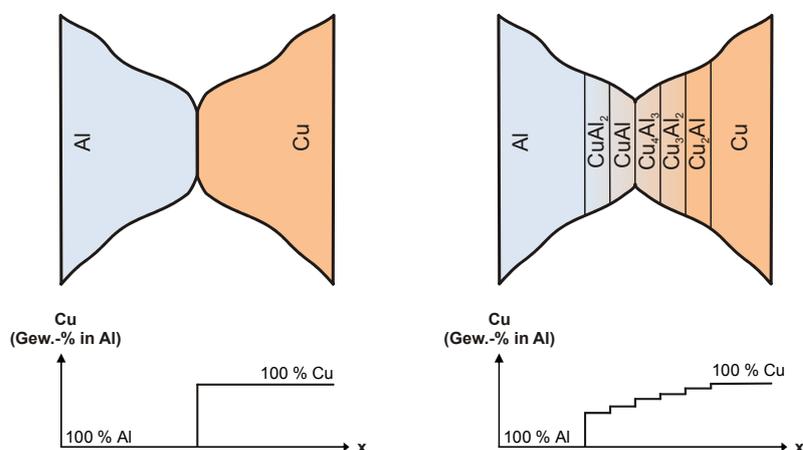


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Phasenbildung in einem Aluminium-Kupfer Kontakt nach [SCH-09]. Links: Neuzustand, rechts: Gealterter Zustand

Bei vielen Metallpaarungen, beispielsweise auch bei der Paarung Aluminium-Kupfer können durch Interdiffusion in den Berührungspunkten intermetallische Phasen entstehen (**Abbildung 6, Tabelle 2**): Nach der Verbindung existiert zunächst ein direkter Übergang von Aluminium zu Kupfer.

In Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur diffundieren nach Verbindung der Metalle die Atome des einen in das jeweils andere Metall.

Die Geschwindigkeit der Materialwanderung ist abhängig vom chemischen Konzentrationsgradienten zwischen den verbundenen Leitern und ist stark temperaturabhängig [SCH-08a] [BRA-07]. Es können sich in den Engstellen und in den mechanisch tragenden Flächen intermetallische Phasen bilden, die in der Regel hart und spröde sind. Da sie ebenfalls einen höheren spezifischen elektrischen Widerstand als die Grundmaterialien aufweisen, führt das Vorhandensein von intermetallischen Phasen zu einem höheren Verbindungswiderstand (**Tabelle 2**) [BRA-07]. Zusätzlich können durch Erschütterungen die spröderen Mikrokontakte schneller zerstört werden, was ebenfalls zu einem Anstieg des Verbindungswiderstands führt [SCH-08b]. Andere Alterungsmechanismen, nämlich Thermotransport, Elektromigration und Kriechen können den Prozess der Interdiffusion entweder beschleunigen oder verlangsamen [SCH-08a].

Tabelle 2: *Intermetallische Phasen und deren Eigenschaften für Aluminium-Kupfer Verbindungen* [BRA-07]

Symbol	Chemische Zusammensetzung	Cu [Gew. %]	Al [Gew. %]	Härte [kg/mm ²]	Spez. el. Widerstand [μΩ cm]
Cu	Cu	100	0	38	1,75
γ ₂	Cu ₂ Al	80	20	35	14,2
δ	Cu ₃ Al ₂	78	22	180	13,4
ζ ₂	Cu ₄ Al ₃	75	25	624	12,2
η ₂	CuAl	70	30	648	11,4
θ	CuAl ₂	55	45	413	8
Al	0	0	100	38	2,9

2.2.1.2 Elektromigration

Als Elektromigration in einem Kontakt wird die Drift von Atomen im Metall bezeichnet, die durch den Stromfluss hervorgerufen wird [ARO-96]. Es handelt sich hierbei um einen strominduzierten Materialtransport, der durch den Impulsübertrag der Elektronen (dem sog. „Elektronenwind“) verursacht wird [SCH-08a]. In Aluminium tritt Elektromigration ab Stromdichten von $J > 10^5 \text{ A/cm}^2$ auf [ARO-96]. Bei Gleichstrombelastung werden Atome vom Elektronenwind an der Kathodenseite der Kontaktzone mitgerissen und in Richtung der Anodenseite transportiert [RUN-89], wodurch an der Kathode Leerstellen entstehen (**Abbildung 7**).

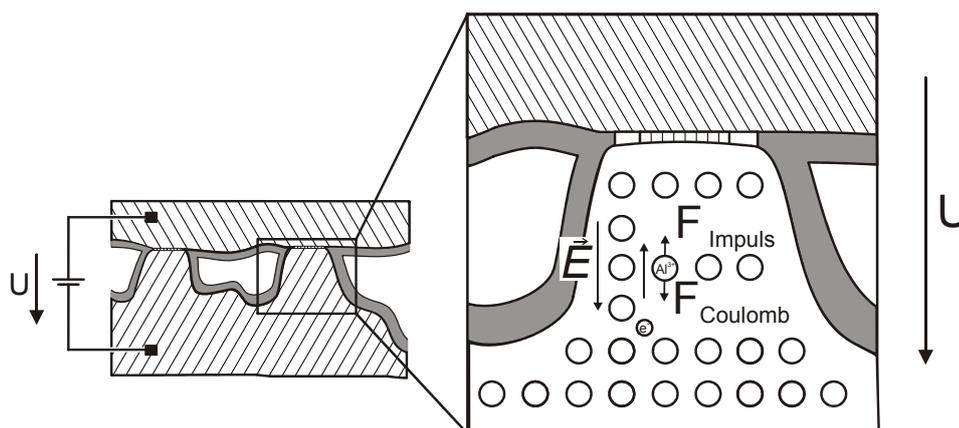


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Kräfte auf ein Metallion in einem Mikrokontakt bei Elektromigration

Basierend auf diesen Annahmen dürfte Elektromigration nur bei Gleichstrom auftreten, da sich der Materialfluss bei Wechselstrombelastung aufheben würde. Ist jedoch die Stromdichte in einem Metall bei Belastung mit Wechselstrom inhomogen, findet ein Materialtransport durch Elektromigration aus den Bereichen großer Stromdichte in Bereiche mit kleiner Stromdichte statt [RUN-89], [SCH-08a]. Elektromigration führt zu einem Anstieg des Widerstandes, bis der Mikrokontakt ausfällt [ARO-96]. An Hochstromverbindungen¹ wurden bisher in Bezug auf den Verbindungswiderstand keine signifikanten Unterschiede zwischen im Wärmeschrank gelagerten und stromdurchflossenen Verbindungen bei gleichen Temperaturen festgestellt [BLU-10]. Es wird vermutet, dass die im Mikrokontakt herrschenden Stromdichten noch zu gering sind, um einen Einfluss auf den Materialtransport und somit auf den Verbindungswiderstand auszuüben [SCH-12].

2.2.2 Reibkorrosion

Unterschiedliche mikroskopische Bewegungen können zu einer Zerstörung der Mikrokontakte führen. Dazu zählen zyklische mikroskopische Bewegungen im μm -Bereich aufgrund mechanischer Erschütterungen oder elektromagnetischer Kräfte, unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der verbundenen Leiter und die plastische Verformung durch Kriechen der zerstörten Mikrokontakte [BOY-00], [SCH-08a]. Dies wird als Reibkorrosion (engl. *fretting*) bezeichnet. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten einiger Metalle sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Insbesondere in Kraftfahrzeugen kommt es aufgrund von Vibrationen und thermischen Einflüssen zu Reibkorrosion in den Mikrokontakten [HAN-00].

¹ Die untersuchte Hochstromverbindung überträgt den Strom zwischen einem Kontaktträger und einem Leiterrohr aus einer Aluminiumlegierung. Der Aufbau der Kontaktkraft erfolgt mittels einer Schraubenfeder aus einer Kupferlegierung [BLU-10]. Kontaktträger, Leiterrohr und Schraubenfeder sind silberbeschichtet.

Zunächst sammelt sich im Bereich der Verbindungsflächen Abrieb bestehend aus Oxidpartikeln bzw. Bruchstücken intermetallischer Phasen und Mischkristallphasen an (**Abbildung 8**, links). Mechanische Bewegungen ermöglichen ein Eindringen des Abriebs in die Verbindungsflächen und führen so zu einer Abnahme der wahren Verbindungsfläche. Durch den Abrieb können die Verbindungsflächen auch teilweise voneinander getrennt werden, was zu einer Erhöhung des Verbindungswiderstandes führt (**Abbildung 8**, rechts) [BOY-00].

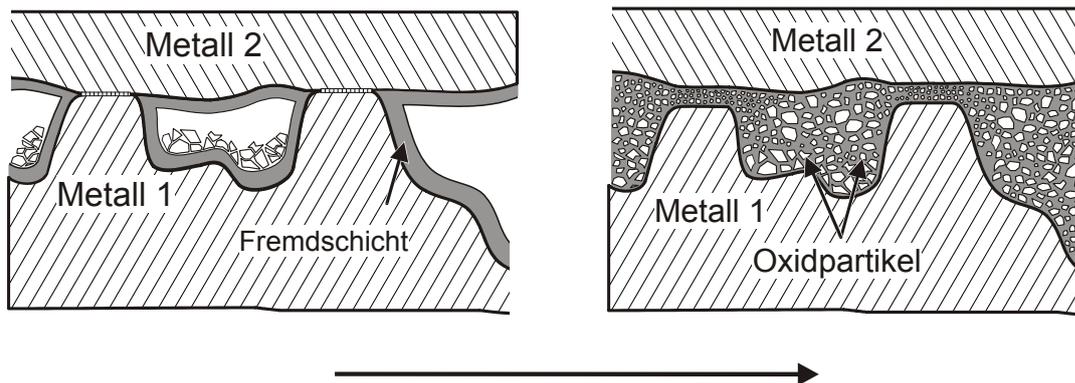


Abbildung 8: *Eindringen von Abrieb in die Verbindungsflächen durch Reibkorrosion*

Reibkorrosion tritt erst auf, wenn eine kritische Amplitude der mechanischen Relativbewegung der Leiter zueinander überschritten wird. Sind die Amplituden der auftretenden mikroskopischen Bewegungen größer als die kritische Amplitude, führt dies zum Aufbrechen der Mikrokontakte (engl.: *gross slip*) und der Verbindungswiderstand kann um mehrere Größenordnungen zunehmen [HAN-00], [SCH-08a]. Sind die auftretenden Amplituden kleiner als die kritische Amplitude, so verbleiben die Mikrokontakte in den Haftzonen (engl.: *partial slip*) und der Verbindungswiderstand bleibt trotz der mechanischen Beanspruchung stabil [HAN-00].

Tabelle 3: *Thermischer Ausdehnungskoeffizient einiger Metalle* [BRA-07]

Material	Thermischer Ausdehnungskoeffizient [x 10 ⁻⁶ /K]
Aluminium	23,6
Kupfer	16,5
Nickel	13,3
Silber	19,7

2.2.3 Chemische Alterung

Bei der Verbindung von Leitermaterialien mit einem stark unterschiedlichen elektrochemischen Potential tritt ab einer Feuchtigkeit von über 50 % relativer Feuchte zwischen den Leitern elektrochemische Korrosion (engl.: *corrosion*) auf. Weiterhin entstehen durch chemische Reaktionen des Leiter- und Klemmenmaterials mit der Atmosphäre in den Mikrokontakten Fremdschichten [SCH-08a].

Durch beide Mechanismen kann die Kontaktfläche während der Betriebsdauer der Verbindung reduziert werden, was zu einer Erhöhung des Engwiderstands führt. Die Alterung einer Verbindung aufgrund von chemischen Reaktionen wird in drei Phasen eingeteilt (**Abbildung 9**) [BER-96], [SCH-08a]:

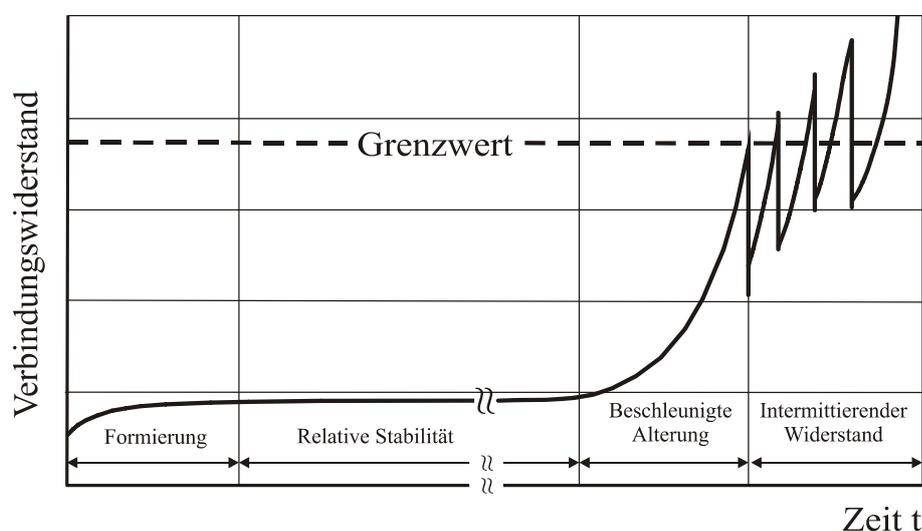


Abbildung 9: Prinzipieller Alterungsverlauf bei chemischer Alterung nach [BER-96] und [SCH-08a].

In der Phase der *Formierung* bilden sich an den Rändern innerhalb von 1.000 Stunden bis 2.000 Stunden schlecht leitende Fremdschichten. Zu Beginn nimmt der Verbindungswiderstand schnell zu. Die Fremdschichten schirmen die Engstellen ab, sodass eine weitere Zunahme des Verbindungswiderstands verlangsamt wird.

In der Phase der *relativen Stabilität* sind die Engstellen weitestgehend abgeschirmt. Diese Phase kann mehrere Jahrzehnte andauern, in denen der Verbindungswiderstand nur geringfügig zunimmt.

Der geringfügig, aber stetig ansteigende Verbindungswiderstand bewirkt bei konstantem Stromfluss einen kontinuierlichen Anstieg der Temperatur an den Engstellen, was zu einem beschleunigten Wachstum der Fremdschichten führt. Hierdurch erfolgt der Übergang in die Phase der *beschleunigten Alterung*, in welcher der Verbindungswiderstand pro Zeit im Vergleich zu den vorangegangenen Phasen überproportional größer wird.

Sobald die Temperatur in den Mikrokontakten die Schmelztemperatur erreicht hat, wird der Verbindungswiderstand sprunghaft kleiner. Da dieser Zustand nicht stabil ist, nimmt der Verbindungswiderstand erneut zu, um anschließend wieder abzunehmen, der Widerstand *intermittiert* und die Verbindung gilt als ausgefallen.

2.2.4 Kriechen des Leitermaterials

Durch thermisch aktivierte, zeitabhängige Kriechverformung nimmt die Verbindungskraft in verspannten Verbindungen ab [SCH-08a]. Einen großen Einfluss hat die mechanische Festigkeit des eingesetzten Materials [SCH-12]. Da Aluminium ein relativ weiches Metall ist, neigt es im reinen Zustand zu Kriechen [JEL-97]. Reine oder niedrig legierte Metalle werden so lange mechanisch bearbeitet, bis der gewünschte Härtegrad erreicht ist. Durch mechanische Verformung werden Gitterfehler in den Werkstoff eingebracht, die einen positiven Einfluss auf die Festigkeit des Materials haben. Durch Einbringen von Fremdatomen in die Kristallstruktur wird bei Legierungen die Festigkeit erhöht. Nach der Montage einer lösbaren Verbindung führen verschiedene zeit- und temperaturabhängige Prozesse zu einer Abnahme der mechanischen Festigkeit des Leitermaterials, z.B. durch Abbau von Gitterfehlern oder Ausscheiden von Fremdatomen [SCH-12]. Bei lösbaren Verbindungen bleibt der Verbindungswiderstand bis zum Erreichen einer Mindest-Verbindungskraft annähernd konstant. Nach Unterschreiten der Mindest-Verbindungskraft verringern sich die metallischen und quasimetallischen Kontaktflächen verbunden mit einem exponentiellen Anstieg des Verbindungswiderstands [SCH-12]. Wird die Mindest-Verbindungskraft unterschritten, führt dieser Prozess in der Regel zum Ausfall der Verbindung.

2.3 Einfluss der Beschichtung auf das Langzeitverhalten lösbarer Multimaterialverbindungen

Für die Herstellung einer langzeitstabilen Verbindung werden sowohl bei Multimaterialverbindungen als auch bei Steckverbindungen häufig Beschichtungen eingesetzt [SCH-09], [VIN-02]. Durch das Einsetzen einer Beschichtung entfällt für lösbare Verbindungen das Reinigen der Kontaktfläche vor der Montage, der Verbindungswiderstand der unbelasteten Verbindung ist niedriger und die Langzeitstabilität bei hohen Temperaturen kann verbessert werden [JAC-82]. Einige häufig eingesetzte Werkstoffe zum Beschichten (Schichtwerkstoffe) werden im Folgenden vorgestellt.

2.3.1 Schichtwerkstoffe für Steckverbindungen

Steckverbindungen sind verschiedenen Umwelteinflüssen wie Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit und den Schadstoffbestandteilen der Luft ausgesetzt [VIN-02]. Zu den Schadstoffbestandteilen der Luft zählen: H_2S , SO_2 , Cl_2 , NO_x , O_x und organische Dämpfe. Durch die Umwelteinflüsse entstehen auf den Kontakten Fremdschichten.

Die Kontaktbeschichtung dient der Reduzierung der Umwelteinflüsse auf den Kontakt, wobei folgende Anforderungen erfüllt werden sollen [VIN-02]:

- Möglichst geringe Neigung zu freier Korrosion und zu Kontaktkorrosion in Verbindung mit dem Trägerwerkstoff
- Vorhandene Fremdschichten sollen mit möglichst geringem Kontaktdruck durchbrochen werden können
- Die Beschichtung sollte für den Trägerwerkstoff eine Diffusionsbarriere darstellen
- Hohe Verschleißfestigkeit
- Geringer Reibwert mit dem Gegenstück zur Reduzierung der Steckkräfte

Die Alterung elektrischer Verbindungen führt zu einem Anstieg des Verbindungswiderstandes. Bedingt durch den hohen Schmelzpunkt von Silber von 961 °C und der hohen elektrischen sowie thermischen Leitfähigkeit ist Silber für Hochstromanwendungen besonders geeignet. In schwefelhaltiger Atmosphäre bilden sich auf Silber sulfidische Deckschichten, diese können aber bereits von niedrigen Normalkräften durchbrochen werden, sodass geringe Verbindungswiderstände möglich sind [VIN-02]. Eine Silberoberfläche neigt während des Steckens zum Kaltverschweißen, was zu hohen Reibwerten und einem hohen Schichtverschleiß führt.

2.3.2 Schichtwerkstoffe für Multimaterialverbindungen

Zur Verbesserung der Langzeitstabilität von elektrischen Multimaterialverbindungen werden diese ebenfalls häufig beschichtet [SCH-09]. Häufig verwendet werden Silber und Zinn, da diese im Vergleich zum Grundmaterial Kupfer eine geringere Härte aufweisen. Hierdurch können sich mehr bzw. größere Mikrokontakte ausbilden. Weiterhin bilden sich unter normalen Umweltbedingungen dünnere Fremdschichten, die keinen nennenswerten Einfluss auf das Widerstandsverhalten der Verbindung haben [SCH-09]. Eine gleichartige Beschichtung beider Kontaktpartner ist vorteilhaft, wobei das physikalische bzw. chemische Verhalten von Beschichtungsmaterial zu Grundmaterial beachtet werden muss [SCH-09]. So entstehen zwischen Silber und Kupfer keine intermetallischen Phasen, wohingegen Aluminium und Silber zwei intermetallische Phasen mit deutlich erhöhtem Widerstand ausbilden [SCH-09]. Dies kann durch das Einbringen von Zwischenschichten, z.B. Nickel als sog. Diffusionssperren verhindert werden [SCH-09]. Mit steigender Beschichtungsdicke wird das Verhalten des Kontakts in Bezug auf Kriechen und die thermische Ausdehnung mehr von den Eigenschaften des Beschichtungsmaterials bestimmt als von denen des Grundmaterials [BON-73].

2.3.3 Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer Stromschienenverbindungen

Es liegen bereits umfangreiche Untersuchungen zum Langzeitverhalten des Materialübergangs von Aluminium zu Kupfer an geschraubten Stromschienenverbindungen vor. Es wird die Tauglichkeit verschiedener Schichtwerkstoffe zur Herstellung einer langzeitstabilen Verbindung zwischen Aluminium und Kupfer untersucht, um insbesondere eine Alterung durch Interdiffusion möglichst zu verhindern. Da Interdiffusion ein stark temperaturabhängiger Alterungsmechanismus ist, werden die Stromschienen in den Arbeiten durch hohe Temperaturen beschleunigt gealtert. Die Erzeugung der hohen Temperaturen erfolgt durch Öfen ([BON-48], [SCH-09]), Heizmatten ([SCH-08b]) oder elektrischen Strom ([JAC-82], [BRA-91], [SCH-09]). Eine gebräuchliche Methode zur Bewertung der Alterung von elektrischen Verbindungen ist die Messung des Verbindungswiderstands vor, nach und teilweise auch während der beschleunigten Alterung. Zum Nachweis von Interdiffusion und intermetallischen Phasen werden häufig Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Schlibfbildern in Verbindung mit einer EDX-Analyse eingesetzt ([SCH-08a], [SCH-08b], [SCH-09]). Auch wenn sich Art und Dauer der beschleunigten Alterung in den vorgestellten Arbeiten unterscheiden, erweisen sich einige Schichtwerkstoffe als geeignet für eine langzeitstabile Multimaterialverbindung, wohingegen für andere Schichtwerkstoffe keine Langzeitstabilität erreicht werden konnte.

Unbeschichtete Verbindungen

Verbindungen zwischen Aluminium- und Kupferstromschienen ohne Beschichtung der Kontaktpartner sind in der Regel nicht langzeitstabil. Nach Lagerung von unbeschichteten Stromschienen bei 200 °C wurde bereits nach acht Stunden ein Anstieg des Verbindungswiderstands um 643 % beobachtet [BON-48]. Auch bei zyklischer Strombelastung einer Verbindung mit einer scheinbaren Verbindungsfläche von 1444 mm² mit Strömen von bis zu 2 kA wird nach 166 Stunden eine Verdoppelung des Verbindungswiderstands gemessen [BRA-91]. In einem Langzeitversuch werden unbeschichtete Aluminium-Kupfer Stromschienen für 8.000 Stunden bei 140 °C gelagert. Der Verbindungswiderstand der gealterten Verbindung ist im Mittel fünfmal größer als der Widerstand der unbelasteten Verbindungen [SCH-09].

Zur Herstellung einer langzeitstabilen Verbindung wird in der Literatur die Tauglichkeit der Schichtwerkstoffe Cadmium, Zinn, Zink, Silber, Kupfer und Nickel untersucht (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: *Übersicht über untersuchte Schichtwerkstoffe zum Herstellen einer langzeitstabilen Verbindung zwischen Aluminium- und Kupferstromschienen*

Untersuchte Schichtwerkstoffe	Quelle
unbeschichtet	[BON-48][BRA-91][SCH-09]
Cadmium	[BON-48]
Zink	[BON-48]
Kupfer	[BRA-91][SCH-11]
Zinn	[BON-48][JAC-82][BRA-91]
Nickel	[BON-73][JAC-82][BRA-91]
Silber	[BRA-91][JAC-82][SCH-09]
Silber mit Nickel als Diffusionssperre	[SCH-09]

Cadmium und Zink

Für die Schichtwerkstoffe Cadmium und Zink wird nach einer Lagerung bei 200 °C für acht Stunden ein Anstieg des Verbindungswiderstands um über 100 % beobachtet [BON-48]. Durch Verwendung eines Antioxidationsmittels kann der Anstieg des Verbindungswiderstands verringert werden, hierauf soll an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden.

Verkupfern von Aluminiumkontakten

Kupfer kann als Schichtwerkstoff auf Aluminiumteilen eingesetzt werden. In einer Arbeit wird für eine Verbindung zwischen einer verkupferten Aluminiumstromschiene und einer unbeschichteten Kupferstromschiene (scheinbare Verbindungsfläche 1444 mm²) nach einer Belastung mit Stromzyklen mit bis zu 2 kA über 166 Stunden ein stabiler Verbindungswiderstand gemessen [BRA-91]. Eine Belastung von verkupferten Aluminiumstromschienen mit hohen Temperaturen kann zu Diffusion des Aluminiums durch die Beschichtung führen. So werden in einer anderen Arbeit nach einer Lagerung von sieben Tagen bei 120 und 150 °C aluminiumhaltige Ausblühungen auf einer Kupferbeschichtung nachgewiesen [SCH-11].

Zinn

Für Verbindungen von Kupferstromschienen wird der Schichtwerkstoff häufig eingesetzt [BRA-91]. Zinn bildet an der Luft eine dünne Oxidschicht, aufgrund der geringen Härte des Materials kann diese jedoch leicht durchbrochen werden [JAC-82]. Wird bei Aluminium-Kupfer Stromschienen lediglich die Kupferstromschiene verzinkt und die Aluminiumstromschiene bleibt unbeschichtet, ergibt sich keine langzeitstabile Verbindung. Nach einer Lagerung bei 200 °C für acht Stunden wird ein Anstieg des Verbindungswiderstands um 36 % beobachtet [BON-48].

Bei einer Belastung mit Stromzyklen von bis zu 2 kA und einer scheinbaren Verbindungsfläche von 1444 mm² wird nach 166 Stunden in einer Arbeit ebenfalls ein starker Anstieg des Verbindungswiderstands beobachtet [BRA-91]. Es wird vermutet, dass die geringe Langzeitstabilität von verzinkten Kontakten in Verbindung mit unbeschichtetem Aluminium auf die geringe Härte von Zinn zurückzuführen ist: Die mechanisch tragende Verbindungsfläche von Aluminium wird nur unzureichend plastisch verformt, wodurch die Oxidschicht auf dem Aluminiumkontakt nicht vollständig aufgebrochen wird [JAC-82].

Nickel

Bei einer Belastung mit 50 Temperaturzyklen jeweils vier Stunden bei 70 °C und bei Raumtemperatur weisen nickelbeschichtete Kupferoberflächen in Verbindung mit unbeschichteten Aluminiumstromschienen geringe und stabile Verbindungswiderstände auf [BON-73]. Auch nach einer Belastung mit unterschiedlichen Stromzyklen wird in zwei Arbeiten ein geringer Verbindungswiderstand nachgewiesen [JAC-82] [BRA-91]. Aufgrund der relativ hohen Härte von Nickel kann die Fremdschicht auch auf einer Aluminiumoberfläche durchbrochen werden, sodass geringe Verbindungswiderstände erzielt werden können [JAC-82]. Werden sowohl die Aluminium- als auch die Kupferstromschiene vernickelt, ergibt sich nach einer Belastung mit Stromzyklen von bis zu 2 kA nach 166 Stunden ebenfalls ein geringer Verbindungswiderstand [BRA-91].

Silber

Neben Zinn wird Silber häufig als Schichtwerkstoff für Stromschienenverbindungen eingesetzt [SCH-09]. Die Verbindung von versilberten Kupferstromschienen mit unbeschichteten Aluminiumstromschienen ist jedoch nicht langzeitstabil. Aufgrund der geringen Härte von Silber wird die Fremdschicht der Aluminiumstromschiene nur unzureichend aufgebrochen, sodass Verbindungen mit stark variierendem Verbindungswiderstand entstehen [JAC-82]. Weiterhin bildet Silber in Verbindung mit Aluminium zwei intermetallische Phasen mit einem deutlich höheren spezifischen elektrischen Widerstand als Aluminium und Kupfer [SCH-09]. Bei der Belastung einer Verbindung von versilberten Kupferstromschienen und unbeschichteten Aluminiumstromschienen mit Stromzyklen (bis zu 2 kA, scheinbare Verbindungsfläche 1444 mm²) steigt der Verbindungswiderstand innerhalb von 166 Stunden stark an [BRA-91]. Ein starker Anstieg des Verbindungswiderstands über 40.000 Stunden wird ebenfalls bei der Lagerung von versilberten Kupferstromschienen in Verbindung mit unbeschichteten und versilberten Aluminiumstromschienen bei Temperaturen von 140 °C beobachtet [SCH-09].

Silber in Verbindung mit Nickel als Diffusionssperre

Wird Nickel als Diffusionssperre zwischen Aluminium und einer Silberbeschichtung eingesetzt, kann eine langzeitstabile Verbindung zwischen Aluminium und Kupferstromschienen hergestellt werden. Bei einer Lagerung bei Temperaturen von bis zu 140 °C von versilberten Kupferstromschienen in Verbindung mit versilberten Aluminiumstromschienen mit Nickel als Diffusionssperre wird über 40.000 Stunden kein Anstieg des Verbindungswiderstands festgestellt [SCH-09].

2.4 Langzeitverhalten stoffschlüssiger Aluminium-Multimaterialverbindungen

Das Langzeitverhalten von stoffschlüssigen Aluminium-Kupfer Multimaterialverbindungen wurde anhand folgender Fügetechniken bereits untersucht: Abbrennstumpfschweißen ([DIX-60], [NAK-77], [RAY-79]), Walzplattieren ([WAL-77a], [WAL-77b], [VEE-97]), Sprengplattieren ([VEE-97]) und Reibschweißen ([BRA-92], [BRA-93], [BRA-94]). Die Verbindungen werden in den Veröffentlichungen teilweise durch Lagerung bei hohen Temperaturen und teilweise durch Belastung mit hohen Strömen beschleunigt gealtert. Bei Verwendung geeigneter Prozessparameter können Schweißverbindungen hergestellt werden, deren mechanische Stabilität die von Aluminium übersteigt [WAL-77b]. Durch Verwendung ungeeigneter Prozessparameter können jedoch auch spröde Verbindungen mit geringer mechanischer Stabilität entstehen. In diesem Fall kommt es zu einer schlechten Verbindung der Fügepartner oder einem zu starken Wachstum von intermetallischen Phasen bedingt durch einen zu hohen Wärmeeintrag in die Verbindung [WAL-77b]. Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

Reibgeschweißte Aluminium-Kupfer Verbindungen

Das Langzeitverhalten wird an reibgeschweißten Verbindungen zwischen Aluminium- und Kupferstangen mit einem Durchmesser von 5 mm (Leiterquerschnitt 20 mm²) untersucht [BRA-94]. Nach einer Belastung im Wärmeofen für 120 Stunden bei 250 °C beträgt die Dicke der intermetallischen Phasen 3 µm, bei 520 °C entstehen intermetallische Phasen mit einer Dicke von 250 µm. In Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen sind fünf unterschiedliche Bänder intermetallischer Phasen erkennbar. Bei einer Auslagerungsdauer von 20 Tagen bei einer Temperatur von 470 °C weisen die Verbindungen nur noch eine geringe mechanische Stabilität auf, es sind Risse in der Verbindungszone vorhanden. In Bezug auf den Verbindungswiderstand wird ein linearer Zusammenhang zwischen Verbindungswiderstand und Dicke der intermetallischen Phasen festgestellt. Weiterhin wird das Verhalten der Verbindungen bei einer Belastung mit Wechselstrom untersucht, wobei die Verbindungen durch den Strom auf eine konstante Temperatur zwischen 200 °C und 500 °C aufgeheizt werden. Die Dicke der intermetallischen Phasen ist bei denselben Temperaturen bei durch Wechselstrom gealterten Prüflingen höher, als die Dicke der intermetallischen Phasen der durch hohe Temperaturen gealterten Prüflinge. In Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen sind jedoch nur vier Bänder intermetallischer Phasen erkennbar.

Abbreinstumpfgeschweißte Aluminium-Kupfer Verbindungen

In einer Arbeit von Dixon wird das Langzeitverhalten von verschweißten Aluminium- und Kupferstangen untersucht [DIX-60]: Die Verschweißung der Stangen erfolgt mittels Abbreinstumpfschweißen² (engl. *flash-welding*). Zur Untersuchung der Langzeitstabilität von abbreinstumpfgeschweißten Verbindungen werden die Schweißverbindungen bei verschiedenen Temperaturen gelagert. Die Lagerung hat über einen Zeitraum von zwei Jahren bei 149 °C keinen nennenswerten Einfluss auf den Verbindungswiderstand und die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindungen. Bei einer Lagerung von fünf Minuten bei 371 °C wird ebenfalls keine Veränderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften festgestellt. In Schlifffbildern wird ein geringes Wachstum intermetallischer Phasen mit steigender Auslagerungsdauer nachgewiesen. In einer anderen Arbeit werden die mechanischen Eigenschaften von abbreinstumpfgeschweißten Aluminium- und Kupferplättchen untersucht [NAK-77]. Bei einem Zugversuch mit unbelasteten Verbindungen bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen bis zu 250 °C versagen diese im Aluminium und nicht in der Schweißzone. Nach einer Lagerung bei 130 °C für 8.000 Stunden hat die Zugfestigkeit nur geringfügig abgenommen, die Verbindungen versagen weiterhin im Aluminium.

² Beim Abbreinstumpfschweißen handelt es sich um ein Pressschweißverfahren [DIL-06]: Zwischen den Fügepartnern wird bewusst nur ein loser Schmorkontakt hergestellt. Bei Anlegen einer Spannung von weniger als 15 V wird ein bewegliches Füge teil gegen ein feststehendes bewegt. Zwischen den Werkstücken wird ein Stromkreis geschlossen, wodurch die Fügestellen bis zur Verdampfung des Materials erwärmt werden. Nach gleichmäßiger Erwärmung der Fügestellen wird die Schweißstelle durch schlagartiges Stauchen der Materialien geschlossen.

Mit steigender Temperatur tritt ein Versagen der Verbindung in der Schweißzone auf, bei einer Lagerung bei 300 °C versagen bereits nach 100 Stunden alle Proben in der Schweißzone. In Schliffbildern sind für unbelastete Verbindungen fast keine intermetallischen Phasen nachweisbar, nach einer Lagerung bei 200 °C für 5.000 Stunden können intermetallische Phasen mit einer Dicke von ca. 5 µm nachgewiesen werden. Die intermetallischen Phasen haben einen Einfluss auf das Dehnungsvermögen der Verbindung. Bei einer Auslagerungstemperatur von 505 °C beträgt die Dicke der intermetallischen Phasen in einer weiteren Arbeit nach 25 Stunden bereits über 100 µm, wobei die mechanische Belastbarkeit der Verbindungen ab einer Dicke von über 2 µm deutlich reduziert ist [RAY-79].

Walzplattierte Aluminium-Kupfer Verbindungen

Interdiffusion findet während des Fügeprozesses bei walzplattierten Verbindungen nur in geringem Umfang statt [WAL-77b]. Nach einer Lagerung im Wärmeofen bei 300 °C, 400 °C und 500 °C können jedoch bereits nach 326 Stunden alle fünf intermetallischen Phasen nachgewiesen werden, deren Dicke insgesamt bis zu 70 µm beträgt [WAL-77a]. Der Verbindungswiderstand steigt mit wachsender Dicke der intermetallischen Phasen an. Die Schlagfestigkeit von walzplattierten Aluminium-Kupfer Verbindungen wird drastisch reduziert, sobald die Dicke der intermetallischen Phasen 2 µm übersteigt [WAL-77b]. In einer anderen Arbeit werden walzplattierte Verbindungen untersucht, die über einen Zeitraum von bis zu zehn Jahren mit Strömen über 4 kA belastet werden [VEE-97]. Nach sieben Jahren kann bei 47 % der Verbindungen eine sichtbare Ablösung der Kontaktpartner beobachtet werden. Mittels Schliffbildern werden intermetallische Phasen mit einer Dicke von bis zu 4 µm nachgewiesen, die Risse aufweisen.

Langzeitverhalten von Aluminium-Stahl Verbindungen

In den bisher vorgestellten Arbeiten zum Langzeitverhalten von stoffschlüssigen Aluminium-Kupfer Multimaterialverbindungen ändert sich die mechanische Beständigkeit der Verbindung durch Belastung mit hohen Temperaturen oder hohen Strömen nicht [DIX-60] oder sie wird schlechter [BRA-94], [VEE-97], [WAL-77b]. An rührreibgeschweißten Aluminium-Stahlverbindungen wird in einer Arbeit teilweise eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch eine Warmauslagerung der Verbindung festgestellt [MOV-13]: Zur Bewertung der Änderung der Festigkeit werden die Verbindungen bei Temperaturen von 300 °C und 350 °C für 30 Minuten bis 180 Minuten und bei 400 °C für 15 Minuten bis 180 Minuten warm ausgelagert. Für die Temperaturen 300 °C und 350 °C werden mit steigender Auslagerungsdauer höhere Zugkräfte gemessen, für eine Temperatur von 350 °C versagen die Verbindungen nach einer Auslagerung von 150 Minuten und 180 Minuten im Basismaterial. In Schliffbildern der bei 300 °C ausgelagerten Verbindungen sind keine intermetallischen Phasen erkennbar, es wird aber Diffusion im Bereich der Schweißverbindung nachgewiesen.

Für die bei 350 °C ausgelagerten Verbindungen entstehen intermetallische Phasen mit einer Dicke von bis zu 0,49 µm.

Obwohl intermetallische Phasen vorhanden sind, ist die Zugfestigkeit der bei 350 °C ausgelagerten Verbindungen für alle untersuchten Auslagerungszeiten höher als die der bei 300 °C ausgelagerten Verbindungen. Bei einer Auslagerungstemperatur von 400 °C steigt die Zugfestigkeit der Verbindungen bis zu einer Auslagerungsdauer von 45 Minuten an. Nach 45 Minuten Auslagerung bei 400 °C beträgt die Dicke der intermetallischen Phasen 1,43 µm, für längere Auslagerungszeiten wächst die Dicke auf bis zu 7,8 µm. Bei längeren Auslagerungszeiten als 45 Minuten verringert sich die Zugfestigkeit der Verbindung bei Dicken der intermetallischen Phasen von über 2,6 µm stark. Aufgrund der Ergebnisse nennen die Autoren drei Mechanismen, die zu einer Festigkeitssteigerung in der Schweißzone während der Warmauslagerung führen können: Reduzierung oder Entfernen der Eigenspannungen, Diffusionsprozesse und die Ausbildung von intermetallischen Phasen mit einer geringen Dicke.

Auch wenn sich die Fügetechniken sowie Art und Dauer der Belastung in den vorgestellten Arbeiten stark unterscheiden, können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden: Beim Auftreten hoher Temperaturen während der Nutzungsdauer einer stoffschlüssigen elektrischen Multimaterialverbindung kann es zur Bildung intermetallischer Phasen kommen. Durch die Ausbildung der Phasen kann die Verbindung spröde werden, in einigen Arbeiten werden in der Fügezone der Kontaktpartner Risse beobachtet [RAY-79], [BRA-94], [VEE-97]. Für intermetallische Phasen mit geringer Dicke wird in einer Arbeit an rührreibgeschweißten Aluminium-Stahlverbindungen eine höhere Zugfestigkeit ermittelt als für Verbindungen ohne intermetallische Phasen [MOV-13]. Sobald die Dicke der intermetallischen Phasen einen Wert von 2 µm bis 5 µm übersteigt, wird die mechanische Beständigkeit der Verbindung erheblich beeinträchtigt [RAY-79], [BRA-07], [MOV-13]. Mit steigender Dicke der intermetallischen Phasen steigt der Verbindungswiderstand der elektrischen Verbindung. In einigen Arbeiten wurde ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Dicke der einzelnen intermetallischen Phasen und dem Verbindungswiderstand festgestellt [RAY-79], [BRA-94]. Die Temperatur kann in den Mikrokontakten einer elektrischen Verbindung deutlich höher sein, als im Basismaterial der Leiter [BRA-07]. Daher ist es möglich, dass auch bei niedrigen Temperaturen des Basismaterials in den Mikrokontakten Interdiffusion stattfinden kann.

2.5 Galvanisieren von Aluminium

Aufgrund der leichten Oxidierbarkeit der Oberfläche von Aluminium und Aluminiumlegierungen ist das Galvanisieren bedeutend aufwändiger als das Galvanisieren anderer Metalle [DET-64], [SCH-11]. Auf blankem Aluminium bildet sich an der Luft durch Reaktion mit Sauerstoff bzw. Wasserdampf eine natürliche Oxidschicht, deren Dicke mit bis zu 20 nm angegeben wird [JEL-97], [DET-64], [SLA-99].

Diese durch Reaktion mit Luftsauerstoff entstehende Oxidschicht ist durchsichtig, korrosionsschützend und elektrisch leitend [JEL-97]. Innerhalb eines Tages wächst die Oxidschicht bis zu einer Dicke von 2 nm bis 3 nm, darauffolgend wächst sie langsamer weiter [JEL-97]. Mit einer Oberflächenvorbehandlung muss die Schicht vor dem Galvanisieren entfernt werden [HUP-96]. Durch Anwendung des Zinkatverfahrens kann die Oxidschicht gelöst und anschließend eine metallische Schicht haftfest abgeschieden werden [SCH-11]: Durch Ladungsaustausch bildet sich in der Zinkatbeize eine Zinkschicht mit einer Dicke von weniger als 10 nm aus, wobei das Aluminium aufgelöst wird. Während des Prozesses scheidet sich Zink stromlos ab. Für eine gute Haftung der nachfolgend aufzubringenden Schichten soll die Zinkschicht möglichst dünn und porenarm sein. Um diese Eigenschaften zu erreichen, wird die Zinkschicht häufig mehrfach aufgebracht. Die im ersten Schritt hergestellte Schicht wird im nächsten Schritt aufgelöst und darauffolgend erneut aufgebracht. Werden die Prozessschritte Aufbringen und Ablösen zweimal nacheinander angewendet, wird das Verfahren als Doppelzinkatverfahren bezeichnet. Das Aufbringen einer Diffusionssperre, beispielsweise Nickel, erfolgt anschließend direkt auf der Zinkschicht. Um ein anodisches Auflösen von Aluminium zu vermeiden, muss die Schicht, die als Diffusionssperre dient, möglichst porenarm sein [SCH-11]. Die gewünschte Endoberfläche wird direkt auf die Diffusionssperre abgeschieden.

2.6 Ausgewählte Schweißverfahren zur Herstellung elektrischer Verbindungen

2.6.1 Ultraschallschweißen

Auf die aufeinanderliegenden Oberflächen der Fügepartner wirken beim Ultraschallschweißen eine statische Normalkraft sowie oszillierende Scherspannungen ein [KAL-11]. Die Scherspannungen werden durch die Spitze eines Ultraschallkopfes, auch Sonotrode genannt, erzeugt (**Abbildung 10**) [KOE-08]. Die durch die Sonotrode erzeugte Relativbewegung lässt das Werkstück in Resonanz vibrieren, wodurch an der Fugestelle Reibungswärme entsteht. Zusätzlich werden die Fügepartner fest zwischen einem Amboss und der Sonotrode zusammengepresst [FAH-11]. Hierdurch entsteht eine Schweißnaht zwischen den Fügepartnern, wobei die Schweißtemperatur unter der Schmelztemperatur der Fügepartner bleibt [BOR-04]. Durch die Scherspannungen entstehen an den Grenzflächen der Fügepartner kleine plastische Verformungen, die Oxidschichten und Verunreinigungen zerstören [KAL-11] [BOR-04]. Die Schweißparameter sind Schweißenergie bzw. Schweißzeit, Schweißdruck und Schwingungsamplitude der Sonotrode [WOD-04]. Insbesondere beim Ultraschallschweißen von Metallen gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Verbindungsbildung [WOD-04]. So kann bereits eine geringfügige Änderung der zu verbindenden Teile z.B. durch Oxid- oder Fettschichten zu einer Streuung der Verbindungsgüte führen [WOD-04]. Aus diesem Grund müssen die Schweißparameter für die zu verbindenden Fügepartner experimentell ermittelt werden. Da beim Schweißen keine Rekristallisation auftritt, wird die elektrische Leitfähigkeit einer ultraschallgeschweißten Verbindung als sehr gut eingestuft, wohingegen die mechanische Festigkeit als nicht zu hoch eingestuft werden darf [FAH-11].

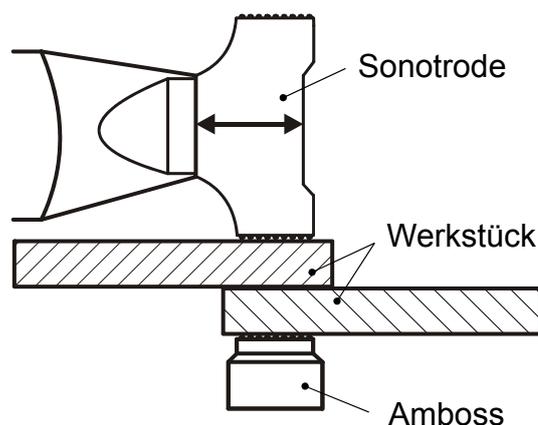


Abbildung 10: Prinzip des Ultraschallschweißens

Das Verschweißen von Litzen mittels Ultraschallschweißen ist bereits etabliert. Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Schweißverbindungen zwischen Aluminiumlitzen in Multimaterialverbindungen sind in der Literatur derzeit jedoch nicht umfassend beschrieben.

In einer Arbeit wird der Einfluss der Belastung mit Temperaturwechseln sowie der Einfluss der Belastung mit hohen Temperaturen und Luftfeuchten untersucht [BAT-06]. Es werden Aluminiumleitungen mit Querschnitten von $6,3 \text{ mm}^2$, 10 mm^2 und 16 mm^2 mit unbeschichteten Kupferplättchen verschweißt. Geprüft wird eine Änderung der mechanischen Beständigkeit mittels Zug- und Schälversuchen³. Die Auswirkung von Temperaturwechseln auf die mechanische Beständigkeit wird mit einer Temperaturschockprüfung im Zweibäderverfahren in Wasser geprüft. Die Schweißverbindungen werden jeweils eine Minute in ein Wasserbad mit einer Temperatur von $85 \text{ }^\circ\text{C}$, dann in Eiswasser und abschließend wieder in ein Wasserbad mit einer Temperatur von $85 \text{ }^\circ\text{C}$ getaucht. Dieser Zyklus wird 100 mal wiederholt, wobei die Umlagerungszeit kleiner als 5 Sekunden ist. In einem weiteren Versuch wird die Auswirkung der Belastung mit einer Temperatur von $85 \text{ }^\circ\text{C}$ und 85% relativer Feuchte untersucht. Für diesen Versuch werden die Verbindungen für 1049 Stunden in einem Klimaprüfschrank belastet. Zusätzlich zu diesen Versuchen wird eine Temperaturwechselperfugung durchgeführt. Die Verbindungen werden in einer dreistündigen Aufheizphase von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $55 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt. Nach einer dreistündigen Haltezeit werden die Verbindungen erneut innerhalb von drei Stunden auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt. Die relative Feuchte beträgt im dritten Versuch zwischen 93% und 97% , der beschriebene neunstündige Zyklus wird 6 mal wiederholt. Nach sämtlichen untersuchten Belastungen wird keine signifikante Änderung der Zug- und Schälkräfte gegenüber dem unbelasteten Zustand gemessen [BAT-06].

2.6.2 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Der Schweißprozess kann durch Ändern der Strahlenintensität mittels Fokussieren und Variation der Bearbeitungsgeschwindigkeit beeinflusst werden [FRI-10]. Beim Wärmeleitungsschweißen erfolgt lediglich eine oberflächliche Erwärmung der Schweißnaht, sodass die Intensität der Strahlung nicht ausreicht, um den Siedepunkt des Materials zu erreichen (**Abbildung 11**) [DOH-10].

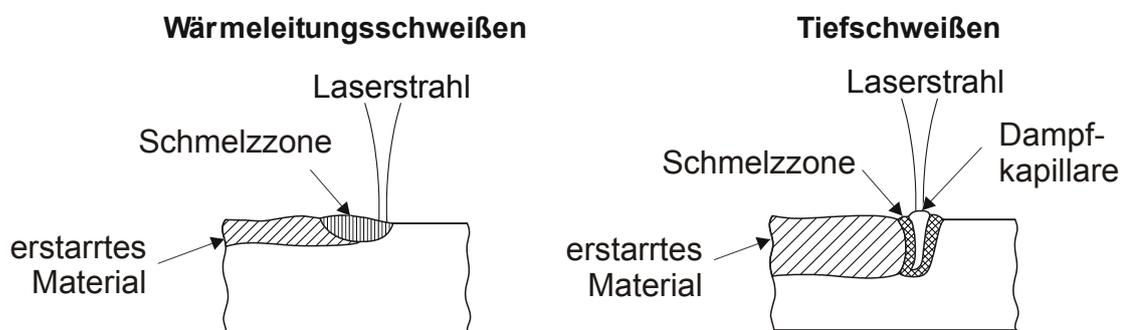


Abbildung 11: Prinzip des Laserstrahlschweißens

³ Das Vorgehen bei der Durchführung eines Zug- und Schälversuchs ist in Abschnitt 3.3.4 und 3.3.5 beschrieben.

Die Wärme gelangt durch Wärmeleitung in das Materialinnere, wobei das Material nur oberflächlich angeschmolzen wird. Hierdurch entsteht eine Schmelzzone, die in der Regel größer ist, als der Laserstrahldurchmesser. Beim Tiefschweißen hingegen ist die Intensität der Laserstrahlung so hoch, dass sich ein mit verdampfendem Werkstoff gefüllter Kanal bildet [FRI-10]. Der Durchmesser des auch als Dampfkapillare oder Keyhole bezeichneten Kanals liegt in der Größenordnung des Laserstrahls [POP-05], [FRI-10]. Durch eine Bewegung des Laserstrahls relativ zum Werkstück wird das Material an der Vorderfront aufgeschmolzen und erstarrt hinter der Dampfkapillare zu einer Schweißnaht [POP-05]. Hierbei verhindert der Dampfdruck ein Zusammenfließen der Schmelze im Kapillarbereich [DIL-00]. Das Spektrum der mittels Laserstrahlschweißen verschweißbare Werkstoffe umfasst unlegierte bis niedrig legierte Stähle sowie hochwertige Titan- und Nickellegierungen [FAH-11]. Beim Laserstrahlschweißen ist die Energieeinkopplung stark von der Absorption der Laserstrahlung abhängig. Aufgrund ihrer hohen Reflexion bei gängigen Schweißwellenlängen bereiten Aluminium- und Aluminiumlegierungen sowie Kupfer bei der Energieeinkopplung Probleme [FRI-10], [FAH-11]. In der Literatur sind derzeit keine Untersuchungen zur Herstellung von Schweißverbindungen mit Aluminiumleitungen mittels Laserstrahlschweißen verfügbar, die Festigkeit von laserstrahlgeschweißten Aluminium-Kupfer Verbindungen wurde in anderen Arbeiten bereits untersucht [MYS-04], [SAR-93].

Festigkeit von laserstrahlgeschweißten Aluminium-Kupfer Verbindungen

Zur Bewertung der mechanischen Stabilität werden Schweißverbindungen zwischen Aluminium- und Kupferteilen angefertigt und der Einfluss verschiedener Füllwerkstoffe, darunter auch Silber, untersucht [MYS-04], [SAR-93]. Das Einbringen der Füllwerkstoffe in die Verbindungsstellen erfolgt z.B. durch Einlegefolien oder Beschichten der Kupferteile. Verbindungen ohne Füllwerkstoff versagen im Zugversuch aufgrund von harten und spröden intermetallischen Verbindungen in der Schweißzone [MYS-04]. Im Allgemeinen werden die mechanischen Eigenschaften von artungleichen Schmelzschweißverbindungen durch die Verteilung und das Volumen der intermetallischen Phasen in der Schweißzone bestimmt. Intermetallische Phasen in Form von Schichten mindern die Duktilität wesentlich mehr als in Form von kleinen, getrennten Einschlüssen [MYS-04].

Der negative Einfluss intermetallischer Phasen kann durch Reduzierung der Dicke oder des Volumens der Phasen vermindert werden. Um die Bildung von harten und spröden intermetallischen Phasen zu vermeiden, ist es üblich, einen Füllstoff zu verwenden. Hierdurch kann eine Metallzusammensetzung erzeugt werden, die sich von den Grundwerkstoffen unterscheidet [SAR-93]. Insbesondere beim Schweißen von artungleichen Metallen muss der Füllstoff mit dem Basismaterial eine Legierung bilden, sodass eine Schweißverbindung mit kontinuierlicher, duktiler Matrixphase entsteht.

Silber ist grundsätzlich als Füllstoff für das Schmelzschweißen von Aluminium- und Kupferteilen geeignet. In beiden Arbeiten können durch das Einbringen von Silber als Füllwerkstoff zusammen mit einer Optimierung der Schweißparameter Verbindungen mit einer zufriedenstellenden Zugfestigkeit hergestellt werden. Durch das Einbringen einer 0,1 mm dicken Silberfolie in die Schweißverbindung wird die gemessene Zugkraft im Vergleich zu Verbindungen ohne Füllstoff nahezu verdoppelt [MYS-04], der Silberanteil in der Schweißzone ist in den Verbindungen in beiden Arbeiten hoch. Die unterschiedliche Zugkraft der Verbindungen mit und ohne Silber wird mit der Ausbildung intermetallischer Phasen beim Schweißprozess begründet, die mittels EDX-Analyse nachgewiesen werden [MYS-04]. Für Verbindungen ohne Silber bilden sich intermetallische Phasen mit einem hohen Kupferanteil, die eine hohe Härte und Sprödigkeit aufweisen (**Tabelle 2**). Im Falle der Schweißverbindungen mit Silberzusatz bilden sich im Bereich der Schweißzone ternäre Legierungen, die eine deutlich höhere Duktilität aufweisen, als die intermetallischen Phasen im System Aluminium-Kupfer. Intermetallische Phasen können in Abhängigkeit von der homologen Übergangstemperatur vom spröden in den duktilen Zustand in eher spröde und in eher duktile Phasen eingeteilt werden [PAU-77]. Die Phase Al_2Cu aus dem System Aluminium-Kupfer zählt zu den spröden Phasen, wohingegen die Phase Ag_2Al aus dem System Aluminium-Silber als duktil eingestuft wird [PAU-77]. Der Füllwerkstoff Silber hat somit eine positive Auswirkung auf die mechanische Stabilität einer laserstrahlgeschweißten Verbindung. Weiterhin liegt der thermische Ausdehnungskoeffizient von Silber zwischen dem von Kupfer und Aluminium (**Tabelle 3**), sodass Eigenspannungen beim Erstarren und Abkühlen deutlich reduziert werden können [MYS-04].

2.6.3 Widerstandsschweißen

Beim Widerstandsschweißen handelt es sich um ein thermoelektrisches Verfahren, mit welchem an der Verbindungsstelle der zu verbindenden Teile Wärme erzeugt wird [MIY-06]. Das Widerstandspunktschweißen gehört zur Verfahrensgruppe der Pressschweißverfahren. Die erforderliche Wärme wird durch den Stromfluss über den elektrischen Widerstand in der Schweißzone zwischen den beiden Fügepartnern bei gleichzeitiger Wirkung einer Anpresskraft erzeugt (**Abbildung 12**) [MIY-06].

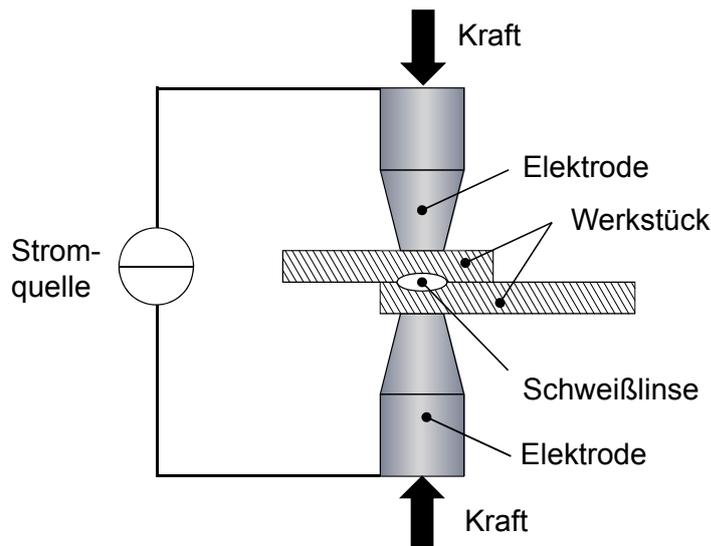


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Widerstandsschweißens

Abhängig von der Art der Stromübertragung und dem Ablauf des Schweißens werden die Verfahrensgruppen Widerstandspressschweißen und Widerstandsschmelzschweißen unterschieden [FRI-10]. Durch Widerstandserwärmen werden beim Widerstandsschmelzschweißen die Stoßflächen der Fügepartner aufgeschmolzen, wobei auch eventuell verwendeter Zusatzwerkstoff verflüssigt wird und so die Schweißverbindung erzeugt. Beim Pressschweißverfahren wird eine äußere Kraft aufgewendet, die eine mehr oder weniger starke plastische Verformung der Flächen bewirkt [DIN EN 14610]. Wichtige Einflussparameter auf die Güte der Schweißverbindung sind [FRI-10] [DIL-06]: Schweißstrom, Schweißzeit, Elektrodenkraft und Widerstand der Schweißstelle. Aufgrund der großen Wärmeleitfähigkeit des zumeist wassergekühlten Elektrodenwerkstoffs in Kombination mit dem hohen Stoffwiderstand im Bereich der Fügeebene entsteht die Schweißverbindung meist in der Mitte der zu verbindenden Bleche [DIL-06]. Sie weist häufig eine linsenförmige Gestalt auf, wobei die Elektroden bis zu 70 % der entstehenden Verlustwärme aufnehmen [DIL-06]. Die Größe der entstehenden Schweißlinse ist abhängig von der Kontaktfläche und Form der Elektroden [DIL-06]. Bedingt durch die unterschiedlichen Schmelzpunkte von Aluminium und Kupfer ist es nicht möglich, eine Aluminiumleitung mittels Widerstandsschweißen direkt mit einem flachen Kupferteil zu verbinden. Ein Abfließen von Aluminium aus der Schweißzone kann durch das Einsetzen einer Kupferhülse im Bereich der Schweißzone verhindert werden. Die Verbindung entsteht durch eine Kombination aus Presskraft und Schweißstrom, das Verfahren wird Heißcrimpen genannt. Die beim Herstellen einer Pressverbindung zwischen einer Leitung und einer Hülse ablaufenden Prozesse werden im Folgenden erläutert [VIN-02]:

Herstellung nicht lösbarer Pressverbindungen

Bei der Herstellung einer Pressverbindung wird der zu kontaktierende Leiter zusammen mit einer über den Leiter geschobenen Hülse verformt. Beim Pressvorgang entstehen durch Verformung und Fließen des Materials über den gesamten Querschnitt metallisch blanke Kontaktflächen, wobei sich der Verpressungsgrad auf den Verbindungswiderstand und die mechanische Haltekraft auswirkt [VIN-02] (**Abbildung 13**).

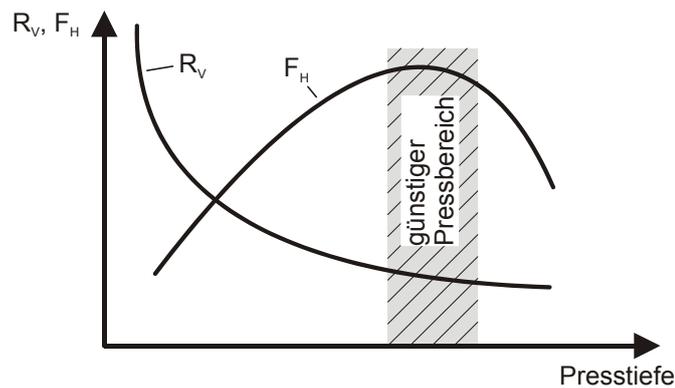


Abbildung 13: Mechanische Haltekraft F_H und Verbindungswiderstand R_V abhängig von der Presstiefe. Reproduziert nach [VIN-02]

Um den Zustand metallisch blanker Kontaktstellen aufrechtzuerhalten, befindet sich auf der Innenseite von Aluminium-Pressverbindungen häufig ein Presszusatz, beispielsweise ein Kontaktfett. Mit zunehmender Verpressung steigt die Haltekraft zunächst an und nimmt nach Überschreiten eines Maximalwertes wieder ab [VIN-02]. Durch die Verpressung kommt es zu einer deutlichen Querschnittsminderung der Einzeldrähte. Der Verbindungswiderstand nimmt mit zunehmender Presskraft auf einen unteren Grenzwert ab, der auch bei weiterer Steigerung der Presskraft nicht unterschritten werden kann. Wird der Anpressdruck nach Beenden des Pressvorgangs verringert, bleibt der Verbindungswiderstand nahezu konstant und steigt erst wesentlich später steil an [VIN-02]. Bei Schraub- und Pressverbindungen wird diese Hysterese genutzt: Nach Abklingen aller Setzvorgänge muss der Haltedruck im günstigen Pressbereich während der Nutzungsdauer noch so groß sein, dass der Verbindungswiderstand im Bereich des Minimalwerts liegt.

2.7 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In Hybrid- und Elektrofahrzeugen soll Aluminium als Leitermaterial eingesetzt werden. Die Verbindungen der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (Akkumulator, Leistungselektronik, Elektromotor) sind in aktuellen Hybrid- und Elektrofahrzeugen als Kupfersteckverbindungen ausgeführt. Für den Einsatz einer Aluminiumleitung ist es daher notwendig, eine Verbindung zwischen einer Aluminiumleitung und einem Kupfersteckverbinder herzustellen. Multimaterialverbindungen zwischen Aluminium und Kupfer sind nicht zwangsweise langzeitstabil, das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen mit Aluminiumleitungen soll über die Nutzungsdauer unter den Betriebsbedingungen in einem KFZ-Bordnetz untersucht werden.

Zum Herstellen des Materialübergangs von Aluminium zu Kupfer müssen zwei langzeitstabile Verbindungen hergestellt werden: Eine Schweißverbindung zwischen der Aluminiumleitung und dem leitungsseitigen Teil der Steckverbindung und eine Steckverbindung zwischen dem leitungsseitigen Teil der Steckverbindung und der Komponente des elektrischen Antriebsstrangs. Hierfür sind zwei verschiedene Lösungswege denkbar (**Abbildung 14**). Der Materialübergang von Aluminium zu Kupfer kann in der Steckverbindung erfolgen. In diesem Fall besteht die Steckverbindung leitungsseitig aus Aluminium und komponentenseitig aus Kupfer. Für diesen Lösungsweg spielt eine geeignete Beschichtung der Kontaktteile eine zentrale Rolle. Alternativ kann der Materialübergang von Aluminium zu Kupfer direkt in der Schweißverbindung erfolgen. In diesem Fall besteht die Steckverbindung sowohl leitungsseitig als auch komponentenseitig aus beschichtetem Kupfer.

In dieser Arbeit wird die Langzeitstabilität der Schweißverbindung zwischen einer Aluminiumleitung und dem leitungsseitigen Teil der Steckverbindung für beide Lösungswege untersucht.

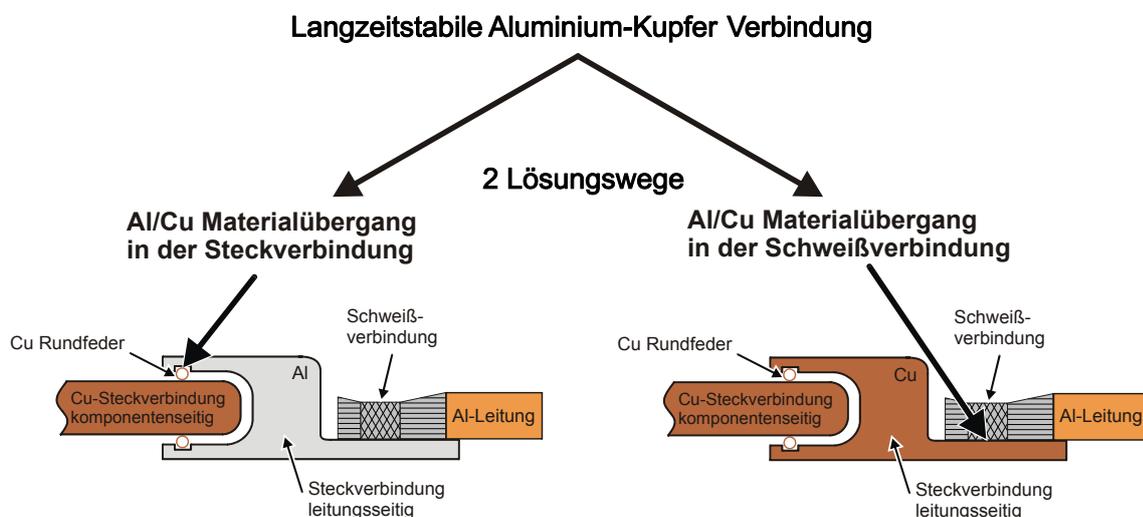


Abbildung 14: Lösungswege zum Herstellen einer langzeitstabilen Aluminium-Kupfer Verbindung in Elektrofahrzeugen

In der Literatur existieren derzeit keine umfassenden Untersuchungen des Langzeitverhaltens von geschweißten Multimaterialverbindungen mit Aluminiumleitungen. Stellvertretend werden mit den Pressschweißverfahren Ultraschallschweißen und Widerstandsschweißen sowie mit dem Schmelzschweißverfahren Laserstrahlschweißen hergestellte Verbindungen untersucht.

Zur Bewertung der Langzeitstabilität sollen folgende Aufgaben gelöst bzw. experimentell geprüft werden:

- Die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen, die mit verschiedenen Schweißverfahren hergestellt wurden, sollen untersucht und verglichen werden. Für das Schmelzschweißverfahren Laserstrahlschweißen ist zu erwarten, dass beim Schweißprozess intermetallische Phasen entstehen. Der Einfluss dieser intermetallischen Phasen auf die mechanische Beständigkeit soll bewertet werden.
- Zur Bewertung des gemessenen Verbindungswiderstands der Schweißverbindungen soll ein Modell der Verbindungen erstellt werden. Mit dem Modell soll der Verbindungswiderstand einer im Bereich der Fügezone ideal kontaktierten Verbindung ermittelt werden (scheinbare Verbindungsfläche = wahre Verbindungsfläche; $A_c = A_a$).
- Für die Herstellung einer langzeitstabilen Steckverbindung ist es notwendig, diese zu beschichten. Aus fertigungstechnischen Gründen ist diese Beschichtung auch im Bereich der Schweißverbindung vorhanden. Der Einfluss der Beschichtung auf die Alterung der Schweißverbindung soll unter den Betriebsbedingungen in einem KFZ-Bordnetz untersucht werden.
- Die mechanische Beständigkeit der Verbindungen soll bei Belastung mit für ein KFZ-Bordnetz relevanten Temperaturwechseln (-40 °C bis +180 °C) untersucht werden.
- In der Nähe des Verbrennungsmotors können hohe Temperaturen entstehen. Durch Stromwärmeverluste werden die Verbindungen zusätzlich aufgeheizt. Es soll untersucht werden, ob geschweißte Verbindungen mit Aluminiumleitern durch hohe Temperaturen (+180 °C), die in Hybridfahrzeugen auftreten können, beschleunigt altern. Die Langzeitstabilität über die Nutzungsdauer (6.000 Stunden) soll untersucht und bewertet werden.

3 Langzeitverhalten von geschweißten Aluminium-Multimaterialverbindungen in KFZ-Bordnetzen

Wird eine Aluminiumleitung mit einem Steckverbinder für ein KFZ-Bordnetz verschweißt, entsteht entweder ein Materialübergang von Aluminium zum Schichtwerkstoff auf der Steckverbindung oder ein Materialübergang zum Grundmaterial des Steckverbinders. Dabei kann es während der Nutzungsdauer einer stoffschlüssigen Multimaterialverbindung zu einer ungünstigen Änderung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften kommen, die einen Ausfall der Verbindung zur Folge haben kann (siehe Abschnitt 2.4). Das Alterungsverhalten von geschweißten Verbindungen mit Aluminiumleitungen wird hinsichtlich einer Änderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften untersucht. Hierzu werden die Schweißverbindungen in verschiedenen Versuchsaufbauten mit für ein KFZ-Bordnetz relevanten Belastungen beansprucht.

Elektrische Verbindungen in einem KFZ-Bordnetz müssen auch bei niedrigen Betriebstemperaturen zuverlässig funktionieren, häufig wird eine Mindest-Betriebstemperatur von -40 °C gefordert [GÜN-02]. Aluminium und Kupfer besitzen einen unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (**Tabelle 3**), daher können stoffschlüssige Aluminium-Kupfer Verbindungen durch Temperaturwechsel insbesondere mechanisch altern. Beim Kaltstart eines Fahrzeugs im Winter kann es zu schnellen Temperaturänderungen im Bereich der Verbindungen kommen, wobei sich insbesondere Verbindungen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen durch Stromwärmeverluste zusätzlich erwärmen können. Der Einfluss von Temperaturwechseln auf die mechanische und elektrische Beständigkeit der Verbindungen wird untersucht. Für stoffschlüssige Multimaterialverbindungen ist insbesondere eine Alterung durch Interdiffusion möglich, wobei Interdiffusion bei hohen Temperaturen beschleunigt abläuft. Hochvoltleitungen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge sind grundsätzlich für einen Betriebstemperaturbereich von -40 °C bis $+180\text{ °C}$ spezifiziert, z.B. [LEO-12a]. Bei einer Multimaterial Schweißverbindung ist daher im Betriebstemperaturbereich Alterung durch Interdiffusion möglich. In einem Langzeitversuch wird die Auswirkung der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen auf die mechanische und elektrische Beständigkeit der Verbindungen untersucht. Mit einem Modell wird der Anteil der Komponenten einer Verbindung am Gesamtwiderstand der Verbindung ermittelt.

3.1 Modellverbindung

Eine Steckverbindung für ein KFZ-Bordnetz kann wie folgt aufgebaut sein: Der leitungsseitige Teil einer Steckverbindung besteht aus einer Hülse, in welche der komponentenseitige Teil der Verbindung eingesteckt werden kann (**Abbildung 15**, oben). Zum Anschweißen der Leitung verjüngt sich die Steckverbindung zu einer Schweißfahne, die eine ebene Auflagefläche für die Leitung bietet.

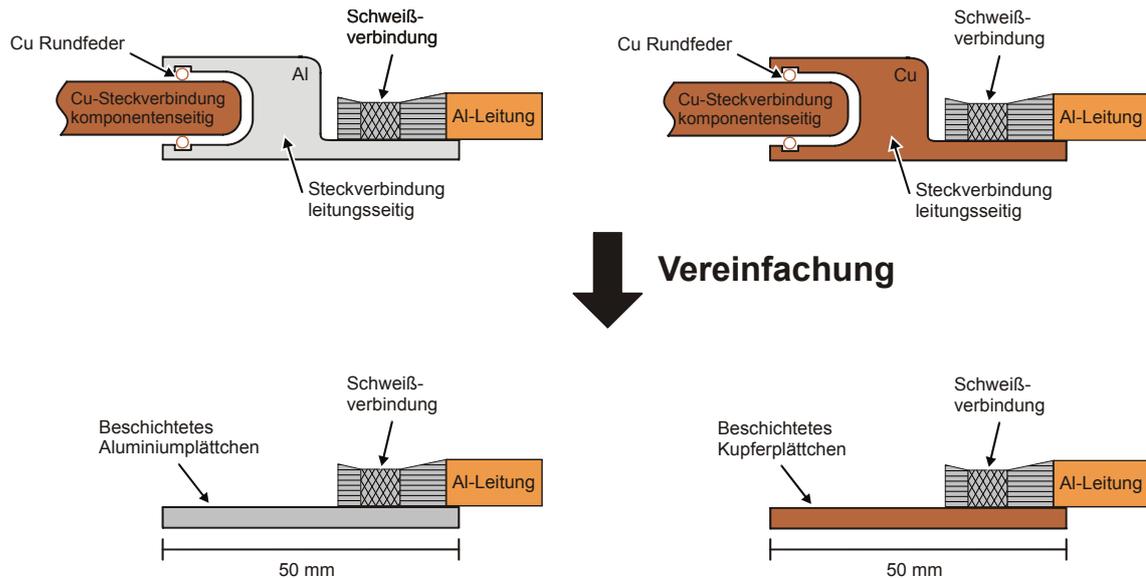


Abbildung 15: Modellverbindung zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Schweißverbindungen

Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Schweißverbindung ist die Hülse nicht erforderlich, daher werden Schweißverbindungen zwischen einer 85 mm² Aluminiumleitung und verschiedenen Kupfer- oder Aluminiumplättchen mit den Abmessungen 30 mm x 50 mm hergestellt (**Abbildung 15** unten).

In der Regel sind Steckverbinder für den Einsatz in KFZ-Bordnetzen beschichtet. Aus fertigungstechnischen Gründen ist immer auch die Schweißfahne mit einer Beschichtung überzogen, daher soll der Einfluss der Beschichtung auf die Langzeitstabilität der Schweißverbindungen untersucht werden. Als Schichtwerkstoff wird Silber eingesetzt. Für Stromschienenanwendungen ist Silber ein gebräuchlicher Schichtwerkstoff [SCH-09]. Bei der Verbindung von Aluminium- und Kupferstromschienen kann mit versilberten Kontaktteilen eine langzeitstabile Verbindung hergestellt werden, sofern die Aluminiumstromschiene zusätzlich mit einer Diffusionssperre aus Nickel beschichtet ist [SCH-09] (siehe Abschnitt 2.3.3). Weiterhin ist Silber aufgrund der hohen elektrischen und thermischen Beständigkeit für Hochstromanwendungen geeignet [VIN-02]. Bei laserstrahlgeschweißten Verbindungen zwischen Aluminium- und Kupferteilen wurde eine positive Auswirkung von Silber auf die Duktilität der Verbindungen nachgewiesen [MYS-04], [SAR-93] (siehe Abschnitt 2.6.2). Wird eine Aluminiumleitung mit dem Steckverbinder verschweißt, kommt die Leitung unabhängig vom gewählten Lösungsweg mit der Silberbeschichtung in Kontakt. Da Silber mit Aluminium intermetallische Phasen bildet, wird untersucht, welche Auswirkungen dies auf die Langzeitstabilität hat. Für den Lösungsweg „Materialübergang in der Schweißverbindung“ (**Abbildung 15**, rechts) werden Kupferplättchen aus der Legierung Cu-OF untersucht⁴, wobei sich die Art der Anbindung in Abhängigkeit des Schweißverfahrens unterscheidet.

⁴ Cu-OF ist eine sauerstofffreie Kupferlegierung mit der EN-Werkstoffbezeichnung CW008A, die gut schweißbar ist.

Im Falle des Lösungswegs „Materialübergang in der Steckverbindung“ muss eine Schweißverbindung zwischen einer Aluminiumleitung und einem beschichteten Aluminiumplättchen hergestellt werden (**Abbildung 15**, links). Es werden Ultraschallschweißverbindungen mit Aluminiumplättchen der Legierung EN AW-6082 untersucht. Für Verbindungen mit Aluminiumplättchen wird zur Vermeidung von Interdiffusion zwischen dem Aluminiumplättchen und der Silberbeschichtung eine Nickelzwischen-schicht als Diffusionssperre aufgebracht (**Abbildung 18**).

3.2 Prüflinge

Die Untersuchung der Langzeitstabilität erfolgt exemplarisch an den Schweißverfahren Ultraschallschweißen, Laserstrahlschweißen und Widerstandsschweißen, die in Abschnitt 2.6 beschrieben wurden.

Leitungen

Die untersuchten Aluminiumleitungen weisen einen Nennquerschnitt von 85 mm² auf und bestehen aus Reinaluminium (EN AW-1070A). Eine Leitung ist aus 419 Einzel-drähten aufgebaut. Hochvoltleitungen mit Silikonmantel für den Einsatz in KFZ-Bordnetzen sind grundsätzlich für einen Betriebstemperaturbereich von -40 °C bis +180 °C spezifiziert, z.B. [LEO-12a].

Ultraschallgeschweißte Verbindungen

Mittels Ultraschallschweißen kann die Aluminiumleitung direkt mit einem Aluminium- oder Kupferplättchen verschweißt werden (Abmessungen 30 mm x 50 mm, **Abbildung 16**). Der eingesetzte Ultraschallschweißapparat arbeitet mit einer Frequenz von 20 kHz. Ein Plättchen wird zusammen mit der Aluminiumleitung in den Schweißapparat eingelegt. Zunächst wird die Leitung von der Sonotrode mit einer Kraft von 3000 N auf das Plättchen gedrückt, dann beginnt der Schweißvorgang durch Aktivierung des Ultraschallgenerators. Die Amplitude der Auslenkung Sonotrode durch den Ultraschall beträgt 23 µm. Während des Schweißvorgangs wird die vom Ultraschallgenerator abgegebene Energie gemessen. Bei der Herstellung der Verbindungen wird der Schweißvorgang nach einer Energieabgabe von 7300 J beendet.

Da der Einfluss einer Silberbeschichtung auf die Langzeitstabilität untersucht werden soll, ist ein Teil der Kupferplättchen mit 3 µm bis 6 µm Silber beschichtet, ein anderer Teil ist unbeschichtet. Weiterhin werden ultraschallgeschweißte Verbindungen mit silberbeschichteten Aluminiumplättchen untersucht (**Tabelle 5**). Zwischen dem Aluminiumplättchen und der Silberbeschichtung wird eine Nickelschicht als Diffusionssperre eingesetzt.



Abbildung 16: *Ultraschallgeschweißte Verbindung zwischen einer Aluminiumleitung und einem versilberten Kupferplättchen*

Im Querschliff sind nach Beenden des Schweißprozesses die Einzeldrähte der Aluminiumleitung noch erkennbar (**Abbildung 17**). Beim Ultraschallschweißen findet eine Verdichtung der Einzeldrähte statt, dennoch verbleiben zwischen den Einzeldrähten der Verbindung Hohlräume. Für eine gute Kontaktierung der Einzeldrähte ist es erforderlich, dass diese untereinander elektrisch verbunden sind. Beim Ultraschallschweißen werden Oxidschichten und Verunreinigungen auf den Fügepartnern zerstört (siehe Abschnitt 2.6.1), somit kann beim Schweißprozess in der Schweißzone eine elektrisch leitende Verbindung zwischen den Einzeldrähten hergestellt werden, die sich berühren. Für Verbindungen mit beschichteten Plättchen ist in Schliffbildern erkennbar, dass es beim Schweißprozess nicht zu einem Durchreiben der Silberbeschichtung kommt, die unterste Schicht der Einzeldrähte wird mit der Silberschicht verschweißt (**Abbildung 18**). In Schliffbildern und mittels EDX-Analyse wird kein Hinweis auf eine Bildung von intermetallischen Phasen durch den Schweißprozess gefunden.



Abbildung 17: *Querschliff einer ultraschallgeschweißten Verbindung mit versilberten Kupferplättchen. Dicke der Silberschicht: 6 μm (hier nicht sichtbar)*

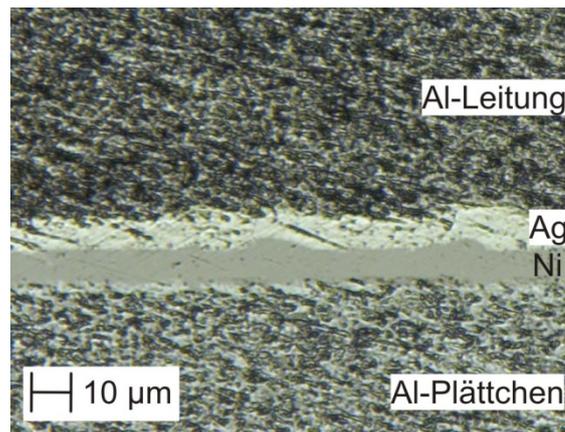


Abbildung 18: Querschliff einer ultraschallgeschweißten Verbindung mit versilberten Aluminiumplättchen mit Unternickelung. Schichtdicken jeweils 10 μm

Laserstrahlgeschweißte Verbindungen

Die Herstellung einer Verbindung zwischen einer Aluminiumleitung und einem Kupfer-Kontaktteil mittels Laserstrahlschweißen ist derzeit in der Literatur nicht beschrieben. Die Schweißverbindungen werden vom Bayerischen Laserzentrum in Erlangen angefertigt, bei der Herstellung wird wie folgt vorgegangen: Zunächst wird die Aluminiumlitze mit einer dünnen Aluminiumfolie umschlungen (**Abbildung 19**, oben rechts). Beim Schweißvorgang gehen die Einzeldrähte der Leitung in eine Schmelze über, wobei das Aluminium insbesondere aus dem Übergangsbereich zwischen der Leitung und dem Plättchen abfließt. Die so entstehende Verbindung wäre mechanisch instabil und würde im Übergangsbereich zwischen der Leitung und der Schmelze bereits bei geringen mechanischen Belastungen brechen. Durch den Einsatz der Aluminiumfolie kann der durch das Abfließen der Schmelze bedingte Volumenschwund im Übergangsbereich zwischen Plättchen und Leitung kompensiert werden. Die Leitung wird zusammen mit der Aluminiumfolie auf die Abmessungen 28 mm x 4,5 mm (B x H) flachgepresst und anschließend zusammen mit einem versilbertem Kupferplättchen (Abmessungen 30 mm x 50 mm) in eine Haltevorrichtung eingespannt (schematisch in **Abbildung 19**, oben). Um hohe lokale Temperaturbelastungen möglichst zu vermeiden, erfolgt eine Verschweißung auf einer möglichst großen Fläche, wobei Argon als Schutzgas eingesetzt wird. Der eingesetzte Dauerstrahl-Scheibenlaser besitzt eine Wellenlänge von 1030 nm, die Schweißverbindung wird im Tiefstrahlschweißverfahren hergestellt. Nach der Optimierung in Vorversuchen werden folgende Schweißparameter gewählt: Ein Fokussdurchmesser des Laserstrahls von 340 μm , und 10 Schweißlinien in einem Abstand von 1 mm (schematisch in Gelb in **Abbildung 19**, oben). Die Vorrückgeschwindigkeit des Laserstrahls beträgt im Bereich der Linienfüllung zwischen 2 m/min und 4 m/min. Zusätzlich wird eine Schweißlinie im Übergangsbereich zwischen Plättchen und Leitung platziert (schematisch in Rot in **Abbildung 19**, oben). Die Schweißzeit zum Herstellen der Verbindung beträgt 9 s.

Beim Laserstrahlschweißen bilden die Einzeldrähte der Aluminiumleitung eine Schmelze, sodass nach Beenden des Schweißprozesses in der Schweißzone keine Einzeldrähte mehr erkennbar sind (**Abbildung 19**, unten).

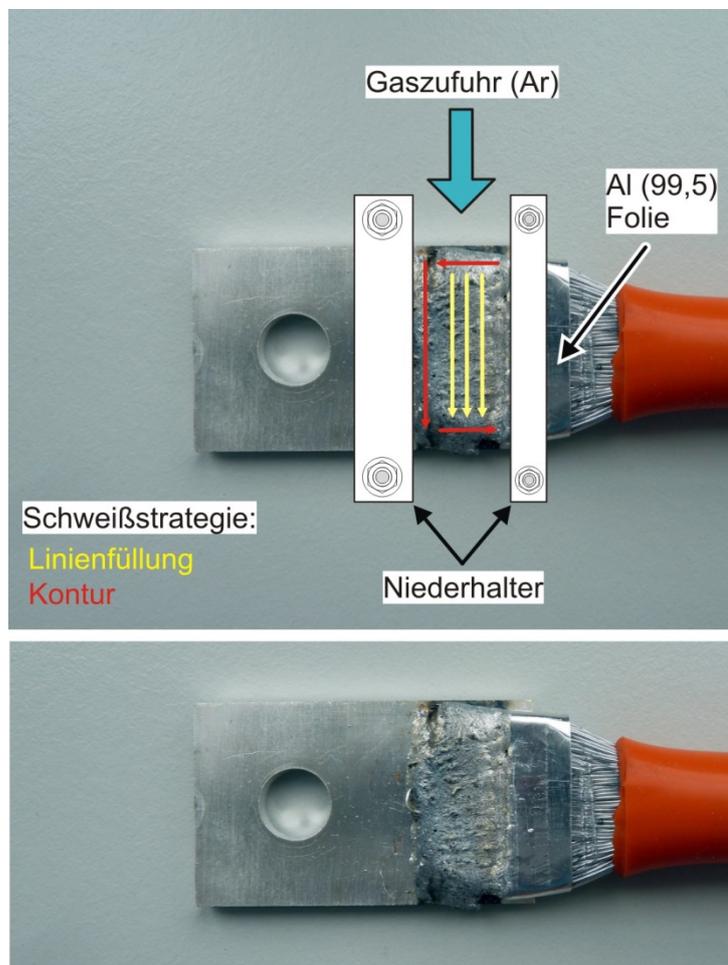


Abbildung 19: *Oben: Schematische Darstellung der Einspannvorrichtung beim Herstellen einer laserstrahlgeschweißten Verbindung. Unten: Laserstrahlgeschweißte Verbindung zwischen einer Aluminiumleitung und einem versilberten Kupferplättchen*

Widerstandsgeschweißte Verbindungen

Aufgrund des unterschiedlichen Schmelzpunkts von Aluminium und Kupfer ist es nicht möglich, eine Aluminiumleitung mittels Widerstandsschweißen direkt mit einem Kupferplättchen zu verbinden. Um ein Abfließen des Aluminiums aus der Schweißzone zu verhindern, wird eine silberbeschichtete Kupferhülse eingesetzt. Zum Aufbrechen der Fremdschicht auf den Einzeldrähten der Leitung dient ein nichtkorrosives Flussmittel auf Flouridbasis. Für das Verbinden der Kupferhülse mit der Aluminiumleitung wird das Heißcrimpverfahren eingesetzt. Als Haltevorrichtung während des Schweißvorgangs dient eine Kombination aus jeweils zwei Keramikbacken und Elektroden (**Abbildung 20**, links). Der verwendete Elektrodensatz besitzt eine Kontaktfläche zu den Fügepartnern mit den Abmessungen 17 mm x 10 mm.

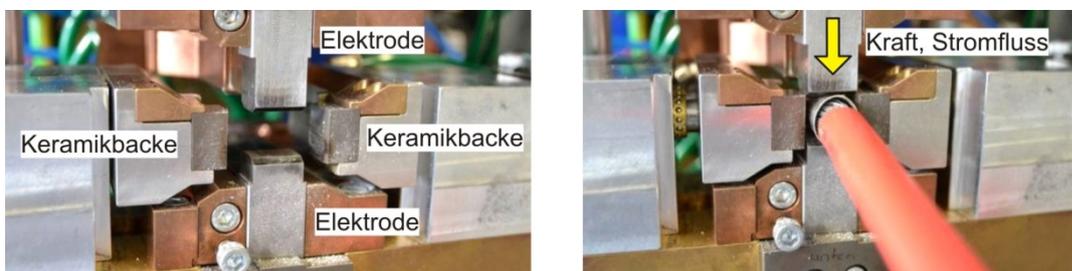


Abbildung 20: Links: Geöffnete Schweißvorrichtung, rechts: Schweißvorrichtung mit eingeführter Kupferhülse und Al-Leitung, Keramikbacken geschlossen. Quelle: Miyachi Werksfoto

Zunächst wird der Elektrodensatz zusammengefahren, bis er die Kupferhülse kontaktiert (**Abbildung 20**, rechts), dann beginnt der Schweißvorgang. Folgende Schweißparameter werden verwendet: Der Schweißstrom beträgt 35 kA, die maximale Presskraft der Elektroden 12 kN. Als Abschaltkriterium wird der Abstand zwischen den beiden Elektroden verwendet. Beträgt der Abstand zwischen den Elektroden 6,3 mm, wird der Schweißstrom abgeschaltet. Durch die Restwärme in der Verbindung erfolgt eine weitere Verpressung der Hülse auf eine Höhe von 6 mm. Es entsteht eine Verbindung mit einer rechteckigen Form (**Abbildung 21**, rechts). In einem weiteren Arbeitsschritt wird die flachgepresste Hülse mittels Hartlötens mit einem versilberten Kupferplättchen verbunden (**Abbildung 21**, links). Die Hartlötverbindung dient ausschließlich der Bestromung der Heißcrimpverbindung und wird im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich ihres Alterungsverhaltens nicht näher untersucht. In Schliffbildern und mittels EDX-Analyse wird kein Hinweis auf Bildung von intermetallischen Phasen in der Crimpzone gefunden. Beim Heißcrimpprozess bleibt die Struktur der Einzeldrähte erhalten, im Bereich der Schweißzone werden die Einzeldrähte verformt (**Abbildung 22**).

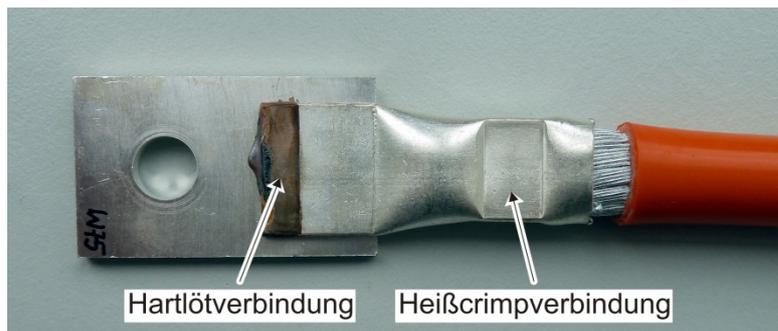


Abbildung 21: *Widerstandsgeschweißte Verbindung zwischen einer Aluminiumleitung und einem versilberten Kupferplättchen*

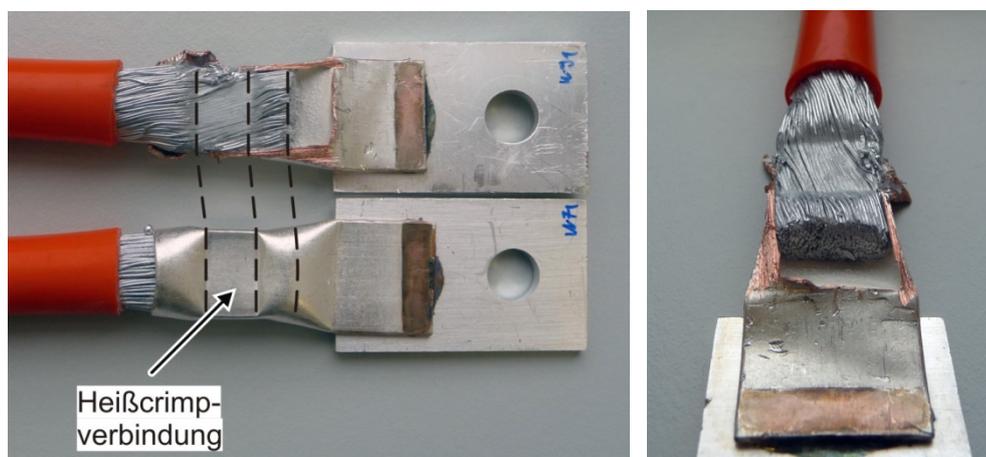


Abbildung 22: *Heißscrimpverbindung einer widerstandsgeschweißten Verbindung (links unten) und nach Entfernen des oberen Teils der Kupferhülse (links oben, rechts)*

Insbesondere in den Ecken der Kupferhülse erfolgt eine gute Verbindung der Einzeldrähte mit der Hülse (**Abbildung 23**). Im mittleren Bereich der Verbindung existiert an einigen Stellen ein Spalt zwischen der Hülse und den Einzeldrähten. Einige Einzeldrähte im mittleren Bereich der Verbindung sind nur geringfügig verformt und haben nur eine kleine Kontaktfläche zu benachbarten Einzeldrähten (**Abbildung 23**, unten).

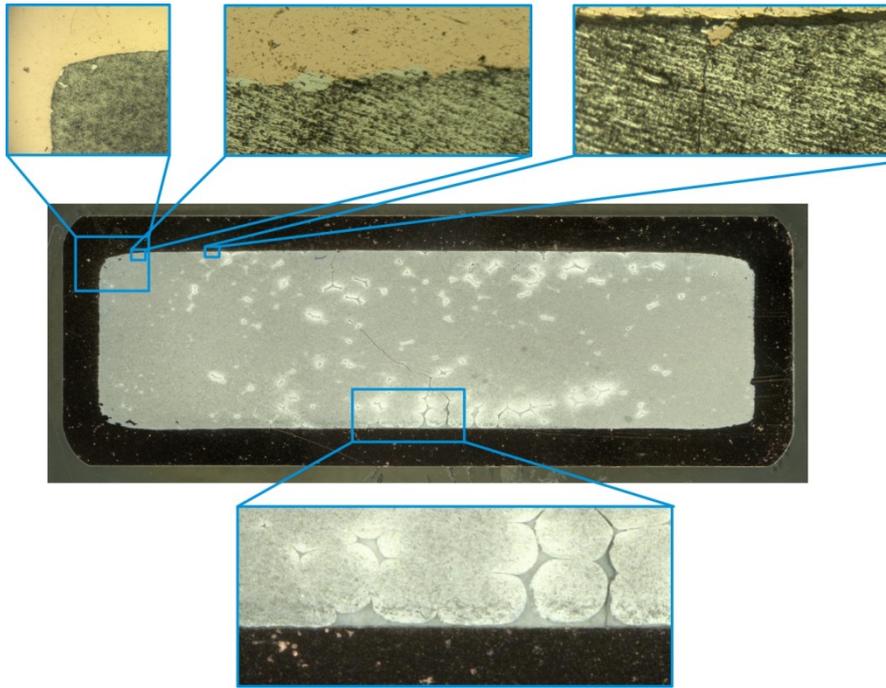


Abbildung 23: *Querschliff einer unbelasteten widerstandsgeschweißten Verbindung, stellenweise mit Hohlräumen zwischen Kupferhülse und Einzeldrähten*

Für alle Schweißverfahren erfolgt die Untersuchung der Langzeitstabilität an Doppelverbindungen, wobei auf jeder Seite der Aluminiumleitung eine Schweißverbindung mit einem Plättchen hergestellt wird (**Abbildung 24**). Die Länge der Leitungsstücke beträgt 240 mm, sie wurde gewählt, damit die Verbindungen hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens in einem Wärmeofen untersucht werden können. Um die Verbindungen bestromen zu können sind alle Plättchen mit einer Bohrung versehen, über die eine Schraubverbindung zu einer Stromschiene oder einem Kabelschuh hergestellt werden kann.

Die untersuchten Schweißverfahren und Beschichtungsdicken der Plättchen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Im Folgenden werden die Verbindungen wie in Tabelle 5 angegeben bezeichnet.



Abbildung 24: Von oben nach unten: Widerstandsgeschweißte, ultraschallgeschweißte und laserstrahlgeschweißte Doppelverbindung

Tabelle 5: Schweißverfahren, Legierungen und Schichtdicken der Plättchen der zu untersuchenden Verbindungen

Schweißverfahren	Legierung Plättchen	Schichtdicken	Bezeichnung in dieser Arbeit
Ultraschallschweißen	EN AW-6082	10 µm Nickel, 10 µm Silber	US-Al-10µ
Ultraschallschweißen	EN AW-6082	5 µm Nickel, 5 µm Silber	US-Al-5µ
Ultraschallschweißen	Cu-OF	3 µm bis 6 µm Silber	US-Cu-6µ
Ultraschallschweißen	Cu-OF	unbeschichtet	US-Cu-0µ
Laserstrahlschweißen	Cu-OF	3 µm bis 6 µm Silber	Laserstrahlschweißen
Widerstandsschweißen	Cu-OF	3 µm bis 6 µm Silber	Widerstandsschweißen

3.3 Methoden und Prüfverfahren zur Bewertung der Alterung

Um eine mögliche Alterung der Schweißverbindung bewerten zu können, werden vor, während und nach den durchgeführten Versuchen verschiedene Methoden und Prüfverfahren angewendet, die im Folgenden vorgestellt werden.

3.3.1 Bestimmen des Gesamtwiderstands der Doppelverbindungen

Die Bewertung der Alterung über die Widerstandsänderung ist eine gebräuchliche Methode (siehe Kapitel 2). Durch Untersuchungen des Verbindungswiderstands von Seilleiterverbindungen von Freileitungen ist bekannt, dass es beim Spannungsabgriff zwischen einem Seildraht und der Verbindungsklemme zu erheblichen Messfehlern bei der Widerstandsmessung kommen kann [SCH-08a]. Grund ist, dass die Verteilung des Messstroms über die einzelnen Seildrähte inhomogen sein kann, selbst wenn dieser in einiger Entfernung eingespeist wird. Die Widerstände zwischen den einzelnen Seildrähten können so groß sein, dass sich selbst nach einigen Metern keine homogene Aufteilung des Messstroms über alle Seildrähte ergibt. Bei Freileitungsseilen kann zur Messung des Verbindungswiderstands als Potenzialausgleich ein Drahring aus Kupfer an dem Leiterseil angebracht werden [SCH-08a]. Diese Methode führte bei der untersuchten Aluminiumleitung nicht zu reproduzierbaren Ergebnissen. Die untersuchte Aluminiumleitung besteht aus 419 Einzeldrähten, vermutlich ist mit dieser Methode kein Potenzialausgleich bei der großen Anzahl an Einzeldrähten möglich. Daher wird im Rahmen der Versuche der Gesamtwiderstand einer Doppelverbindung vor, nach und teilweise auch während der Versuche gemessen. Durch einen Vergleich des Widerstands bei Raumtemperatur vor und nach der Belastung sowie einer Bewertung des Verlaufs des Widerstands während der Belastung werden Rückschlüsse auf die Langzeitstabilität der Schweißverbindungen gezogen. Bei der Messung des Gesamtwiderstands werden die Doppelverbindungen einzeln oder in Serie bestromt, wobei der Spannungsabfall über einer Doppelverbindung gemessen wird.

Für ultraschall- und laserstrahlgeschweißte Verbindungen erfolgt der Spannungsabgriff zur Messung des Gesamtwiderstands in einem Abstand von 2,5 cm vom leitungsseitigen Plättchenrand (**Abbildung 25**).



Abbildung 25: *Spannungsabgriff zur Bestimmung des Gesamtwiderstands bei laserstrahl- und ultraschallgeschweißten Verbindungen*

Da im Falle der widerstandsgeschweißten Verbindungen das Alterungsverhalten der hartgelöteten Verbindung nicht bewertet wird, erfolgt der Spannungsabgriff jeweils am äußeren Rand der Schweißzone (**Abbildung 26**).



Abbildung 26: *Spannungsabgriff zur Bestimmung des Gesamtwiderstands bei widerstandsgeschweißten Verbindungen*

3.3.2 Bestimmen der Verbindungstemperatur

Steigt während der Belastung der Verbindungswiderstand, hat dies bei gleichzeitiger Bestromung der Verbindungen einen Anstieg der Verbindungstemperatur zur Folge. Daher kann auch über die Verbindungstemperatur einer bestromten Verbindung ein Rückschluss auf eine mögliche Alterung gezogen werden. Die Temperaturen der Verbindungen werden während der Versuche jeweils in der Mitte der Schweißverbindungen gemessen (**Abbildung 27**, **Abbildung 28**).



Abbildung 27: *Temperaturmessstellen zur Bestimmung der Verbindungstemperatur für ultraschall- und laserstrahlgeschweißte Verbindungen*



Abbildung 28: *Temperaturmessstellen zur Bestimmung der Verbindungstemperatur für widerstandsgeschweißte Verbindungen*

3.3.3 Ermitteln der Strombelastbarkeit

Zur Ermittlung der Strombelastbarkeit von elektrisch-mechanischen Bauelementen wird die Strombelastbarkeit nach [DIN 60512-5-2], Prüfung 5b ermittelt. Das Verfahren wird auch als Derating-Messung bezeichnet. Aus der Derating-Kurve kann die maximale Strombelastbarkeit des untersuchten elektrischen Betriebsmittels in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur abgelesen werden (**Abbildung 29**).

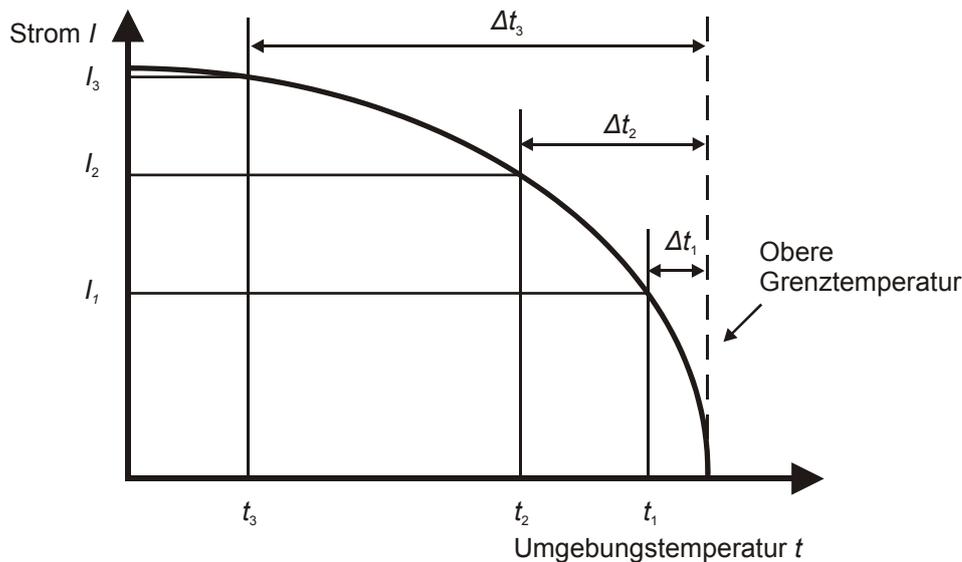


Abbildung 29: Struktur der Basis-Strombelastbarkeitskurve.
Reproduziert nach [DIN 60512-5-2]

Zur Ermittlung der Basis-Strombelastbarkeitskurve ist folgendes Vorgehen vorgeschrieben [DIN 60512-5-2]:

Es wird zunächst die durch die thermische Belastbarkeit der verwendeten Werkstoffe gegebene obere Grenztemperatur als vertikale Gerade in ein lineares Koordinatensystem mit dem Strom I als Ordinate und der Temperatur als Abszisse eingetragen (**Abbildung 29**). Danach wird der stationäre Endwert der Temperatur t_b an der annähernd heißesten Stelle des Prüflings für mindestens drei verschiedene Stromstärken gemessen. In dieser Arbeit erfolgt die Messung an den in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Messstellen. Es wird die Differenz Δt der Prüflingstemperatur und der Umgebungstemperatur t_u gebildet. Die Differenz Δt ist die Eigenerwärmung, die durch die Strombelastung hervorgerufen wird. Die Differenzen $\Delta t_{1..n}$ werden von der oberen Grenztemperatur abgezogen. Hieraus resultiert eine Umgebungstemperatur $t_{1..n}$, bei welcher der Prüfling unter zugehöriger Strombelastung $I_{1..n}$ genau die obere Grenztemperatur erreicht. Durch Interpolation der gemessenen Werte zu einer Kurve ergibt sich die Basis-Strombelastbarkeitskurve (**Abbildung 29**).

Aus der Basis-Strombelastbarkeitskurve kann eine korrigierte Strombelastbarkeitskurve (Derating-Kurve) abgeleitet werden. Zur Berücksichtigung von Exemplarstreuungen sowie Unsicherheiten bei der Temperaturmessung und der Messanordnung wird ein Korrekturfaktor auf die Basis-Strombelastbarkeitskurve angewendet. Sofern nicht anders festgelegt, wird ein Reduktionsfaktor von 0,8 auf den Wert des Stroms der Basis-kurve angewendet [DIN 60512-5-2] (**Abbildung 30**).

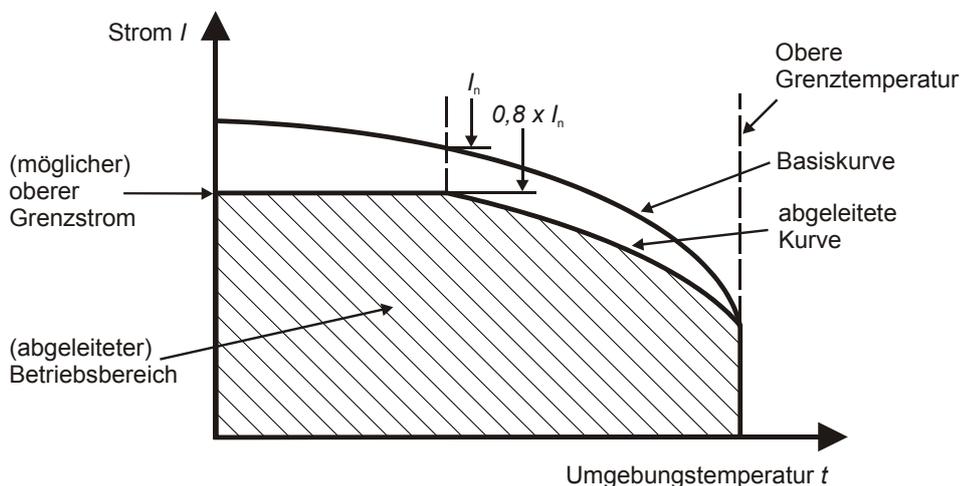


Abbildung 30: Strombelastbarkeitskurve abgeleitet von der Basiskurve.
Reproduziert nach [DIN 60512-5-2]

3.3.4 Schälversuche

Zur Bewertung der mechanischen Festigkeit der ultraschall- und laserstrahlgeschweißten Verbindungen werden Schälversuche durchgeführt. Hierbei wird das Plättchen eingespannt, die Leitung wird um 90 ° gebogen und ebenfalls eingespannt (**Abbildung 31**). Anschließend wird die Leitung senkrecht zur Schweißfläche mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 mm/min gezogen. Die Versuche werden im Prüflabor der Firma Rosenberger durchgeführt.

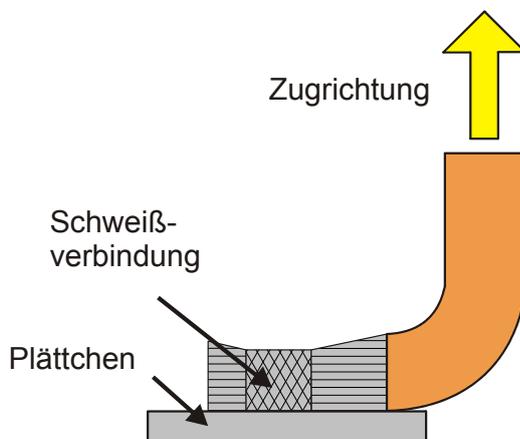


Abbildung 31: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung eines Schälversuchs

Die zum Ziehen benötigte Kraft in N wird über der zurückgelegten Wegstrecke in einem Diagramm aufgetragen (**Abbildung 32**). Über die maximal aufgewendete Kraft können Rückschlüsse auf die mechanische Festigkeit der Schweißverbindungen gezogen werden. Es existiert derzeit keine Norm für die Durchführung eines Schälversuchs mit Leitungen, jedoch sind Prüfverfahren für die Durchführung von Schälversuchen mit Klebstoffen und Klebeverbindungen genormt [DIN EN 1464], [DIN 54461].

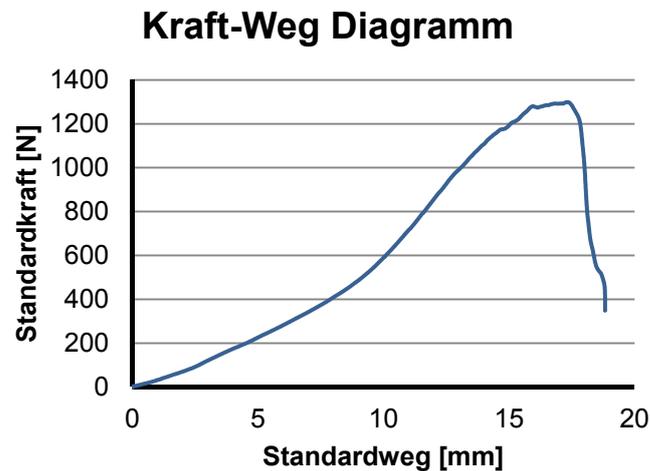


Abbildung 32: *Kraft-Weg Diagramm des Schälversuchs einer ultraschallgeschweißten Verbindung*

Wie in diesen Normen wird die gemessene Schälkraft im Folgenden auf die Prüflingsbreite bezogen. Es wird der Quotient aus der maximalen zum Ziehen benötigten Kraft und der Prüflingsbreite ausgewertet. Dieser Quotient wird im Folgenden als bezogene Schälkraft bezeichnet. Für ultraschallgeschweißte Verbindungen wird die maximale Zugkraft auf die Breite der Schweißverbindungen von 26,3 mm bezogen. Um die laserstrahlgeschweißten Verbindungen in die Zugprüfmaschine einspannen zu können, wurde die Schmelze seitlich abgefräst (**Abbildung 33**). Die gemessenen Schälkräfte werden auf die Breite der gefrästen Verbindung von 26 mm bezogen.



Abbildung 33: *Seitlich abgefräste laserstrahlgeschweißte Verbindung vor der Durchführung eines Schälversuchs*

3.3.5 Zugversuche

Für die widerstandsgeschweißten Verbindungen würde ein Schälversuch keine Aussagekräftigen Ergebnisse liefern, da die Litze mit einer starren Hülse verschweißt ist (siehe auch **Abbildung 21**). Daher werden mit den widerstandsgeschweißten Verbindungen Zugversuche im Labor der Firma Rosenberger durchgeführt. Hierzu wird eine Doppelverbindung jeweils über der Hartlötverbindung in Spannbacken fest eingespannt (**Abbildung 34**). So ist sichergestellt, dass die Zugfestigkeit der Hartlötverbindung nicht mitgeprüft wird. Die Zuggeschwindigkeit beträgt 50 mm/min waagrecht zur Hülse. Wie bei dem Schälversuch wird die zum Ziehen benötigte Kraft über der zurückgelegten Wegstrecke aufgezeichnet. Auch bei einem Zugversuch können über die maximal aufgewendete Kraft Rückschlüsse auf die mechanische Festigkeit der Verbindungen gezogen werden.

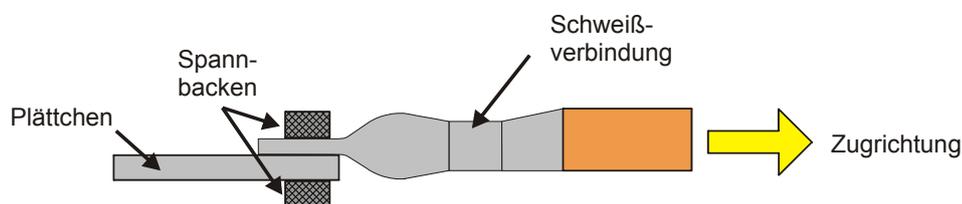


Abbildung 34: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung eines Zugversuchs

3.3.6 EDX-Analyse

Mittels EDX-Analyse soll eine mögliche Bildung von intermetallischen Phasen durch den Schweißprozess oder die Alterung in der Schweißzone analysiert werden. Hierzu wird ein qualitativer Linescan über einen Querschliff der Schweißzone angefertigt (**Abbildung 35, Tabelle 6**). Die Aufnahmen werden im Labor der Firma Rosenberger angefertigt. Aufgrund der Messunsicherheit des EDX-Detektors wird immer eine Überlappung der Elemente gemessen [SCH-08b], daher wird die Änderung des Überlappungsbereichs vor und nach den untersuchten Belastungen ausgewertet. Weiterhin wird die Elementzusammensetzung an ausgewählten Punkten quantitativ untersucht.

Tabelle 6: Mittels EDX-Analyse untersuchte Überlappung der Elemente in der Schweißzone der Verbindungen

Schweißverfahren	Überlappung Elemente
US-Al-10 μ	Silber / Aluminium
US-Al-5 μ	Silber / Aluminium
US-Cu-6 μ	Silber / Aluminium
US-Cu-0 μ	Kupfer / Aluminium
Widerstandsschweißen	Silber / Aluminium

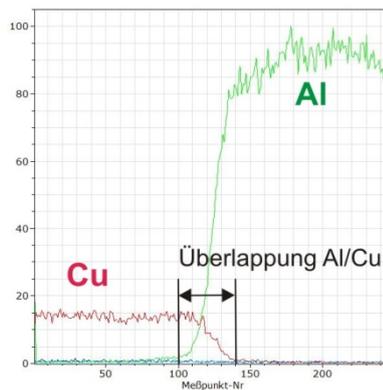


Abbildung 35: *Qualitativer Linescan in der EDX-Analyse einer unbelasteten Verbindung der Variante US-Cu-0µ. Da es sich um einen qualitativen Linescan handelt, ist die Ordinate einheitenlos und beliebig skaliert*

3.4 Modellierung der Komponenten des Gesamtwiderstandes einer Doppelverbindung

Eine Doppelverbindung besteht aus den Komponenten Plättchen, zwei Schweißverbindungen und der Aluminiumleitung. Mit einem Modell werden der Widerstand der einzelnen Komponenten und der Gesamtwiderstand der Doppelverbindung ermittelt. Hierzu werden die Doppelverbindungen jeweils bis zum Messpunkt des Spannungsabgriffs modelliert (siehe Abschnitt 3.3.1). Im Modell wird angenommen, dass im Bereich der Schweißverbindung eine elektrisch leitende Kontaktierung über die gesamte scheinbare Verbindungsfläche erfolgt: $A_c = A_a$ (siehe auch Abschnitt 2.1.2). Die im Modell ermittelten Widerstandswerte sind somit als theoretischer unterer Grenzwert zu verstehen. Durch einen Vergleich mit Messwerten wird die Abweichung des Verbindungswiderstands der Schweißverbindungen von diesem unteren Grenzwert bewertet. Weiterhin erfolgt eine Bewertung des Anteils der Schweißverbindungen am Gesamtwiderstand.

Leitfähigkeit der Leitermaterialien

Die Aluminiumleitung besteht aus Reinaluminium, dessen spezifische elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C 37,7 S·m/mm² beträgt (**Tabelle 7**). Die Leitung mit einem Nennquerschnitt von 85 mm² ist aus 419 Einzeldrähten aufgebaut. Der Widerstandsbelag der Aluminiumleitung wird im Datenblatt mit maximal 0,368 µΩ/mm angegeben, der reale Widerstandsbelag der Leitung darf diesen Wert nicht überschreiten. Der Widerstandsbelag der untersuchten Leitung wird durch Widerstandsmessungen mit einem Mikroohmmeter an insgesamt fünf Doppelverbindungen gemessen: An jeweils einer Doppelverbindung aller vier Varianten der ultraschallgeschweißten Verbindungen (**Tabelle 5**) und an einer laserstrahlgeschweißten Verbindung. Der Spannungsabgriff erfolgt am leitungsseitigen Ende der Schweißverbindungen (**Abbildung 36**).

Da in der Schweißverbindung alle Einzeldrähte der Leitung kompakt vorliegen (Ultraschallschweißen) oder in eine Schmelze übergehen (Laserstahlschweißen) ist am leitungsseitigen Ende der Schweißverbindung ein Spannungsabgriff möglich. Der Mittelwert des gemessenen Widerstandsbelags der Aluminiumleitung beträgt $0,356 \mu\Omega/\text{mm}$. Dieser Wert wird in den Modellen für das Leitungsstück zwischen zwei Schweißverbindungen verwendet.



Abbildung 36: Spannungsabgriff zur experimentellen Bestimmung des Widerstandsbelags der Leitung

Die Plättchen der Varianten US-Al bestehen aus der Aluminiumlegierung EN AW-6082 im Zustand warm ausgehärtet. Der Hersteller gibt eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von $26 \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ bis $29 \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ an (**Tabelle 7**). Auf einem Aluminiumplättchen wird der Widerstand in einem Abstand von 10 mm gemessen (**Abbildung 37**), und anschließend der Mittelwert aus 10 Messwerten gebildet. Aus den Messwerten wird die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Plättchen zu $27,2 \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ bestimmt. Dieser Wert wird in den folgenden Berechnungen verwendet. Für die Schweißverbindungen mit Kupferplättchen wird die Legierung Cu-OF eingesetzt, die laut Datenblatt eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von $58 \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ aufweist (**Tabelle 7**). Die Kupferhülsen der widerstandsgeschweißten Verbindungen bestehen aus Cu-DHP (CW024A).

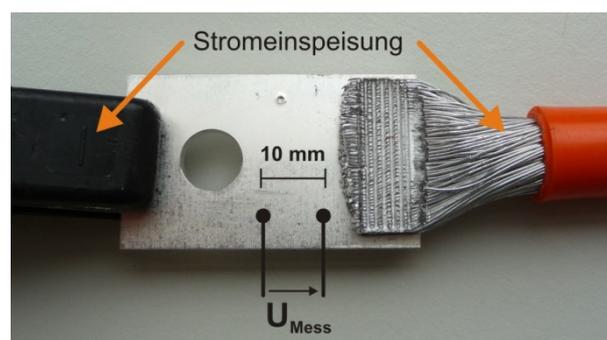


Abbildung 37: Spannungsabgriff zur experimentellen Bestimmung der Leitfähigkeit der Aluminiumplättchen

Tabelle 7: Spezifische elektrische Leitfähigkeit der Leitermaterialien der Doppelverbindungen und Widerstand der Aluminiumleitung bei 20 °C

Werkstoff	Spez. el. Leitfähigkeit [S·m/mm ²]	Leiterwiderstand [μΩ/mm]	Quelle
Reinaluminium	37,7		[VIN-02]
EN AW-6082 warm ausgehärtet	26 - 29		[GEM-13a]
EN AW-6082 Plättchen gemessen	27,2		
Cu-OF	58		[GEM-13b]
Cu-DHP	43		[KUP-13]
85 mm ² Leitung, maximal		0,368	[LEO-12b]
85 mm ² Leitung, gemessen		0,356	

3.4.1 Ultraschallgeschweißte und laserstrahlgeschweißte Verbindungen

Der Spannungsabgriff zur Bestimmung des Gesamtwiderstands erfolgt für die ultraschall- und laserstrahlgeschweißten Verbindungen in einem Abstand von 2,5 cm vom jeweils inneren Plättchenrand (**Abbildung 25**). Für die Ermittlung des Widerstands von Plättchen, Schweißverbindung und Leitung werden die Komponenten der Doppelverbindung in Quader unterteilt, die im Schnittbild als Flächen erscheinen (**Abbildung 38**).

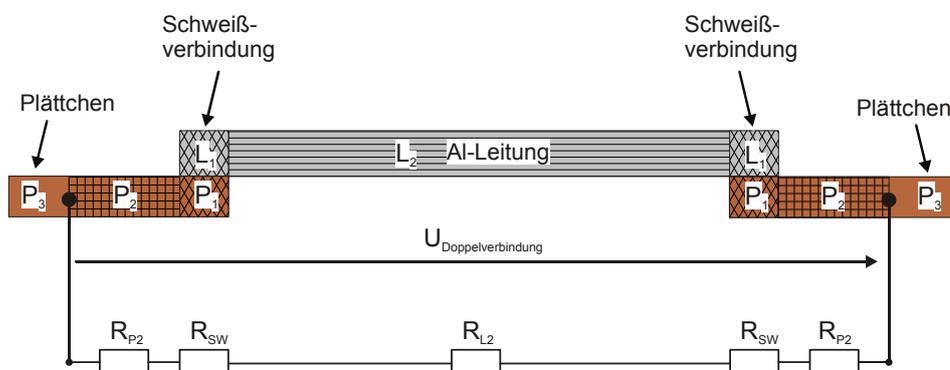


Abbildung 38: Modellierung der ultraschall- und laserstrahlgeschweißten Doppelverbindungen

Vereinfachend wird angenommen, dass die Schweißverbindung aus der Überlappungsfläche zweier Quader besteht, wobei der Einfluss der Beschichtung vernachlässigt wird: Ein quaderförmiges Teilvolumen des Plättchens P_1 wird von der verschweißten Aluminiumleitung mit dem quaderförmigen Teilvolumen L_1 überdeckt. Die Schweißzone befindet sich zwischen P_1 und L_1 . Insgesamt wird das Plättchen in drei Teilvolumina unterteilt (**Abbildung 38**, **Abbildung 39**): In P_1 , ein an P_1 angrenzendes Volumen P_2 , welches durch den Messpunkt zum Spannungsabgriff begrenzt wird und ein für die Modellierung nicht relevantes Restvolumen P_3 . Die Leitung wird an beiden Enden durch die Überlappungsvolumina mit den Plättchen L_1 modelliert, das restliche Volumen der Leitung wird mit L_2 bezeichnet.

Für die Varianten US-Cu und Laserstrahlschweißen besteht der Quader L_1 aus Aluminium und der Quader P_1 aus Kupfer, daher besitzen die Quader eine unterschiedliche Leitfähigkeit. Weiterhin sind die Seitenflächen der Quader P_1 und L_1 für ultraschallgeschweißte Verbindungen an den Berührflächen nicht gleich groß, da sich die Schweißverbindung nicht über die gesamte Plättchenbreite erstreckt (**Abbildung 37**). Aus diesen Gründen kann die Widerstandskomponente R_{SW} nicht händisch berechnet werden. Zur Berechnung des Verbindungswiderstands werden daher mit dem Programm Comsol Multiphysics 4.4 Modelle der Doppelverbindungen für eine Finite Elemente Simulation erstellt.

FEM Modell der ultraschallgeschweißten Verbindungen

Die Modellierung der Volumina P_1 und P_2 des Plättchens sowie der Leitung im Bereich L_1 erfolgt gemäß den Abmessungen eines Prüflings (**Abbildung 39**, **Tabelle 8**, **Tabelle 9**). Das Leitungsstück L_2 wird durch ein Metallvolumen modelliert, dessen Leitfähigkeit in den Modellen so angegeben wird, dass sie dem gemessenen Widerstandsbelag der Leitung pro Längeneinheit von $0,356 \mu\Omega/\text{mm}$ entspricht.

Zur Ermittlung des Widerstands werden die Doppelverbindungen in der Simulation mit einem Gleichstrom von 100 A beaufschlagt. Die Stromspeisung erfolgt an den jeweils äußeren Rändern der Volumina P_2 mit konstanter Stromdichte über die Stirnflächen (**Abbildung 39**). Dies ist durch die Randbedingungen $U = 0 \text{ V}$ und $I = 100 \text{ A}$ modelliert. Die Abmessungen der Metallvolumen sind für die Varianten US-Al und US-Cu identisch, die Leitfähigkeiten werden nach Tabelle 8 und Tabelle 9 modelliert.

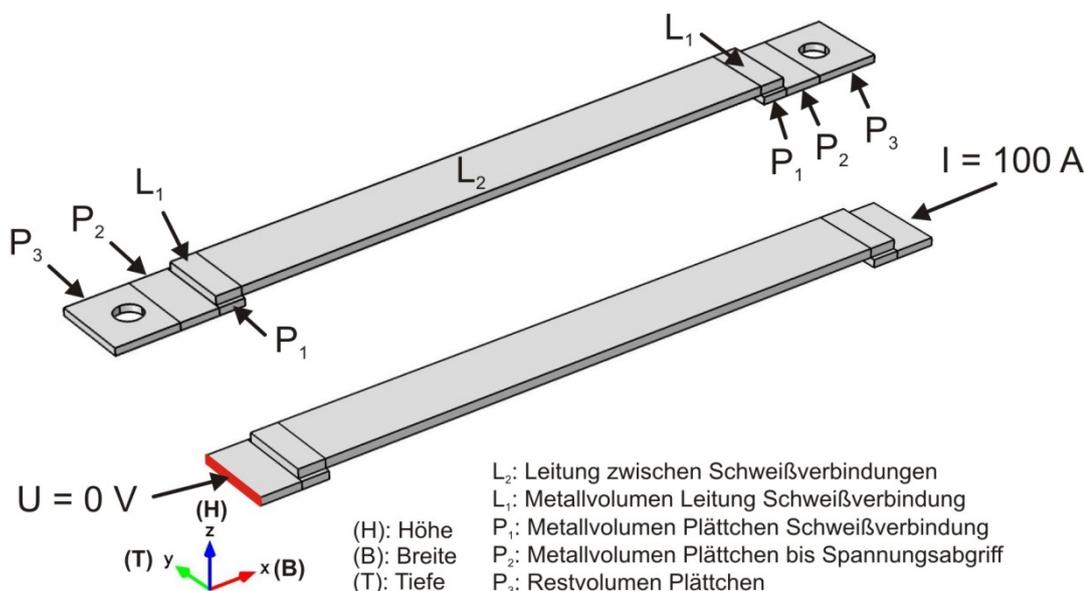


Abbildung 39: Modellierung einer ultraschallgeschweißten Verbindung durch Metallquader. Oben: Plättchen mit Loch, unten: Vereinfachtes Modell mit Randbedingungen

Tabelle 8: *Abmessungen und Leitfähigkeiten der Komponenten im Modell US-Cu*

Komponente	Material	Abmessung Modell B x H x T [mm]	Leitfähigkeit für Modell [$S \cdot m/mm^2$]
Leitung L1	Reinaluminium	10 x 3,5 x 26,3	37,7
Leitung L2	Reinaluminium	217 x 3,5 x 26,3	30,5
Plättchen P1	Cu-OF	10 x 3 x 30	58,0
Plättchen P2	Cu-OF	15 x 3 x 30	58,0

Tabelle 9: *Abmessungen und Leitfähigkeiten der Komponenten im Modell US-Al*

Komponente	Material	Abmessung Modell B x H x T [mm]	Leitfähigkeit für Modell [$S \cdot m/mm^2$]
Leitung L1	Reinaluminium	10 x 3,5 x 26,3	37,7
Leitung L2	Reinaluminium	217 x 3,5 x 26,3	30,5
Plättchen P1	EN AW-6082	10 x 3 x 30	27,2
Plättchen P2	EN AW-6082	15 x 3 x 30	27,2

FEM Modell der laserstrahlgeschweißten Verbindungen

Für die laserstrahlgeschweißten Verbindungen werden die Abmessungen und Leitfähigkeiten gemäß Tabelle 10 modelliert. Wie beim Modell der ultraschallgeschweißten Verbindungen erfolgt die Stromeinspeisung am jeweils äußeren Rand der Volumina P_2 mit konstanter Stromdichte über die Stirnflächen (**Abbildung 39**).

Tabelle 10: *Abmessungen und Leitfähigkeiten der Komponenten im Modell der laserstrahlgeschweißten Verbindungen*

Komponente	Material	Abmessung Modell B x H x T [mm]	Leitfähigkeit für Modell [$S \cdot m/mm^2$]
Leitung L1	Reinaluminium	12 x 4,5 x 30	37,7
Leitung L2	Reinaluminium	212 x 4,5 x 30	20,8
Plättchen P1	Cu-OF	12 x 3 x 30	58,0
Plättchen P2	Cu-OF	6 x 3 x 30	58,0

Ergebnisse der Simulation

Die Widerstände der Komponenten Plättchen R_{P2} , der Schweißverbindung R_{SW} , des Leitungsstücks zwischen den Plättchen R_{L2} sowie der Widerstand des gesamten Prüflings R_{ges} werden aus dem Spannungsabfall im Simulationsmodell ermittelt (**Tabelle 11**). Der Anteil der beiden Schweißverbindungen am Gesamtwiderstand X_{2SW} ist für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Kupferplättchen am niedrigsten und beträgt 3,7 %.

Für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Aluminiumplättchen beträgt der Anteil der beiden Schweißverbindungen am Gesamtwiderstand im Modell 4,9 %. Für die laserstrahlgeschweißten Verbindungen liegt der Anteil zwischen diesen beiden Werten. Der Betrag der Stromdichte ist über die Breite der Schweißverbindung in allen Modellen konstant (**Abbildung 40**).

Tabelle 11: *In der Simulation ermittelte Komponenten des Verbindungswiderstands und Anteil beider Schweißverbindungen am Gesamtwiderstand einer Doppelverbindung X_{2SW}*

Schweißverfahren	R_{P2} [$\mu\Omega$]	R_{SW} [$\mu\Omega$]	R_{L2} [$\mu\Omega$]	R_{ges} [$\mu\Omega$]	X_{2SW} [%]
US-Al-5 μ /10 μ	6,12	2,31	77,25	94,11	4,9
US-Cu-0 μ /6 μ	2,87	1,59	77,25	86,18	3,7
Laserstrahlschweißen	1,15	1,55	75,47	80,86	3,8

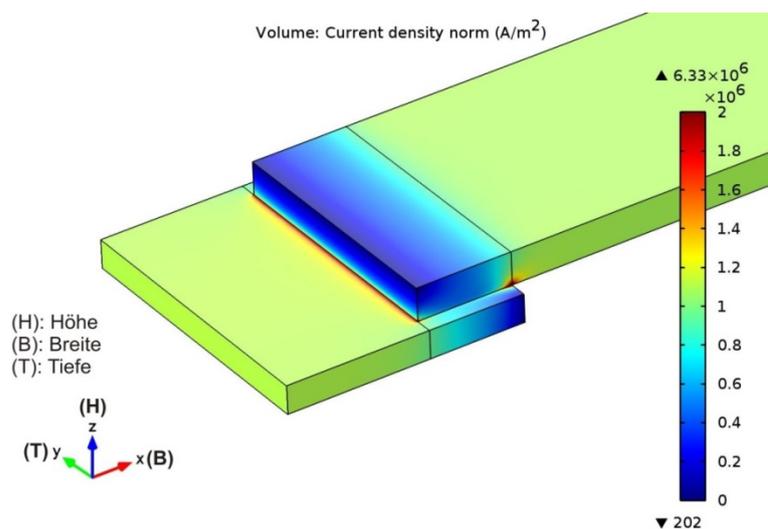


Abbildung 40: *Stromdichte in einer Schweißverbindung im 3D Modell US-Al*

Vergleich der Werte der Simulation mit Messwerten

Die in der Simulation ermittelten Widerstandswerte werden mit Messwerten verglichen. Hierzu werden die Widerstände der einzelnen Komponenten sowie der Gesamtwiderstand an je fünf Doppelverbindungen pro Variationsparameter nach Tabelle 5 gemessen. Für die Messung wird ein Mikroohmmeter für eine Vierleitermessung verwendet, die Bestromung der Plättchen erfolgt über eine Klemmverbindung im Bereich P_3 jeweils an der Seite gegenüber der Schweißverbindung (**Abbildung 41**). Mit der Klemmverbindung zur Bestromung wird das Plättchen an jeweils zwei Punkten auf der Ober- und Unterseite kontaktiert. Das 3D-Modell der Doppelverbindungen wird um das Plättchen im Bereich P_3 erweitert, um den Einfluss der Kontaktierung mit einer Klemmverbindung auf die gemessenen Widerstandskomponenten zu überprüfen.

Die Kontaktpunkte der Klemmverbindung werden als Zylinder mit einem Radius von einem Millimeter modelliert (**Abbildung 42**). In dem erweiterten Modell werden die Widerstandskomponenten von der Schweißverbindung sowie P_2 und L_2 ermittelt. Die Differenz der ermittelten Widerstandskomponenten des erweiterten und des ursprünglichen Modells ist kleiner als $0,5 \text{ n}\Omega$, somit hat die Bestromung mit der Klemmverbindung einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Messergebnis.

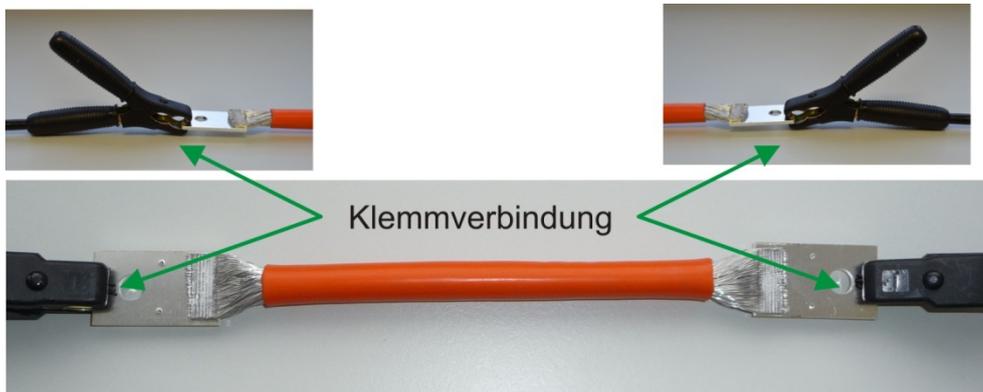


Abbildung 41: Klemmverbindung zur Bestromung bei der Widerstandsmessung mit einem Mikroohmmeter

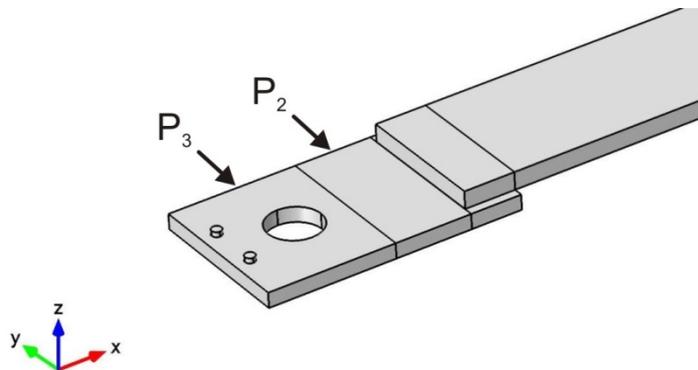


Abbildung 42: 3D Modell der Variante US-Cu mit punktförmiger Stromeinspeisung mittels Klemmverbindung

Der Spannungsabgriff für die Messung des Gesamtwiderstands einer Doppelverbindung erfolgt wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben (**Abbildung 25**), der Spannungsabgriff zur Messung des Widerstands des Leitungsstücks gemäß **Abbildung 36**.

Im Falle der laserstrahlgeschweißten Verbindungen wird die Spannung zur Bestimmung der Widerstandskomponenten R_{P2} und R_{SW} jeweils in der Mitte des Plättchens abgegriffen (**Abbildung 43**). Bei den ultraschallgeschweißten Verbindungen ist ein Spannungsabgriff in der Plättchenmitte nicht sinnvoll, da Einzeldrähte aus der Schweißverbindung in den Bereich von P_2 überstehen (**Abbildung 44**). Für ultraschallgeschweißte Verbindungen erfolgt der Spannungsabgriff zur Bestimmung von R_{P2} und R_{L2} daher am Rand des Plättchens (**Abbildung 44**).

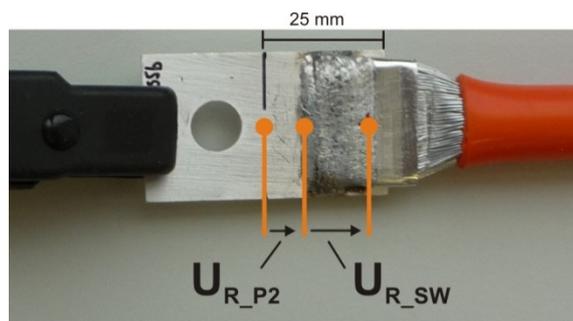


Abbildung 43: *Spannungsabgriff zur Bestimmung der Widerstandskomponenten R_{P2} und R_{SW} einer laserstrahlgeschweißten Verbindung*

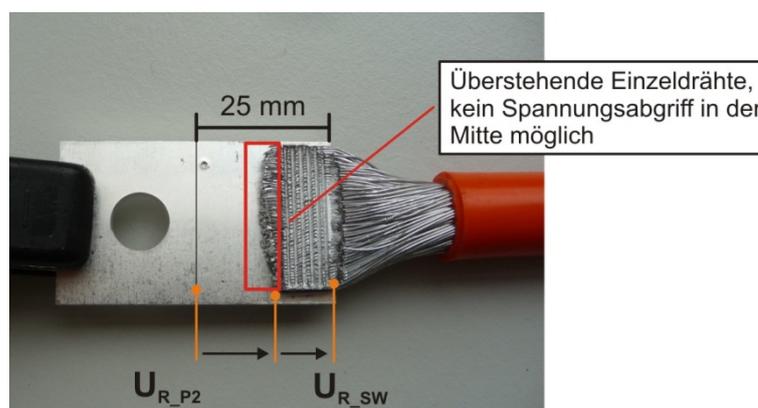


Abbildung 44: *Spannungsabgriff zur Bestimmung der Widerstandskomponenten R_{P2} und R_{SW} einer ultraschallgeschweißten Verbindung*

Für das Plättchenvolumen P_2 liegt der in der Simulation ermittelte Widerstandswert für alle Varianten innerhalb der Spannweite der gemessenen Werte (**Tabelle 12**). Die Differenz zwischen dem Widerstandswert der Simulation und dem Median des Messwerts ist für alle Varianten kleiner als $0,53 \mu\Omega$. Auch im Bereich der Leitung zwischen den beiden Schweißverbindungen L_2 liegt der in der Simulation ermittelte Widerstandswert für alle Varianten in der Spannweite der gemessenen Werte (**Tabelle 13**). Die größte Abweichung zwischen Median des Messwerts und dem in der Simulation ermitteltem Wert tritt bei der Variante US-Cu- 6μ auf und beträgt $0,67 \mu\Omega$. Im Bereich der Schweißverbindungen ist der in der Simulation ermittelte Wert für alle Varianten kleiner als der Minimalwert der Messungen (**Tabelle 14**). Aufgrund der Annahme einer idealen Kontaktierung ($A_c = A_a$) ist der in der Simulation ermittelte Wert als unterer Grenzwert zu verstehen. Die größte Differenz zwischen Median und in der Simulation ermitteltem Wert im Bereich der Schweißverbindungen tritt beim Laserstahlschweißen auf und beträgt $1,61 \mu\Omega$ (**Tabelle 14**). Für die ultraschallgeschweißten Verbindungen mit Aluminiumplättchen liegt die Differenz in der Größenordnung von einem Mikroohm, für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Kupferplättchen in der Größenordnung von $0,7 \mu\Omega$. Der in der Simulation ermittelte Gesamtwiderstand einer Doppelverbindung ist für alle Varianten niedriger als der kleinste gemessene Widerstandswert (**Tabelle 15**).

Für das Alterungsverhalten ist der Widerstand im Bereich der Schweißverbindungen R_{SW} maßgebend. In den Modellen wird eine ideale Kontaktierung im Bereich der Schweißverbindungen vorausgesetzt ($A_c = A_a$), daher sind die in den Modellen ermittelten Widerstandswerte im Bereich der Schweißverbindung als unterer Grenzwert zu verstehen. Die größte Differenz zwischen gemessenem Median des Gesamtwiderstands einer Doppelverbindung und dem in der Simulation ermitteltem Wert tritt für die Variante US-Al-10 μ auf und beträgt 3,75 $\mu\Omega$ (Tabelle 15).

Tabelle 12: Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte für das Plättchenvolumen P_2 (Prüflingsanzahl $n = 5$)

Schweißverfahren	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	6,05	6,65	6,85	6,12	0,53
US-Al-5 μ	5,97	6,42	6,88	6,12	0,30
US-Cu-0 μ	2,81	3,17	3,51	2,87	0,30
US-Cu-6 μ	2,83	2,97	3,15	2,87	0,10
Laserstrahlschweißen	0,97	1,20	1,59	1,15	0,05

Tabelle 13: Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte für das Leitungsstück L_2 (Prüflingsanzahl $n = 5$)

Schweißverfahren	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	77,42	77,71	78,31	77,25	0,46
US-Al-5 μ	76,61	77,01	77,79	77,25	-0,24
US-Cu-0 μ	76,68	76,87	78,16	77,25	-0,38
US-Cu-6 μ	76,18	76,58	77,57	77,25	-0,67
Laserstrahlschweißen	75,33	75,63	76,32	75,47	0,16

Tabelle 14: Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte im Bereich der Schweißverbindungen R_{SW} (Prüflingsanzahl $n = 5$)

Schweißverfahren	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	2,53	3,48	4,27	2,31	1,17
US-Al-5 μ	2,98	3,25	3,59	2,31	0,94
US-Cu-0 μ	1,77	2,18	2,75	1,59	0,59
US-Cu-6 μ	2,05	2,33	2,53	1,59	0,74
Laserstrahlschweißen	2,64	3,16	4,47	1,55	1,61

Tabelle 15: Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte für eine Doppelverbindung (Gesamtwiderstand R_{ges} , Prüflingsanzahl $n = 5$)

Schweißverfahren	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	96,77	97,86	98,95	94,11	3,75
US-Al-5 μ	95,64	96,24	97,93	94,11	2,13
US-Cu-0 μ	87,14	88,33	89,03	86,18	2,15
US-Cu-6 μ	87,14	87,44	88,73	86,18	1,26
Laserstrahlschweißen	83,77	84,46	86,45	80,86	3,60

3.4.2 Widerstandsgeschweißte Verbindungen

Die widerstandsgeschweißten Verbindungen bestehen aus einer Heißcrimpverbindung und einer Hartlötverbindung, wobei nur das Langzeitverhalten der Heißcrimpverbindung Gegenstand der Untersuchungen ist (**Abbildung 21**). Im Rahmen der Versuche wird der Widerstand bis zum Ende der Heißcrimpverbindung gemessen, daher muss die Kupferhülse bis zum Ende der Heißcrimpverbindung modelliert werden. Das die Heißcrimpverbindung umgebende Volumen der Kupferhülse wird mit H_1 bezeichnet (**Abbildung 45**). Die Leitung besteht auch in diesem Modell aus den Teilvolumina L_1 und L_2 .

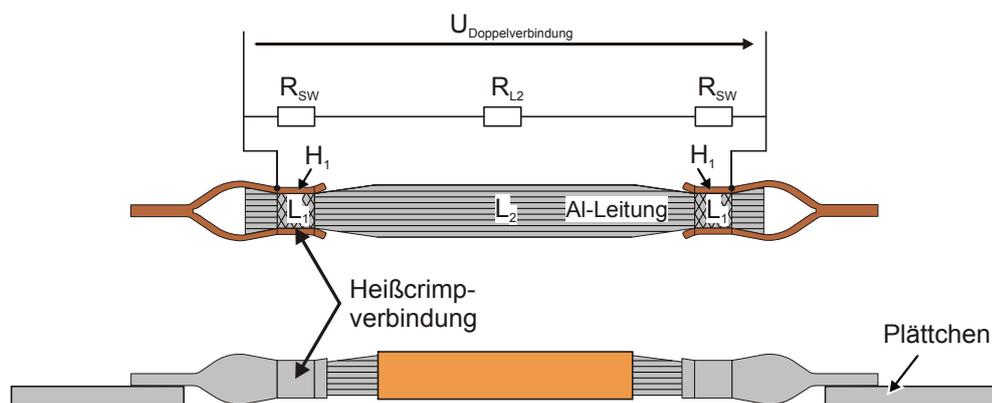


Abbildung 45: Modellierung einer widerstandsgeschweißten Doppelverbindung

Die Doppelverbindungen werden bis zum Ende der Crimpzone wie folgt modelliert (**Abbildung 46**): Im Bereich der Crimpzone besteht die Kupferhülse aus einem rechteckigen Hohlkörper mit Abmessungen nach **Tabelle 16**. Da beim Crimpvorgang die Struktur der Leitung erhalten bleibt (**Abbildung 22**), wird die Leitfähigkeit für L_1 und L_2 zunächst so modelliert, dass die Leitfähigkeit der Metallvolumina dem Widerstand der Aluminiumleitung pro Längeneinheit entspricht (**Tabelle 16**).

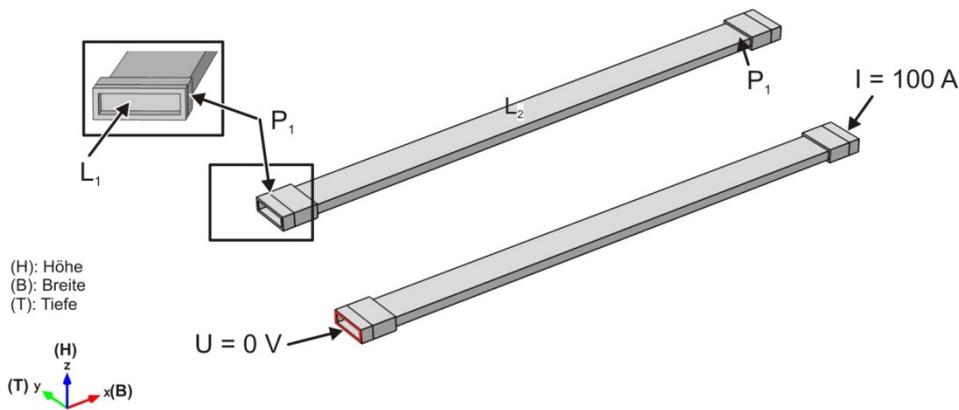


Abbildung 46: 3D Modell einer widerstandsgeschweißten Verbindung. Oben: Komponenten der Verbindung, unten: Modell mit Randbedingungen

Die Ergebnisse dieser Simulation werden im Folgenden mit „Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte“ bezeichnet. Zum Vergleich werden die in der Simulation ermittelten Widerstandswerte der einzelnen Komponenten sowie des Gesamtwiderstands mit Messwerten an je fünf Doppelverbindungen pro Variationsparameter nach **Tabelle 5** gemessen. Der Spannungsabgriff zur Messung des Gesamtwiderstands erfolgt gemäß Abschnitt 3.3.1, der Spannungsabgriff zur Messung des Widerstands im Bereich der Crimpzone jeweils am Anfang und Ende der Crimpverbindung (**Abbildung 47**).

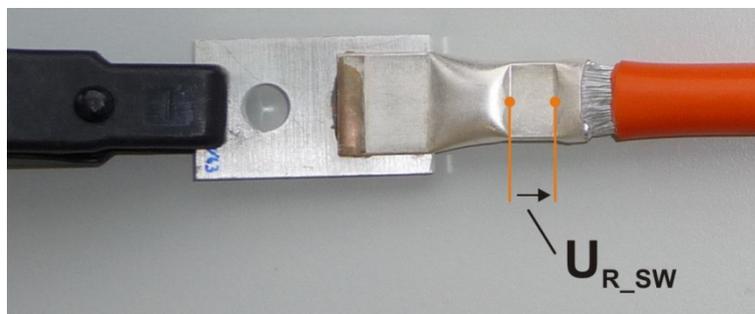


Abbildung 47: Spannungsabgriff zur Bestimmung der Widerstandskomponente R_{SW} einer widerstandsgeschweißten Verbindung

Im Bereich der Crimpzone ergibt sich für das Modell „Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte“ eine sehr geringe Abweichung von $0,22 \mu\Omega$ zwischen dem Median des Messwerts und dem in der Simulation ermittelten Wert (**Tabelle 18**). Für das Leitungstück zwischen den Crimpverbindungen und für eine gesamte Doppelverbindung ergeben sich jedoch große Abweichungen in der Größenordnung von $10 \mu\Omega$ zwischen dem Median des Messwerts und dem Wert der Simulation (**Tabelle 19**, **Tabelle 20**). Der Median des Widerstands für das Leitungstück L_2 beträgt $82,50 \mu\Omega$ und liegt $8,60 \mu\Omega$ über dem in der Simulation ermittelten Wert (**Tabelle 19**). Rein rechnerisch liegt der gemessene Widerstandswert für L_2 $11,6 \%$ über dem in der Simulation ermittelten Wert. Das bedeutet, die Leitung verhält sich so, als würden nur 373 der 419 Einzeldrähte zur Stromübertragung beitragen.

Im Modell „Widerstandsschweißen 373 Einzeldrähte“ wird die Leitfähigkeit von L_1 und L_2 nun so angepasst, dass nur 373 Einzeldrähte zur Stromübertragung beitragen (**Tabelle 17**). Im Bereich der Crimpzone liegt der in der Simulation ermittelte Widerstandswert nach der Anpassung in der Spannweite der gemessenen Werte (**Tabelle 18**). Für das Leitungsstück L_2 und die gesamte Doppelverbindung ergeben sich geringe Abweichungen von maximal $0,24 \mu\Omega$ und die in der Simulation ermittelten Widerstandswerte liegen in der Spannweite der Messwerte (**Tabelle 19, Tabelle 20**).

Tabelle 16: *Abmessungen und Leitfähigkeiten der Komponenten im 3D Modell Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte*

Komponente	Material	Abmessung Modell B x H x T [mm]	Leitfähigkeit für Modell [S·m/mm ²]
Leitung L1	Reinaluminium	10 x 4 x 15,3	45,9
Leitung L2	Reinaluminium	207 x 4 x 15,3	45,9
Hülse P1	Cu-DHP	10 x 6 x 17,3 abzüglich 10 x 4 x 15,3	43,0

Tabelle 17: *Abmessungen und Leitfähigkeiten der Komponenten im 3D Modell Widerstandsschweißen 373 Einzeldrähte*

Komponente	Material	Abmessung Modell B x H x T [mm]	Leitfähigkeit für Modell [S·m/mm ²]
Leitung L1	Reinaluminium	10 x 4 x 15,3	41,0
Leitung L2	Reinaluminium	207 x 4 x 15,3	41,0
Hülse P1	Cu-DHP	10 x 6 x 17,3 abzüglich 10 x 4 x 15,3	43,0

Tabelle 18: *Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte im Bereich der Crimpzone R_{SW} (Prüflingsanzahl $n = 5$)*

Modell	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte	2,24	2,38	2,59	2,16	0,22
Widerstandsschweißen 373 Einzeldrähte	2,24	2,38	2,59	2,30	0,08

Tabelle 19: *Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte für das Leitungsstück L2 (Prüflingsanzahl $n = 5$)*

Modell	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte	80,21	82,50	87,17	73,90	8,60
Widerstandsschweißen 373 Einzeldrähte	80,21	82,50	87,17	82,74	-0,24

Tabelle 20: *Mittels Simulation ermittelte und gemessene Widerstandswerte für eine Doppelverbindung (Gesamtwiderstand R_{ges} , Prüflingsanzahl $n = 5$)*

Modell	Messwert Min [$\mu\Omega$]	Messwert Median [$\mu\Omega$]	Messwert Max [$\mu\Omega$]	Wert Simulation [$\mu\Omega$]	Differenz Median - Simulation [$\mu\Omega$]
Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte	85,28	87,37	85,28	78,22	9,15
Widerstandsschweißen 373 Einzeldrähte	85,28	87,37	92,05	87,34	0,03

Der im Modell „Widerstandsschweißen 419 Einzeldrähte“ berechnete Widerstand für eine Doppelverbindung von $78,22 \mu\Omega$ wird unter der Annahme einer idealen Kontaktierung, d.h. die Kupferhülse ist über die gesamte Fläche elektrisch leitend mit der Leitung verbunden, ermittelt ($A_c = A_a$). Der so ermittelte Widerstandswert ist somit als unterer Grenzwert zu verstehen.

Beim Herstellen einer Pressverbindung verringert sich der Verbindungswiderstand mit zunehmender Presskraft (siehe Abschnitt 2.6.3). Eine nicht optimale Pressverbindung hat somit einen erhöhten Verbindungswiderstand zur Folge. Für eine widerstandsgeschweißte Doppelverbindung beträgt der in der Simulation ermittelte untere Grenzwert des Widerstands $78,22 \mu\Omega$, der Median des Messwerts von $87,37 \mu\Omega$ liegt $11,7\%$ über diesem Wert (**Tabelle 20**). In Schliffbildern der widerstandsgeschweißten Verbindungen ist im mittleren Bereich ein Spalt erkennbar (**Abbildung 23**). Somit wird nicht der gesamte Umfang der Kupferhülse für die Kontaktierung genutzt und der gemessene Widerstand ist höher als der unter Annahme einer idealen Kontaktierung in der Simulation ermittelte Widerstand. Für die Schweißverfahren Ultraschallschweißen und Laserstrahlschweißen beträgt die maximale Differenz zwischen in der Simulation ermittelten und gemessenen Widerstandswert einer Doppelverbindung $3,75 \mu\Omega$ (4% , **Tabelle 15**), somit erfolgt für diese Schweißverfahren eine bessere Kontaktierung der Leitung.

3.5 Mechanische Festigkeit der unbelasteten Verbindungen

Die mechanische Festigkeit der mechanisch, elektrisch und thermisch unbelasteten Verbindungen wird mit Zug- und Schälversuchen ermittelt, um die Qualität der Schweißverbindungen bewerten zu können.

Schälversuche

Für ultraschallgeschweißte Verbindungen erfolgt die Bewertung der mechanischen Eigenschaften zunächst an Aluminiumleitungen mit PVC-Mantel. Hierfür werden Ultraschallschweißverbindungen mit Kupferplättchen und 6 μm Silberbeschichtung (Bezeichnung US-Cu-6 μ PVC) hergestellt. Für die Variante US-Cu-6 μ PVC beträgt der Mittelwert der bezogenen Schälkraft 50,8 N/mm, die Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls liegt bei 44,8 N/mm (**Abbildung 50**).

Die thermische Beständigkeit des PVC-Mantels der Leitung ist auf maximal +105 °C spezifiziert und für die Versuche bei hohen Temperaturen nicht ausreichend. Daher werden für diese Versuche Schweißverbindungen mit Aluminiumleitungen und Silikonmantel hergestellt. Einige ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Silikonmantel konnten durch eine Drehbewegung der Leitung gegen die Plättchen per Hand teilweise abgelöst werden (**Abbildung 48** links, Mitte). Weiterhin überdecken bei einigen Schweißverbindungen nicht alle Einzeldrähte die gesamte Schweißverbindung (**Abbildung 48** rechts). Für Versuche wurden Verbindungen ausgewählt, welche die beschriebenen Mängel nicht aufwiesen. Die Mittelwerte der bezogenen Schälkraft sind für Ultraschallschweißverbindungen mit Silikonmantel deutlich niedriger als der Mittelwert der bezogenen Schälkraft der Variante US-Cu-6 μ PVC (**Abbildung 50**).

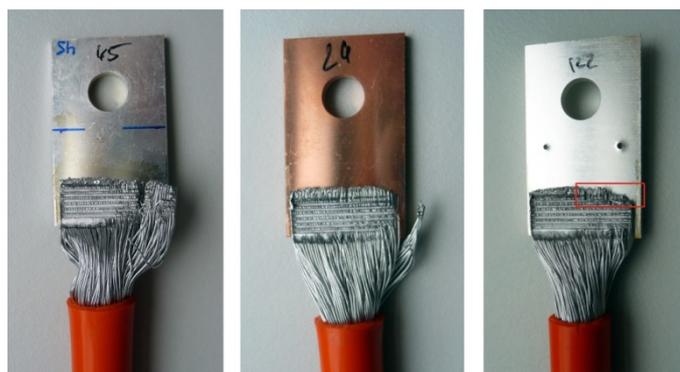


Abbildung 48: *Mangelhafte, ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Silikonmantel. Schweißung konnte teilweise per Hand abgelöst werden (links, Mitte) bzw. nicht alle Einzeldrähte überdecken die gesamte Schweißverbindung (rechts)*

Insbesondere für die Variante US-Al-10 μ treten starke Schwankungen der maximalen Schälkraft auf, wobei sich die ermittelten Werte um bis zu Faktor 3,4 unterscheiden (**Abbildung 49**). Aufgrund der deutlich höheren Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls der Variante US-Cu-6 μ PVC ist die mechanische Beständigkeit der Varianten mit Silikonmantel deutlich geringer als die der Variante mit PVC-Mantel (**Abbildung 50**).

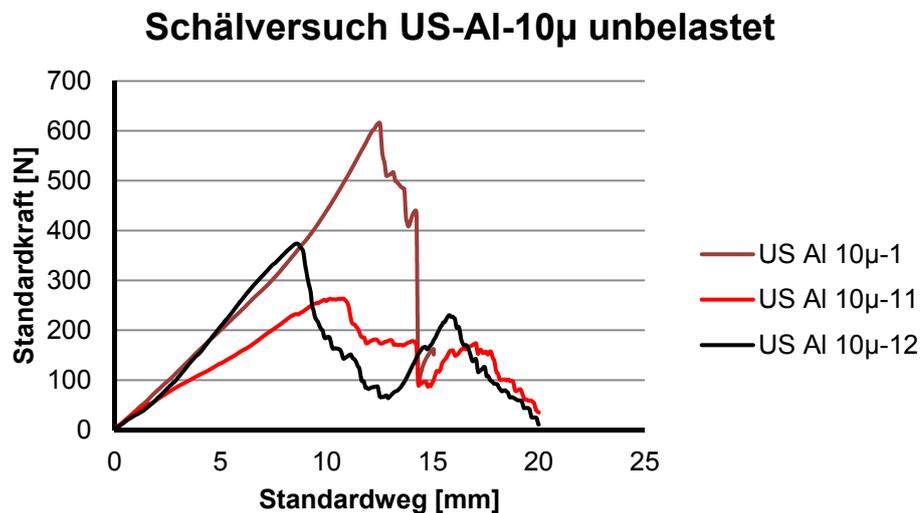


Abbildung 49: Kraft-Weg Diagramm für unbelastete Verbindungen der Variante US-Al-10 μ

Somit sind bei dem Schweißprozess der ultraschallgeschweißten Verbindungen und Leitungen mit Silikonmantel insbesondere bei Aluminiumplättchen starke Prozessschwankungen aufgetreten. Vor dem Schweißprozess wurde der Mantel der Leitung abisoliert, es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich auf den Einzeldrähten der Leitung Rückstände des Silikonmantels befinden. Die Ursache für die Prozessschwankungen konnte nicht abschließend geklärt werden. Es wird untersucht, welche Auswirkungen die Belastungen des Versuchsprogramms auf die mechanische Stabilität der Verbindungen mit Silikonmantel haben.

Für unbelastete laserstrahlgeschweißte Verbindungen beträgt der Mittelwert der bezogenen Schälkraft 20 N/mm, die Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls liegt bei 18 N/mm (**Abbildung 50**). Beide Werte sind niedriger als die Werte der ultraschallgeschweißten Verbindungen. Prozessbedingt entstehen beim Laserstrahlschweißen bereits durch den Schweißprozess intermetallische Phasen (**Abbildung 51**). Mittels EDX-Analyse wird auf dem Kupferplättchen eine Schicht von Aluminium und Kupfer im Masseverhältnis 25 zu 75 Gewichtsprozent detektiert (Grenzschicht 2 und 3 in **Abbildung 51**). Dieses Verhältnis entspricht der intermetallischen Phase Cu_4Al_3 aus dem System Aluminium/Kupfer (**Tabelle 2**).

Die Dicke der Schicht ist mit ca. 8 μm größer als der in anderen Arbeiten als kritisch angesehene Wert von 2 μm bis 5 μm (vgl. Abschnitt 2.4). Weiterhin existiert ein sehr abrupter Übergang einer Kupferkonzentration von 100 gew. % auf eine Konzentration von ca. 75 gew. % (Übergang Kupfer zu Grenzsicht 1 bis 3 in **Abbildung 51**). Aus dem Schlifffbild einer geschälten Verbindung ist ersichtlich, dass die Verbindung direkt an der Grenzfläche zum Kupfersubstrat versagt (**Abbildung 52**).

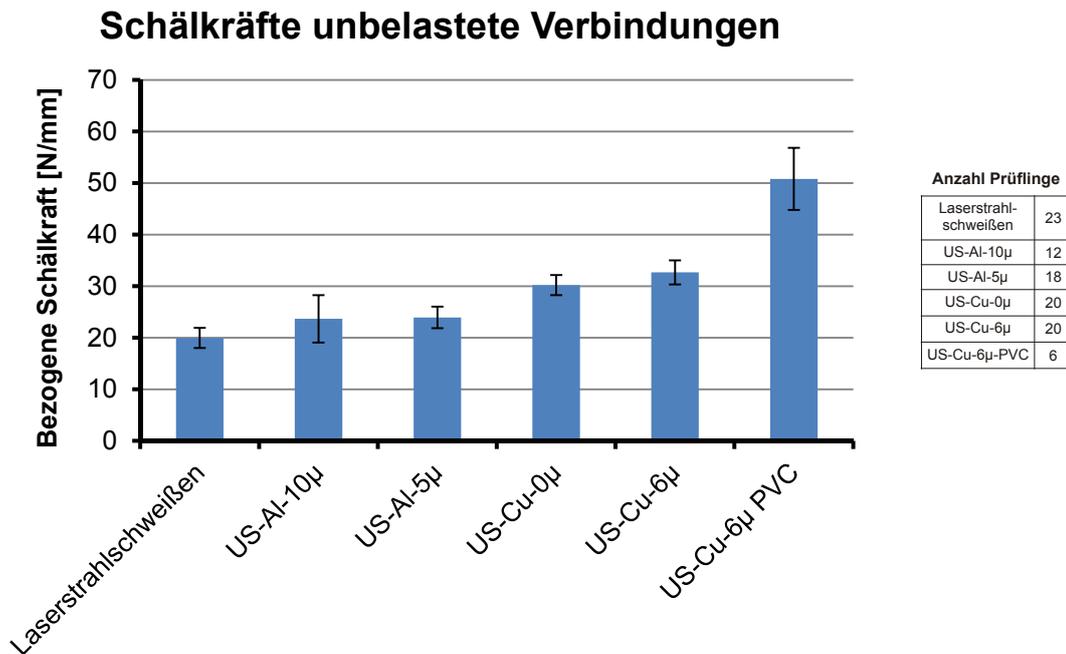


Abbildung 50: Ermittelte Schälkräfte der unbelasteten Verbindungen. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall

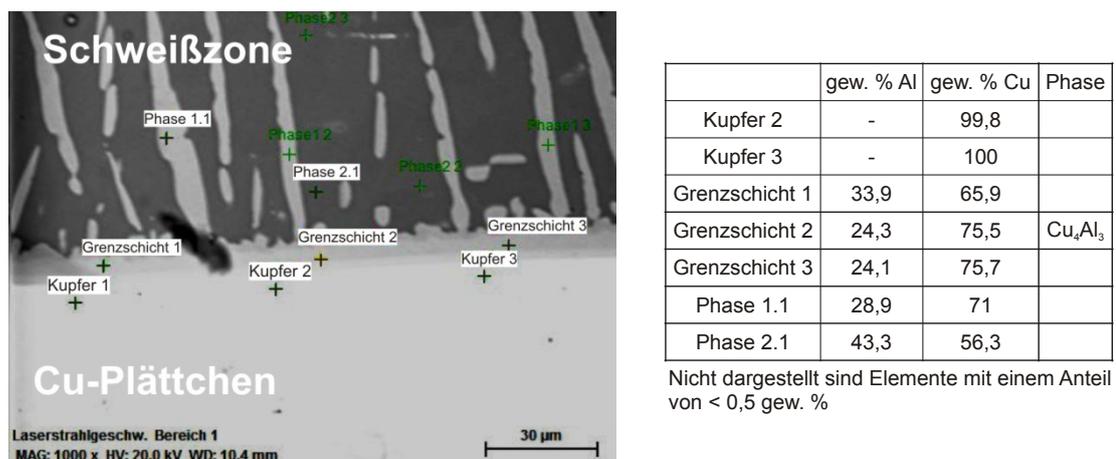


Abbildung 51: EDX-Analyse im Bereich der Schweißzone einer unbelasteten, laserstrahlgeschweißten Verbindung

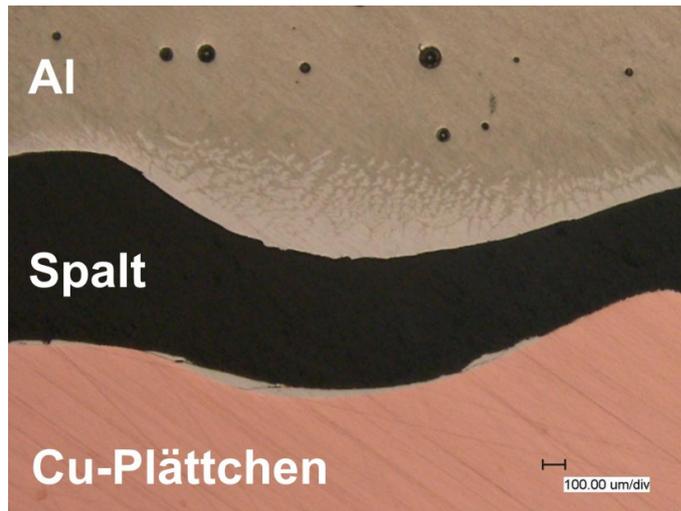


Abbildung 52: Schliffbild einer unbelasteten laserstrahlgeschweißten Verbindung nach Durchführung des Schälversuchs

Zugversuch widerstandsgeschweißter Verbindungen

Zur Ermittlung der mechanischen Festigkeit der widerstandsgeschweißten Verbindungen werden Zugversuche wie in Abschnitt 3.3.5 beschrieben durchgeführt. Es wird die zum Ziehen benötigte Kraft für zehn Prüflinge ermittelt. Der Mittelwert der Zugkraft im unbelasteten Fall beträgt 5034 N (**Abbildung 53**). Dieser Wert dient im Folgenden als Referenz für die Bewertung der Zugkräfte der belasteten Verbindungen.

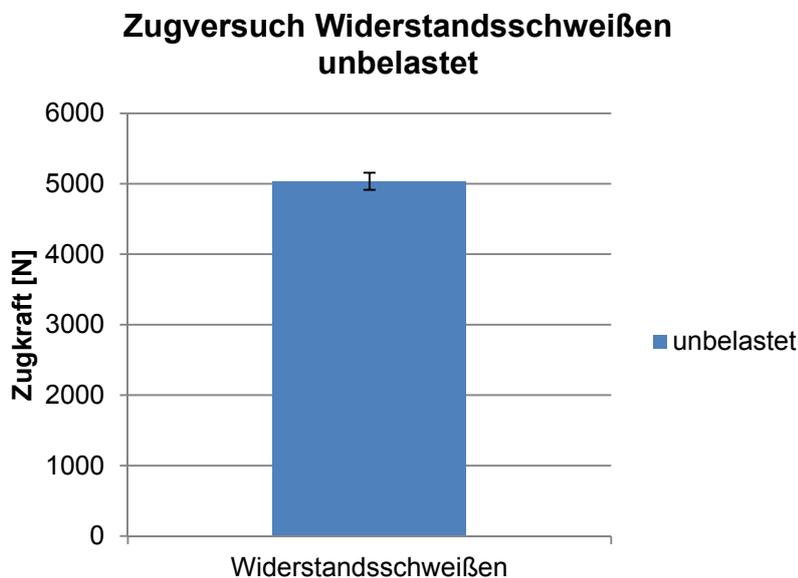


Abbildung 53: Ermittelte Auszugkräfte der widerstandsgeschweißten Verbindungen. Prüflingsanzahl $n = 10$. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall

3.6 Einfluss von schnellen Temperaturwechseln

Durch Temperaturwechsel werden elektrische Geräte und Bauteile beansprucht [DIN EN 60068-2-14]. Aufgrund des unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Kupfer (**Tabelle 3**) können bei Temperaturwechseln mechanische Spannungen in der Schweißverbindung auftreten. Kommt es aufgrund dieser mechanischen Spannungen zu einer Verringerung der scheinbaren oder wahren Verbindungsfläche, ist ein mechanisches oder elektrisches Versagen der Verbindung möglich. Zunächst wird der Einfluss von Temperaturwechseln auf die mechanische Festigkeit der Verbindungen untersucht. Hierfür wird eine Temperaturwechselprüfung in Anlehnung an [DIN EN 60068-2-14], Prüfung Na, durchgeführt. Die Verbindungen werden in einem Klimaprüfschrank mit zwei Prüfkammern mit unterschiedlichen Temperaturen belastet. Mittels eines fahrbaren Korbes werden die Verbindungen von einer Prüfkammer in die andere umgelagert, wodurch die Prüflinge schnellen Temperaturänderungen ausgesetzt werden. Für die Prüfung werden folgende Parameter verwendet:

- Untere Temperatur: -40 °C
- Obere Temperatur: 130 °C
- Haltezeit: Jeweils 30 Minuten
- Umlagerungszeit: Weniger als 10 Sekunden
- Zyklenzahl: 144

Nach Abschluss der Prüfung werden mit den belasteten Verbindungen Zug- und Schälversuche durchgeführt.

Ultraschallgeschweißte Verbindungen

Die Mittelwerte der bezogenen Schälkraft sind für belastete Verbindungen jeweils höher als für unbelastete Verbindungen (**Abbildung 54**). Für die Varianten US-Al-5 μ und US-Cu-6 μ sind die Änderungen der bezogenen Schälkraft signifikant, nicht jedoch für die Varianten US-Al-10 μ und US-Cu-0 μ . Bei der Durchführung von Schälversuchen mit unbelasteten ultraschallgeschweißten Verbindungen wurden Prozessschwankungen bei der Herstellung nachgewiesen. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die teilweise höheren Schälkräfte auf Schwankungen beim Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Durch die Belastung mit schnellen Temperaturwechseln wird die Schälkraft der ultraschallgeschweißten Verbindungen nicht negativ beeinflusst.

Laserstrahlgeschweißte Verbindungen

Der Mittelwert der bezogenen Schälkraft ist im Vergleich zum Wert der unbelasteten Verbindungen fast unverändert, die Belastung mit schnellen Temperaturwechseln hat keinen signifikanten Einfluss auf die bezogene Schälkraft (**Abbildung 54**).

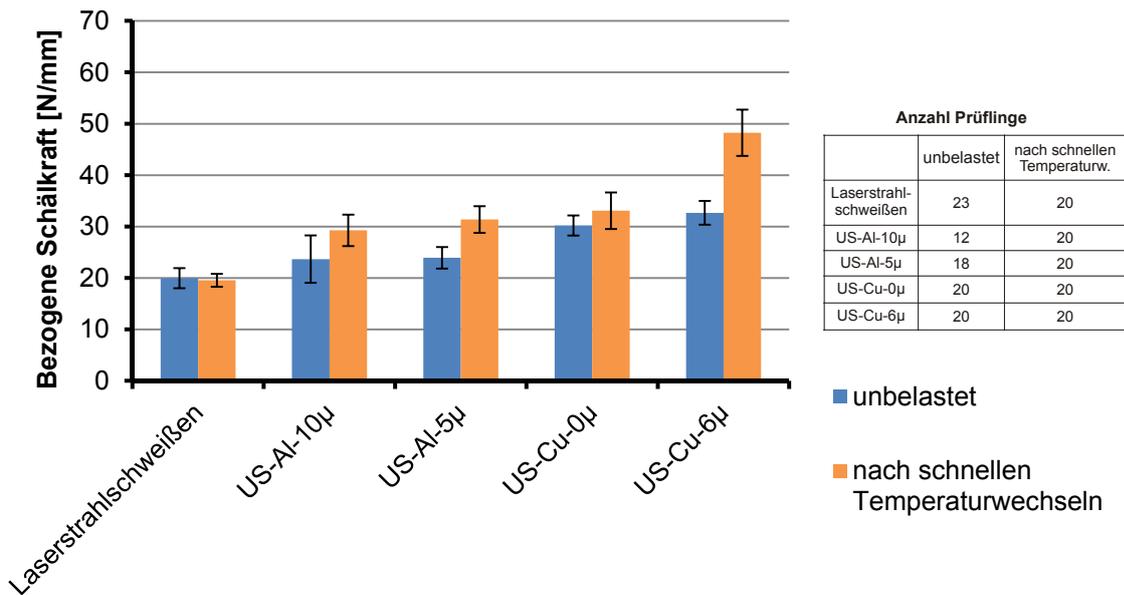


Abbildung 54: *Ermittelte bezogene Schälkräfte nach Belastung mit schnellen Temperaturwechseln. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall*

Widerstandsgeschweißte Verbindungen

Der Mittelwert der Auszugskraft von 16 widerstandsgeschweißten Verbindungen beträgt nach der Belastung 5137 N, im Vergleich zur Auszugskraft der unbelasteten Verbindungen ergibt sich keine signifikante Änderung (**Abbildung 55**).

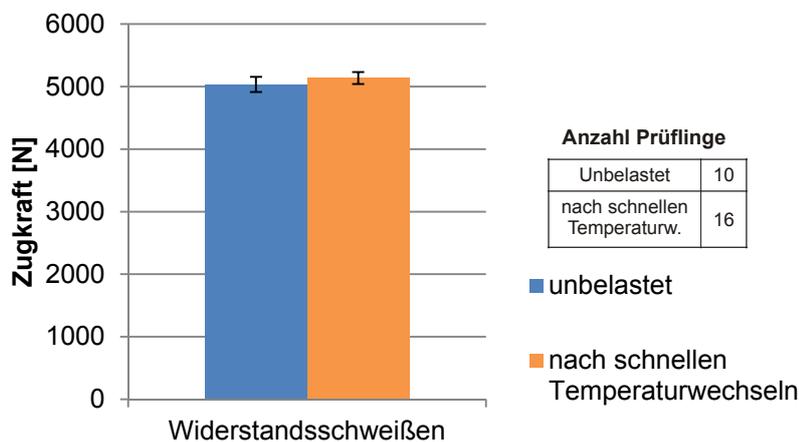


Abbildung 55: *Ermittelte Auszugkräfte der widerstandsgeschweißten Verbindungen nach schnellen Temperaturwechseln. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall*

3.7 Einfluss von Temperatur- und Stromzyklen

Der Einfluss von zyklischen Belastungen mit hohen Temperaturen und Strömen auf die Langzeitstabilität der Schweißverbindungen soll unter den Betriebsbedingungen in einem KFZ-Bordnetz untersucht werden. Wie bei der Belastung mit schnellen Temperaturwechseln können durch die Temperatur- und Stromzyklen in der Verbindung mechanische Spannungen entstehen. Verringert sich aufgrund der Belastungen die scheinbare oder wahre Verbindungsfläche, ist ein mechanisches oder elektrisches Versagen der Verbindung möglich. Die Verbindungen werden in einem Klimaprüfschrank mit Temperatur- und Stromzyklen belastet. Nach Beenden des Versuchs wird die mechanische Beständigkeit der Verbindungen mittels Zug- und Schälversuchen bewertet. Zur Untersuchung der elektrischen Eigenschaften wird der Verbindungswiderstand bestimmt und Deratingmessungen durchgeführt.

3.7.1 Versuchsparameter

Die Versuchsparameter werden wie folgt gewählt: Die niedrigste Betriebstemperatur ergibt sich beim Start eines KFZ im Winter, wobei häufig eine Mindestbetriebstemperatur von -40 °C gefordert wird [GÜN-02]. Im Motorraum können extrem hohe Temperaturen auftreten [GÜN-02]. Entsprechend wird die zulässige Betriebstemperatur von KFZ-Hochvoltleitungen von -40 bis 180 °C spezifiziert, z.B. [LEO-12a]. Aus diesem Grund soll die Beständigkeit der Schweißverbindungen in diesem Temperaturbereich untersucht werden. Die Umgebungstemperatur zu Beginn eines Zyklus beträgt -40 °C und wird in einem Zeitraum von 1,5 Stunden auf 130 °C gesteigert (**Abbildung 56**). Durch einen Gleichstrom von 310 A werden die Verbindungen auf bis zu 180 °C aufgeheizt (**Abbildung 57**). Nach vier Stunden wird der Strom abgeschaltet und die Verbindungen werden innerhalb von anderthalb Stunden erneut auf -40 °C abgekühlt. Nach einer Haltezeit von einer halben Stunde beginnt der nächste Zyklus. Nach 60 Zyklen erfolgt eine Lagerung bei Raumtemperatur für zwei Tage gefolgt von 60 weiteren Zyklen.

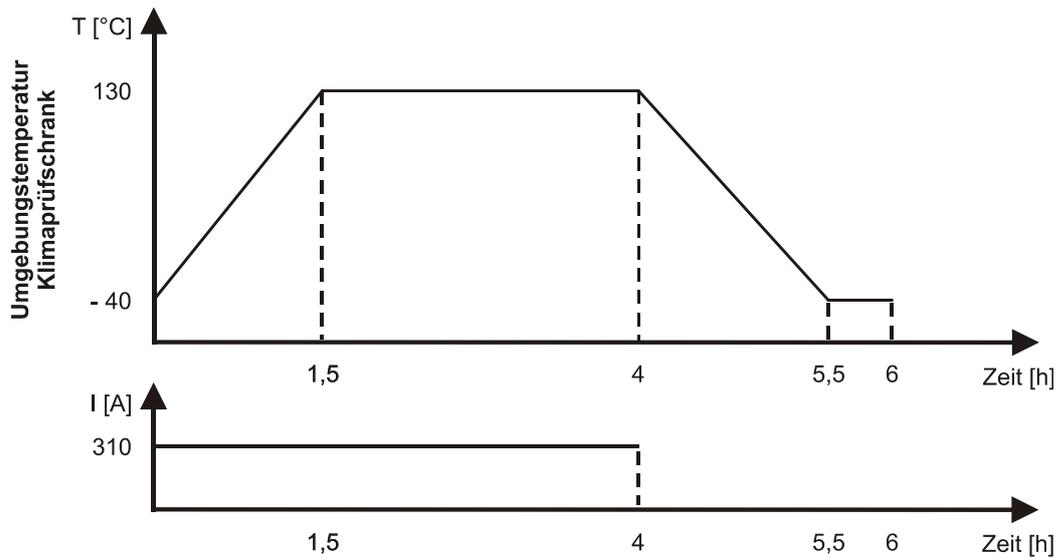


Abbildung 56: Programmierter Temperatur- und Stromzyklus des Versuchs zur Bewertung des Einflusses von Temperatur- und Stromzyklen

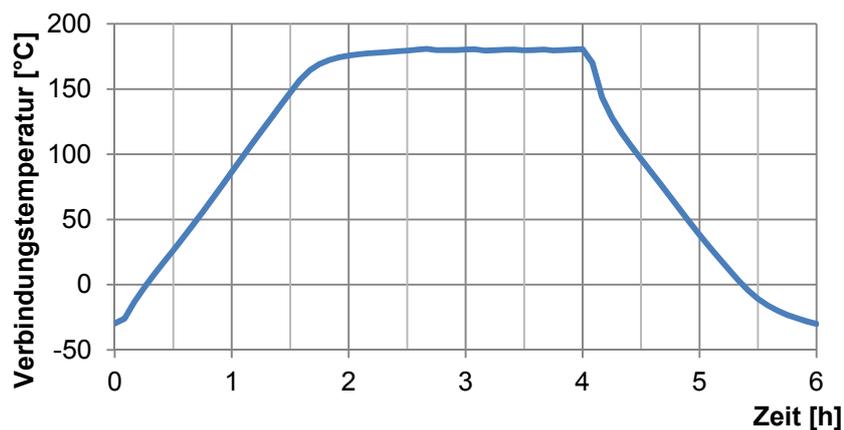


Abbildung 57: Gemessener Temperaturverlauf einer widerstandsgeschweißten Verbindung während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen (1 Prüfzyklus)

3.7.2 Versuchsaufbau

Von den in Tabelle 5 aufgeführten Varianten werden jeweils vier Doppelverbindungen untersucht. Zur Belastung im Klimaprüfschrank werden jeweils sechs Doppelverbindungen auf einer Halterung bestehend aus PTFE und Aluminium befestigt (**Abbildung 58** bis **Abbildung 60**). Die Bestromung der in Serie geschalteten Verbindungen erfolgt mit einer Gleichstromquelle. Während des Versuchs wird der Gesamtwiderstand alle fünf Minuten gemessen. Hierzu wird die über einer Doppelverbindung abfallende Spannung mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Der Spannungsabgriff zur Messung des Gesamtwiderstands einer Doppelverbindung erfolgt wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben.

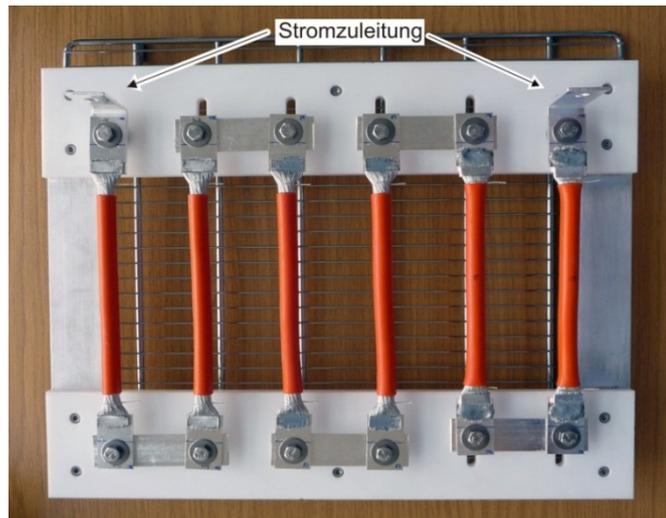


Abbildung 58: Haltevorrichtung für sechs Doppelverbindungen zur Belastung im Klimaprüfschrank

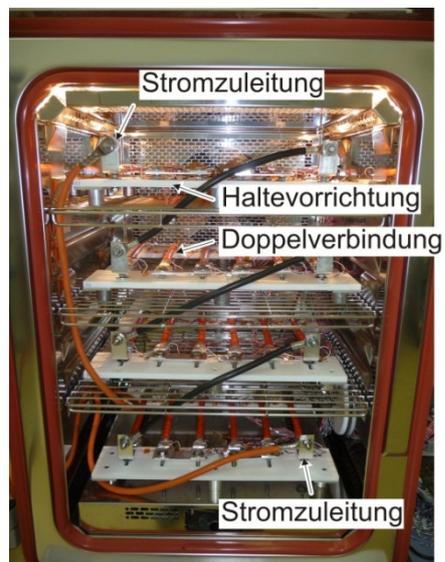


Abbildung 59: Klimaprüfschrank mit unbelasteten Doppelverbindungen vor Beginn des Versuchs

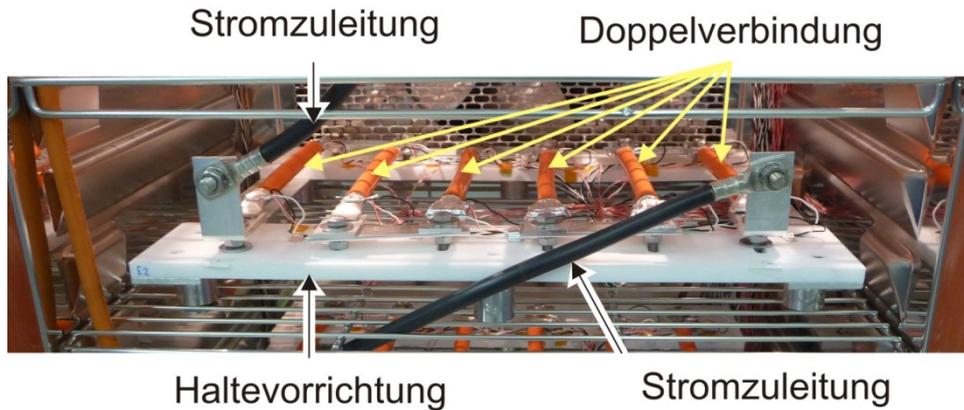


Abbildung 60: Haltevorrichtung im Klimaprüfschrank mit sechs Doppelverbindungen

3.7.3 Bewertung der Alterung nach Beenden des Versuchs

Um die mögliche Alterung nach Ende des Versuchs bewerten zu können, werden vor Beginn des Langzeitversuchs Vorversuche und nach Beenden des Langzeitversuchs Folgeversuche durchgeführt. Es werden die in Abschnitt 3.3 erläuterten Methoden und Prüfverfahren angewandt:

Gesamtwiderstand

Der Gesamtwiderstand wird während der Prüfung mit einem Datenlogger gemessen. Der Spannungsabgriff zur Messung des Gesamtwiderstands erfolgt wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben (**Abbildung 25**, **Abbildung 26**). Zur Bewertung der Änderung des Gesamtwiderstands während der Prüfung wird der letzte Messwert in einem Zyklus vor Abschalten des Stroms betrachtet. Dies ist jeweils der letzte Messwert, der vier Stunden nach Beginn des Zyklus bei 130 °C Umgebungstemperatur und einem Strom von 310 A aufgezeichnet wird (**Abbildung 56**). Mit Hilfe des Modells der Schweißverbindungen nach Abschnitt 3.4 wird aus dem Gesamtwiderstand der Doppelverbindungen der Verbindungswiderstand einer einzelnen Schweißverbindung berechnet. Ist der Widerstand der belasteten Verbindungen höher als der Widerstand der unbelasteten Verbindungen, ist dies ein Indiz dafür, dass die Prüflinge während des Versuchs gealtert sind.

Deratingmessungen

Um eine Änderung der Stromtragfähigkeit durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen bewerten zu können, werden vor und nach der Prüfung Deratingmessungen durchgeführt.

Zug- und Schälversuche

Mittels Zug- und Schälversuchen von belasteten und unbelasteten Verbindungen wird der Einfluss der Temperatur- und Stromzyklen auf die mechanische Stabilität der Verbindungen bewertet. Die Prüfverfahren werden in den Abschnitten 3.3.4 und 3.3.5 beschrieben.

EDX-Analyse

Durch EDX-Analyse wird das Wachstum von intermetallischen Phasen bewertet.

3.7.4 Messergebnisse

Im Folgenden werden die Messergebnisse der angewandten Methoden und Prüfverfahren dargelegt.

3.7.4.1 Widerstand während der Prüfung

Die Messwerte des Gesamtwiderstands sind zu ausgewählten Zeiten grafisch dargestellt (**Abbildung 61**, **Abbildung 62**). Der Median des Gesamtwiderstands der widerstandsgeschweißten Verbindungen steigt in den ersten 60 Zyklen innerhalb der Spannweite um $3 \mu\Omega$ an. Nach 120 Zyklen ist der Gesamtwiderstand um $4 \mu\Omega$ gegenüber dem Wert zu Beginn der Prüfung angestiegen (**Tabelle 21**). Für alle anderen Varianten wird kein Anstieg des Gesamtwiderstands im Verlauf der Prüfung gemessen (**Tabelle 21**). Die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen wirkt sich somit nur bei widerstandsgeschweißten Verbindungen negativ auf den Gesamtwiderstand aus.

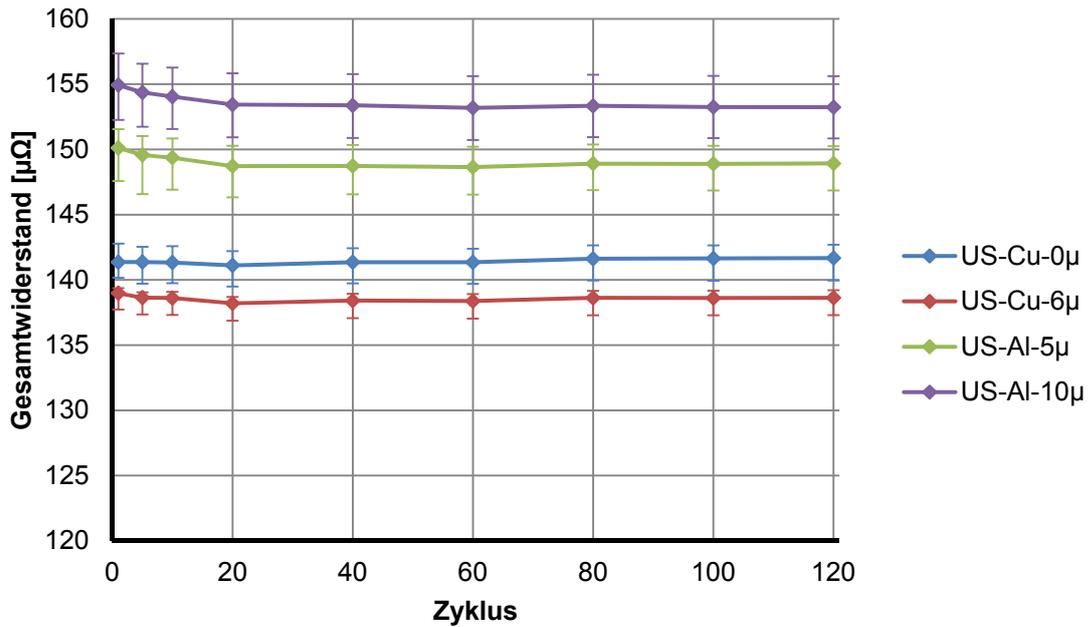


Abbildung 61: Verlauf des Gesamtwiderstands während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen der ultraschallgeschweißten Verbindungen bei 130 °C und 310 A. Median und Spannweite

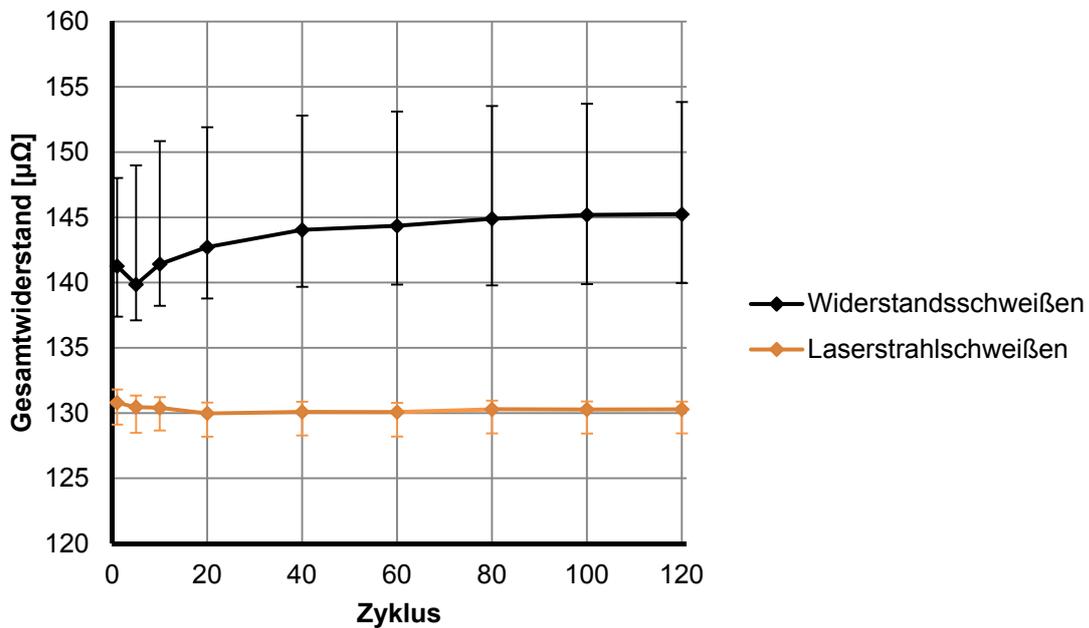


Abbildung 62: Verlauf des Gesamtwiderstands während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen der Varianten Widerstandsschweißen und Laserstrahlschweißen bei 130 °C und 310 A. Median und Spannweite

Tabelle 21: *Änderung des Gesamtwiderstands während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen. Gemessen bei 130 °C und 310 A*

Schweißverfahren	Median Zyklus 1 [$\mu\Omega$]	Median Zyklus 120 [$\mu\Omega$]	Differenz [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	154,9	153,2	-1,7
US-Al-5 μ	150,1	148,9	-1,2
US-Cu-6 μ	139,0	138,6	-0,4
US-Cu-0 μ	141,4	141,7	0,3
Laserstrahlschweißen	130,8	130,3	-0,5
Widerstandsschweißen	141,3	145,2	4,0

Zur Bewertung der Änderung des Verbindungswiderstands wird der Anteil des Verbindungswiderstands am gemessenen Gesamtwiderstand mit Hilfe der Modelle der Doppelverbindungen nach Abschnitt 3.4 berechnet. Der gemessene Gesamtwiderstand einer Doppelverbindung setzt sich in den Modellen nach Abschnitt 3.4 aus den Widerstandskomponenten der Leitung R_{L2} , der Plättchen R_{P2} , und der Schweißverbindungen R_{SW} zusammen. Durch Subtraktion der Widerstandskomponenten von Leitung R_{L2} und Plättchen R_{P2} vom gemessenen Gesamtwiderstand kann somit der Widerstand der beiden Schweißverbindungen einer Doppelverbindung bestimmt werden. In den Modellen wurde der Widerstand der einzelnen Komponenten bei 20 °C angegeben, die Widerstandswerte von R_{L2} und R_{P2} müssen zunächst auf die Prüflingstemperatur zum Messzeitpunkt umgerechnet werden. Als Prüflingstemperatur zum Messzeitpunkt dient der Mittelwert der an den Schweißverbindungen nach Abschnitt 3.3.2 zum Messzeitpunkt gemessenen Temperaturen. Im Folgenden wird angenommen, dass Widerstandsänderungen während der Belastung ausschließlich auf Widerstandsänderungen im Bereich der Schweißverbindungen zurückzuführen sind. Weiterhin wird angenommen, dass sich die Änderung des Verbindungswiderstands im Verlauf der Belastungen zu gleichen Teilen auf die beiden Schweißverbindungen aufteilt. Der berechnete Verlauf des Verbindungswiderstands der Schweißverbindungen ist grafisch dargestellt (**Abbildung 63**, **Abbildung 64**). Zur Verifikation des Modells der Doppelverbindungen wurden an anderen Prüflingen Widerstandswerte der Schweißverbindungen R_{SW} bei Raumtemperatur gemessen (**Tabelle 14**, **Tabelle 18**). Die Differenz dieser Messwerte zu den für den Zyklus 1 berechneten Werten des Verbindungswiderstands während der Prüfung ist kleiner als 1,3 $\mu\Omega$, die berechneten Werte des Verbindungswiderstands stimmen daher mit diesen Werten in guter Näherung überein (**Tabelle 14**, **Tabelle 18**, **Tabelle 22**). Die berechnete Änderung des Verbindungswiderstands im Verlauf der Prüfung beträgt 1,45 $\mu\Omega$ für die widerstandsgeschweißten Verbindungen, für alle Varianten des Ultraschallschweißens und das Laserstrahlschweißen ändert sich der berechnete Verbindungswiderstand im Verlauf der Prüfung um weniger als ein Mikroohm (**Tabelle 22**).

In einer anderen Arbeit wurden Verbindungen mit unbeschichteten Aluminium- und Kupferstromschienen bei 200 °C belastet, bereits nach acht Stunden wurde ein Anstieg des Verbindungswiderstands um 643 % gemessen [BON-48]. Bei einer zyklischen Belastung von unbeschichteten Kupferstromschienen und unbeschichteten Aluminiumstromschienen mit Stromzyklen (bis zu 2 kA, scheinbare Verbindungsfläche 1444 mm²) wurde in einer anderen Arbeit ein Anstieg des Verbindungswiderstands um bis zu Faktor zwei gemessen [BRA-91]. In Relation zu diesen Änderungen sind die Änderungen des gemessenen Gesamtwiderstands sowie des berechneten Verbindungswiderstands für die Varianten Ultraschallschweißen und Laserstrahlschweißen gering. Der Gesamtwiderstand und der berechnete Verbindungswiderstand der widerstandsgeschweißten Verbindungen steigt im Verlauf der Prüfung zunächst an, jedoch fällt die Änderung in den letzten 60 Zyklen der Prüfung gering aus (**Abbildung 61**, **Abbildung 64**).

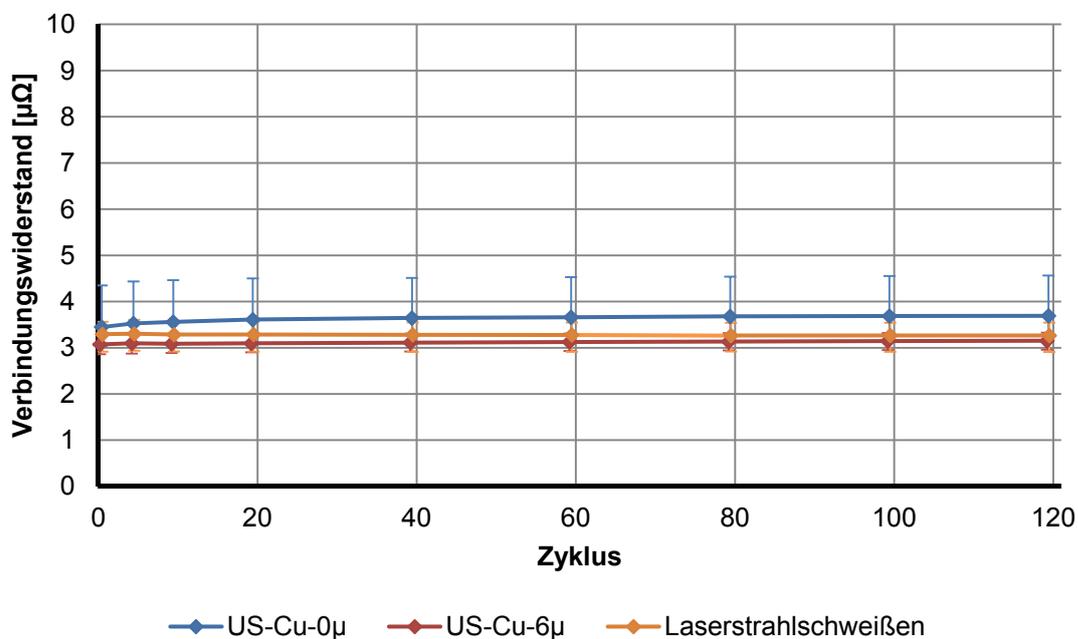


Abbildung 63: *Verbindungswiderstand der Schweißverbindungen während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen der Varianten US-Cu und Laserstrahlschweißen bei 20 °C. Berechnet aus dem Gesamtwiderstand. Median und Spannweite*

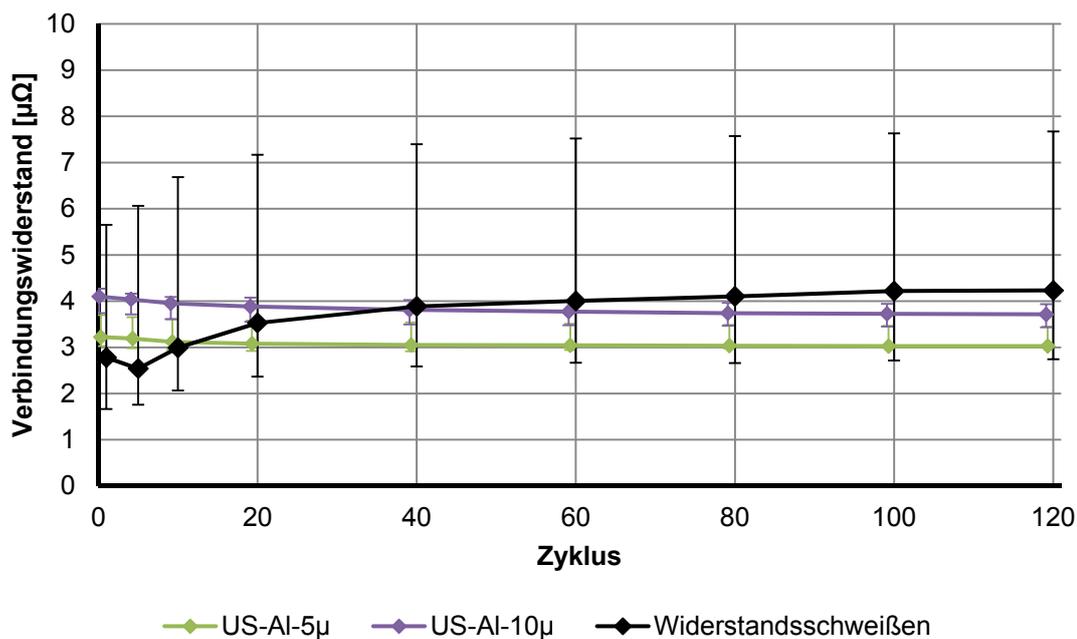


Abbildung 64: *Verbindungswiderstand der Schweißverbindungen während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen der Varianten US-Al und Widerstandsschweißen bei 20 °C. Berechnet aus dem Gesamtwiderstand; Median und Spannweite*

Tabelle 22: *Änderung des Verbindungswiderstands bei 20 °C während der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen. Berechnet aus Messwerten des Gesamtwiderstands*

Schweißverfahren	Median Zyklus 1 [μΩ]	Median Zyklus 120 [μΩ]	Differenz [μΩ]
US-Al-10μ	4,10	3,71	-0,39
US-Al-5μ	3,22	3,03	-0,20
US-Cu-6μ	3,07	3,15	0,08
US-Cu-0μ	3,45	3,69	0,24
Laserstrahlschweißen	3,29	3,26	-0,03
Widerstandsschweißen	2,78	4,23	1,45

3.7.4.2 Deratingmessungen

Es werden vor und nach Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen Deratingmessungen mit jeweils zwei Doppelverbindungen pro Variationsparameter nach Tabelle 5 durchgeführt. Zum Ermitteln der Stromtragfähigkeit werden Stromstärken von 100 A, 200 A und 300 A verwendet. Exemplarisch dargestellt sind die Basis-Strombelastbarkeitskurven für das Widerstandsschweißen vor und nach der Belastung (**Abbildung 65**).

Gegenüber der abgeleiteten Strombelastbarkeitskurve ist bei dieser Darstellung vorteilhaft, dass zusätzlich zu den interpolierten Kurven die gemessenen Werte mit dargestellt werden können.

Die aus der Basis-Strombelastbarkeitskurve ermittelten Stromtragfähigkeiten vor und nach Belastung im Klimaprüfschrank sind bei 120 °C Umgebungstemperatur für alle untersuchten Varianten tabellarisch zusammengefasst (**Tabelle 23**). Der zulässige Strom bei 120 °C Umgebungstemperatur liegt im Bereich des bei einem Strom von 300 A ermittelten Messwertes (**Abbildung 65**). Um Unsicherheiten bei der Temperaturmessung und in der Messanordnung zu berücksichtigen, ist es üblich, auf die Basis-Strombelastbarkeitskurve einen Korrekturfaktor von 0,8 anzuwenden [DIN 60512-5-2]. In Relation zu dem üblichen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Messunsicherheit sind die gemessenen Änderungen der Stromtragfähigkeit gering (**Tabelle 23**). Beispielsweise beträgt die relative Änderung der Stromtragfähigkeit durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen für die Variante US-Cu-0 μ 3,9 % (**Tabelle 23**).

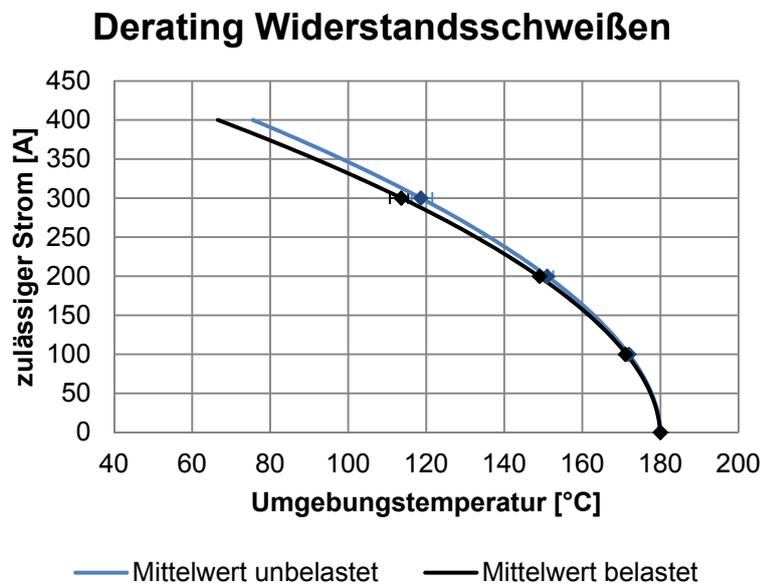


Abbildung 65: Basis-Strombelastbarkeitskurven vor und nach Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen. Interpolierte Kurven nach [DIN 60512-5-2], Mittelwerte und Spannweite

Tabelle 23: *Ermittelte Stromtragfähigkeit aus der Basis-Strombelastbarkeitskurve der unbelasteten und mit Temperatur- und Stromzyklen belasteten Verbindungen bei 120 °C Umgebungstemperatur*

Schweißverfahren	Stromtragfähigkeit unbelastet [A]	Stromtragfähigkeit belastet [A]	Absolute Änderung [A]	Relative Änderung [%]
US-Al-10 μ	300,2	293,3	-6,9	-2,3
US-Al-5 μ	303,2	293,5	-9,7	-3,2
US-Cu-6 μ	306,2	297,7	-8,5	-2,8
US-Cu-0 μ	304,8	293,0	-11,8	-3,9
Laserstrahlschweißen	305,6	303,3	-2,3	-0,7
Widerstandsschweißen	296,4	284,3	-12,1	-4,1

3.7.4.3 Schälversuche

Der auf die Verbindungsbreite bezogene Mittelwert der Schälkraft der laserstrahlgeschweißten Verbindungen hat sich durch die Belastung nur geringfügig um 0,3 N/mm verringert (**Abbildung 66**). Die Änderung ist nicht signifikant, gleiches gilt für die Varianten US-Al. Im Gegensatz dazu weist die Variante US-Cu-6 μ nach der Belastung signifikant höhere bezogene Schälkräfte auf. Aufgrund der Prozessschwankungen bei der Herstellung der Verbindungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass die teilweise höheren Schälkräfte auf Schwankungen beim Herstellungsprozess zurückzuführen sind.

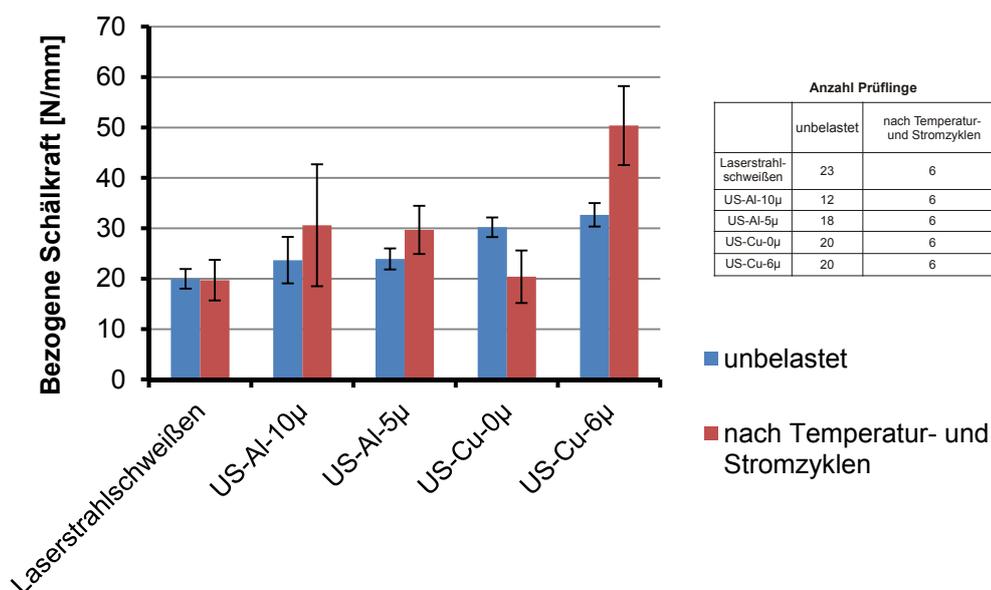


Abbildung 66: *Auf die Verbindungsbreite bezogene Schälkräfte nach Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall*

Für die Variante US-Cu-0 μ werden nach der Belastung statistisch signifikant niedrigere bezogene Schälkräfte gemessen (Zweistichproben t-Test, $\alpha = 5\%$).

3.7.4.4 Zugversuch widerstandsgeschweißter Verbindungen

Nach Belastung ist der Mittelwert der Zugkraft 99 N niedriger als der Wert der unbelasteten Verbindungen, die Änderung ist nicht signifikant (**Abbildung 67**).

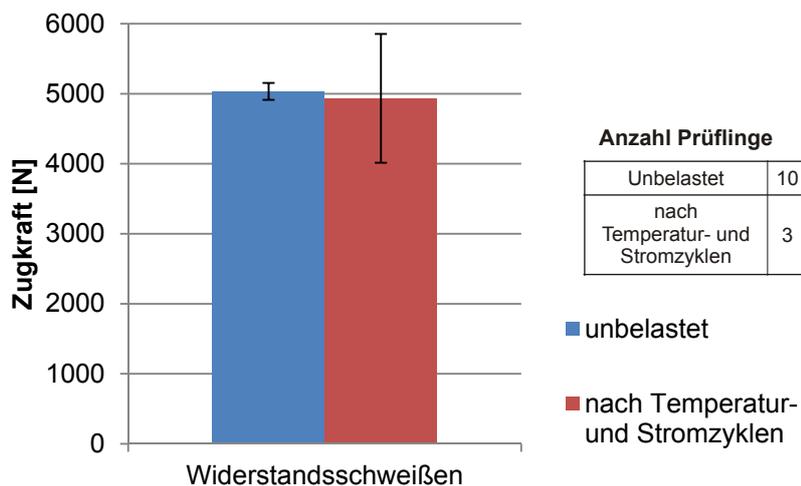


Abbildung 67: *Ermittelte Auszugkräfte der widerstandsgeschweißten Verbindungen nach Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall*

3.7.4.5 EDX-Analyse

Beim Vergleich der Überlappung der Elemente in der Schweißzone nach Tabelle 6 wird für das Schweißverfahren Widerstandsschweißen und alle Varianten des Ultraschallschweißens keine bedeutsame Änderung der Überlappung der Elemente gegenüber unbelasteten Verbindungen festgestellt (**Tabelle 24**). Es wird somit kein Hinweis auf das Wachstum intermetallischer Phasen gefunden.

Tabelle 24: *Mittels EDX-Analyse ermittelte Überlappung der Elemente in der Schweißzone vor und nach Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen*

Schweißverfahren	Überlappung Elemente	Überlappung [μm]	
		Unbelastet	Nach Temperatur- und Stromzyklen
US-Al-10 μ	Silber / Aluminium	4,0	3,5
US-Al-5 μ	Silber / Aluminium	3,5	4,0
US-Cu-0 μ	Kupfer / Aluminium	4,0	3,0
US-Cu-6 μ	Silber / Aluminium	4,0	3,5
Widerstandsschweißen	Silber / Aluminium	3,5	3,5

3.8 Einfluss von Langzeitbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen

Zur Bewertung des Verhaltens der Schweißverbindungen während der Nutzungsdauer werden diese in einem Langzeitversuch geprüft. Die Belastung erfolgt durch hohe Temperaturen und Ströme, die mit einem Wärmeofen und einer Gleichstromquelle erzeugt werden.

3.8.1 Versuchsparameter

In Bezug auf die Versuchsparameter werden folgende Überlegungen angestellt:

Umgebungs- bzw. Ofentemperatur

Es wird davon ausgegangen, dass die maximale Umgebungstemperatur in der Nähe einer Hochvoltleitung in einem KFZ-Bordnetz 140 °C beträgt.

Temperatur der elektrischen Verbindungen

Durch die Stromwärmeverluste werden elektrische Verbindungen im Betrieb aufgeheizt. Das Langzeitverhalten der Verbindungen soll bei maximal zulässiger Betriebstemperatur untersucht werden. Die maximal zulässige Betriebstemperatur vieler KFZ-Hochvoltleitungen beträgt 180 °C (z.B. [LEO-12a]). Daher sollen die Verbindungen derart bestromt werden, dass sich durch die Umgebungstemperatur von 140 °C und den Strom zu Beginn des Versuchs an den heißesten Verbindungen eine Temperatur von 180 °C einstellt. Um dies zu erreichen, ist eine Stromstärke von 250 A Gleichstrom notwendig.

Versuchsdauer

Für einen PKW wird eine Lebensdauer von 300.000 km angestrebt [GEV-06]. Wird angenommen, dass ein PKW im Durchschnitt mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h fährt, ergibt sich eine maximale Betriebsdauer von 6.000 Stunden. Die Bewertung der Alterung einer elektrischen Verbindung nach einer Belastung bei maximal zulässiger Temperatur für 6.000 Stunden ist somit eine zulässige Abschätzung für das Verhalten der Verbindung während der Nutzungsdauer in einem KFZ-Bordnetz.

3.8.2 Versuchsaufbau

Zur Belastung der Verbindungen im Wärmeofen werden diese wie bei der Untersuchung des Einflusses von Temperatur- und Stromzyklen auf einer Halterung bestehend aus PTFE und Aluminium montiert (**Abbildung 58**, **Abbildung 68**). Die Bestromung der Doppelverbindungen erfolgt in Serie mit Gleichstrom.

Der Gesamtwiderstand jeder Doppelverbindung und die Temperaturen der Einzelverbindungen werden einmal pro Stunde von einem Datenlogger bei hohen Temperaturen und Strömen aufgezeichnet. Der Spannungsabgriff zur Bestimmung des Gesamtwiderstands einer Doppelverbindung erfolgt wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, die Messpunkte zum Bestimmen der Verbindungstemperatur sind in Abschnitt 3.3.2 beschrieben. Von jeder der in Tabelle 5 aufgeführten Varianten werden vier Doppelverbindungen geprüft, sodass insgesamt 24 Doppelverbindungen im Wärmeofen belastet werden (**Abbildung 69**).

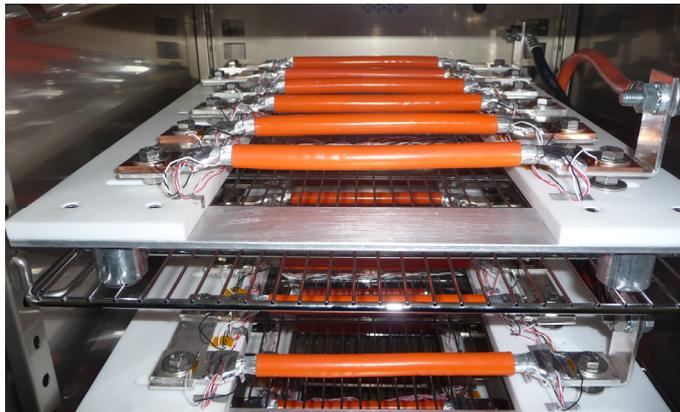


Abbildung 68: *Haltevorrichtung mit Messleitungen zum Spannungsabgriff im Wärmeofen*



Abbildung 69: *Wärmeofen mit unbelasteten Verbindungen zu Beginn des Versuchs*

3.8.3 Bewertung der Alterung nach Beenden des Langzeitversuchs

Um die mögliche Alterung nach Ende des Versuchs bewerten zu können, werden vor Beginn des Langzeitversuchs Vorversuche und nach Beenden des Langzeitversuchs Folgeversuche durchgeführt.

Gesamtwiderstand

Die Bewertung der Langzeitstabilität erfolgt durch Beurteilung der Änderung des Gesamtwiderstands vor und nach der Prüfung bei Raumtemperatur und während der Prüfung bei hohen Temperaturen. Mit Hilfe des Modells der Schweißverbindungen nach Abschnitt 3.4 wird aus dem Gesamtwiderstand der Doppelverbindungen während der Prüfung der Verbindungswiderstand einer einzelnen Schweißverbindung berechnet.

Ermitteln der Strombelastbarkeit

Vor und nach Beenden des Langzeitversuchs wird für jeweils zwei Doppelverbindungen pro Variationsparameter nach Tabelle 5 die Strombelastbarkeit wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben ermittelt. Die Bewertung erfolgt durch Vergleich der Strombelastbarkeit bei 120 °C Umgebungstemperatur.

Zug- und Schälversuche

Mit den ultraschall- und laserstrahlgeschweißten Verbindungen werden vor und nach Durchführung des Langzeitversuchs Schälversuche, mit den widerstandsgeschweißten Verbindungen Zugversuche durchgeführt. Die Prüfverfahren werden in den Abschnitten 3.3.4 und 3.3.5 beschrieben.

Schliffbilder und EDX-Analyse

Zur Bewertung des Wachstums von intermetallischen Phasen werden sowohl von unbelasteten als auch von belasteten Verbindungen Schliffbilder angefertigt und eine EDX-Analyse durchgeführt. Durch einen Vergleich können Rückschlüsse über das Abflauen von Interdiffusion während der Langzeitbelastung gezogen werden.

3.8.4 Messergebnisse

Die Messergebnisse vor, während und nach der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen werden im Folgenden dargelegt.

3.8.4.1 Verbindungstemperatur während der Prüfung

Bei einer Umgebungstemperatur von 140 °C erwärmt sich die heißeste widerstandsgeschweißte Verbindung durch den Gleichstrom von 250 A zu Beginn des Versuchs auf 180 °C. Der Median der Verbindungstemperaturen zu Beginn des Versuchs stellt sich gemäß Tabelle 25 ein. Im Verlauf des Versuchs ändern sich die Verbindungstemperaturen nur geringfügig, die maximale Änderung des Medians beträgt 2,6 K.

Tabelle 25: *Verbindungstemperaturen zu Beginn der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen bei einer Umgebungstemperatur von 140 °C*

Schweißverfahren	Min [°C]	Median [°C]	Max [°C]
US-Al-10 μ	163,8	167,3	171,6
US-Al-5 μ	165,5	167,7	173,5
US-Cu-0 μ	162,7	163,8	165,6
US-Cu-6 μ	165,0	167,9	170,1
Laserstrahlschweißen	161,6	162,4	163,9
Widerstandsschweißen	170,8	176,0	180,4

3.8.4.2 Widerstand während der Prüfung

Zur Bewertung der Änderung des Gesamtwiderstands während der Prüfung wird der Verlauf des Gesamtwiderstands betrachtet. Der Gesamtwiderstand wird einmal pro Stunde von einem Datenlogger aufgezeichnet, während die Prüflinge mit hohen Temperaturen und Strömen belastet werden. Der Spannungsabgriff zur Messung des Gesamtwiderstands erfolgt wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben. Der Übersichtlichkeit halber sind im Folgenden Werte zu ausgewählten Zeiten grafisch dargestellt (**Abbildung 70**). Für widerstandsgeschweißte Verbindungen wird der Gesamtwiderstand vor und nach der Prüfung bei Raumtemperatur gemessen.

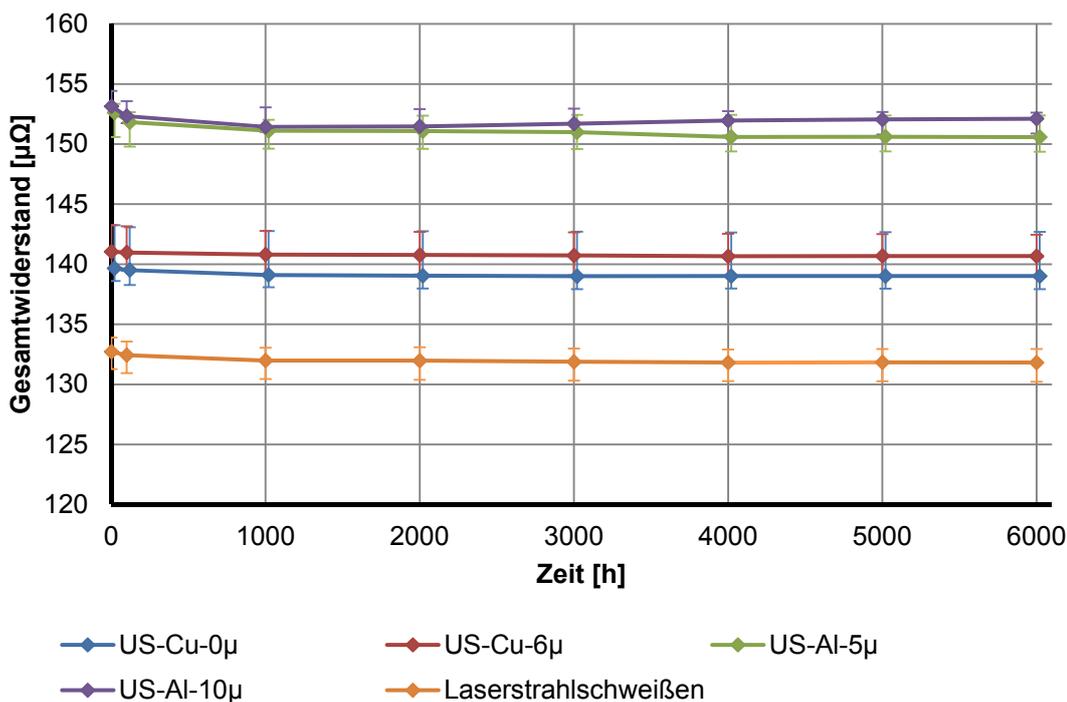


Abbildung 70: Gesamtwiderstand der Doppelverbindungen während der Dauerbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen bei einer Umgebungstemperatur von 140 °C. Median und Spannweite

Tabelle 26: Änderung des Gesamtwiderstands während der Dauerbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen bei einer Umgebungstemperatur von 140 °C

Schweißverfahren	Median unbelastet [$\mu\Omega$]	Median belastet [$\mu\Omega$]	Differenz [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	153,1	152,1	-1,0
US-Al-5 μ	152,6	150,6	-2,0
US-Cu-0 μ	139,7	139,0	-0,7
US-Cu-6 μ	141,0	140,7	-0,4
Laserstrahlschweißen	132,7	131,8	-0,9

Tabelle 27: Gesamtwiderstand der widerstandsgeschweißten Verbindungen vor und nach Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen bei Raumtemperatur

Schweißverfahren	Median unbelastet [$\mu\Omega$]	Median belastet [$\mu\Omega$]	Differenz [$\mu\Omega$]
Widerstandsschweißen	89,19	89,24	0,05

Im Verlauf des Versuchs ändern sich die Widerstandswerte des Gesamtwiderstands nur geringfügig (**Abbildung 70**, **Tabelle 26**). Für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Kupferplättchen verringert sich der Gesamtwiderstand um bis zu $0,7 \mu\Omega$, für Verbindungen mit Aluminiumplättchen um bis zu $2 \mu\Omega$ (**Tabelle 26**). Im Falle der laserstrahlgeschweißten Verbindungen verringert sich der Median des Gesamtwiderstands nach 6.000 Stunden Belastung um $0,9 \mu\Omega$. Für die widerstandsgeschweißten Verbindungen wird der Gesamtwiderstand vor und nach dem Versuch bei Raumtemperatur mit einem Mikroohmmeter gemessen. Der Median des Gesamtwiderstands der widerstandsgeschweißten Verbindungen bei Raumtemperatur ist nahezu unverändert (**Tabelle 27**). Wie beim Versuch zum Einfluss von Temperatur- und Stromzyklen wird der Verbindungswiderstand einer Schweißverbindung aus dem gemessenen Gesamtwiderstand einer Doppelverbindung berechnet (siehe Abschnitt 3.7.4.1). Zur Verifikation der Modellierung des Verbindungswiderstands der Komponenten der Doppelverbindungen wurden an anderen Prüflingen Widerstandswerte der Schweißverbindungen R_{SW} bei Raumtemperatur gemessen (**Tabelle 14**, **Tabelle 18**). Die Differenz dieser Messwerte zu den berechneten Werten des Verbindungswiderstands nach einer Stunde Belastungsdauer ist kleiner als $0,8 \mu\Omega$, die berechneten Werte des Verbindungswiderstands stimmen daher mit diesen Werten in guter Näherung überein (**Tabelle 14**, **Tabelle 28**). Der Verlauf des berechneten Verbindungswiderstands der Schweißverbindungen während des Versuchs ist nachfolgend grafisch und tabellarisch dargestellt (**Abbildung 71**, **Abbildung 72**, **Tabelle 28**).

Für alle Varianten des Ultraschallschweißens sowie für das Laserstrahlschweißen ändert sich der berechnete Verbindungswiderstand um maximal $0,3 \mu\Omega$ (**Tabelle 28**). In einer anderen Arbeit wurden unbeschichtete Aluminium/Kupfer Stromschienen 8.000 h mit einer Temperatur von $140 \text{ }^\circ\text{C}$ belastet. Dies führt zu einem Anstieg des Verbindungswiderstands um den Faktor fünf [SCH-09]. Bei Belastung mit einer Temperatur von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde in einer anderen Arbeit bereits nach acht Stunden ein Anstieg des Verbindungswiderstands um 643 % gemessen [BON-48]. In Relation zu diesen Änderungen sind die gemessenen Änderungen des Gesamtwiderstands sowie die berechneten Änderungen des Verbindungswiderstands gering.

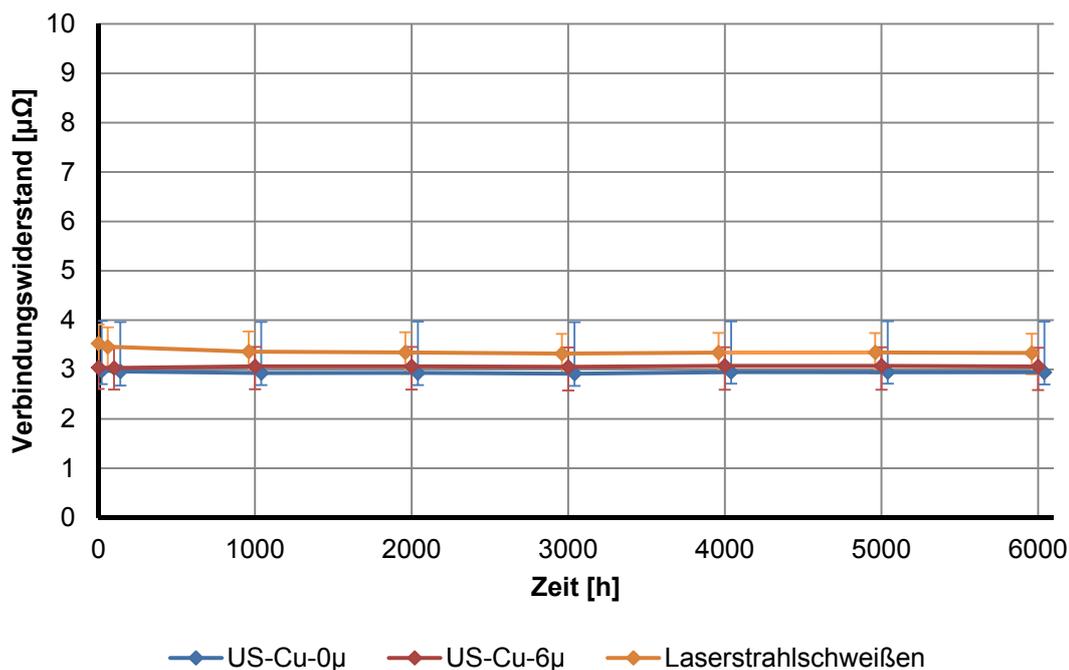


Abbildung 71: Aus dem Gesamtwiderstand berechneter Verbindungswiderstand der Schweißverbindungen während der Dauerbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen für die Varianten US-Cu und Laserstrahlschweißen bei 20 °C. Median und Spannweite

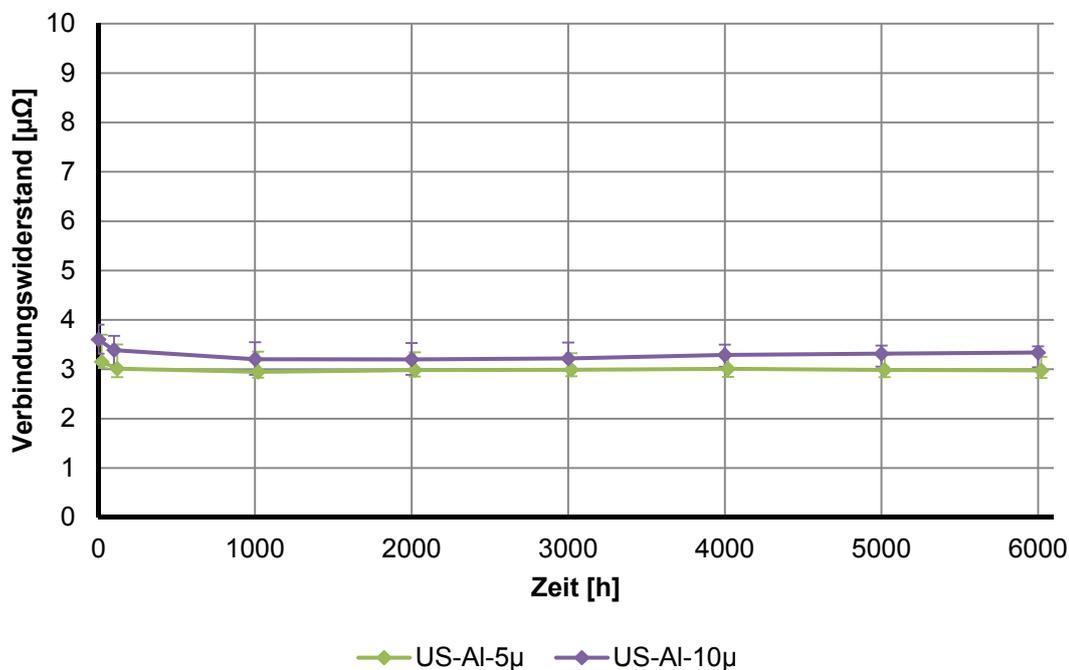


Abbildung 72: Aus dem Gesamtwiderstand berechneter Verbindungswiderstand der Schweißverbindungen während der Dauerbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen für die Varianten US-Cu und Laserstrahlschweißen bei 20 °C. Median und Spannweite

Tabelle 28: *Änderung des Verbindungswiderstands während der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen. Berechnet aus Messwerten des Gesamtwiderstands*

Schweißverfahren	Median unbelastet [$\mu\Omega$]	Median belastet [$\mu\Omega$]	Differenz [$\mu\Omega$]
US-Al-10 μ	3,60	3,34	-0,27
US-Al-5 μ	3,15	2,97	-0,18
US-Cu-6 μ	3,04	3,06	0,02
US-Cu-0 μ	2,98	2,94	-0,03
Laserstrahlschweißen	3,53	3,33	-0,19

3.8.4.3 Deratingmessungen

Zur Bewertung der Änderung der Stromtragfähigkeit durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen werden vor und nach der Prüfung Deratingmessungen durchgeführt (in Abbildung 73 für widerstandsgeschweißte Verbindungen). Es werden Messungen mit jeweils zwei Doppelverbindungen pro Variationsparameter nach Tabelle 5 durchgeführt. Zum Ermitteln der Stromtragfähigkeit werden Stromstärken von 100 A, 200 A und 300 A verwendet (siehe auch Abschnitt 3.7.4.2). Die aus der Basis-Strombelastbarkeitskurve ermittelten Stromtragfähigkeiten vor und nach Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen sind bei 120 °C Umgebungstemperatur tabellarisch zusammengefasst. Durch die Belastung ändert sich die Stromtragfähigkeit der Verbindungen um bis zu 2,01 % gegenüber dem unbelasteten Zustand (**Tabelle 29**).

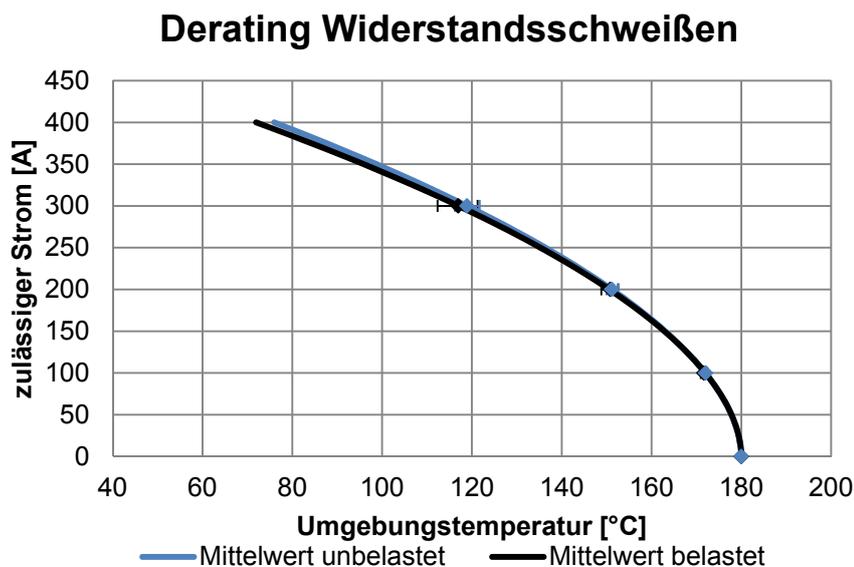


Abbildung 73: *Basis-Strombelastbarkeitskurve vor und nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen. Interpolierte Kurven nach [DIN 60512-5-2], Messwerte und Spannweite*

Tabelle 29: *Ermittelte Stromtragfähigkeit aus der Basis-Strombelastbarkeitskurve der unbelasteten und mit hohen Temperaturen und Strömen belasteten Verbindungen bei 120 °C Umgebungstemperatur*

Schweißverfahren	Stromtragfähigkeit unbelastet [A]	Stromtragfähigkeit gealtert [A]	Absolute Änderung [A]	Relative Änderung [%]
US-Al-10 μ	304,2	299,0	-5,2	-1,72
US-Al-5 μ	306,1	301,1	-5,1	-1,65
US-Cu-0 μ	303,6	309,7	6,1	2,01
US-Cu-6 μ	307,7	313,3	5,6	1,82
Laserstrahlschweißen	311,5	311,9	0,4	0,12
Widerstandsschweißen	297,1	292,3	-4,7	-1,60

Um Unsicherheiten bei der Temperaturmessung und in der Messanordnung zu berücksichtigen, ist es üblich, auf die Basis-Strombelastbarkeitskurve einen Korrekturfaktor von 0,8 anzuwenden [DIN 60512-5-2]. In Relation zu dem üblichen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Messunsicherheit sind die gemessenen Änderungen der Stromtragfähigkeit gering. Die größte Änderung der Stromtragfähigkeit durch die Langzeitbelastung wird für die Variante US-Cu-0 μ ermittelt und beträgt 2,01 % (**Tabelle 29**).

3.8.4.4 Schälversuche

Die bezogenen Schälkräfte der Variante US-Cu-6 μ sind nach der Belastung signifikant höher als im unbelasteten Fall. Aufgrund der Prozessschwankungen bei der Herstellung der ultraschallgeschweißten Verbindungen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die höheren Schälkräfte auf Schwankungen beim Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Verbindungen der Variante US-Cu-0 μ weisen nach Versuchsende nur noch eine geringe bezogene Schälkraft auf. Der Mittelwert der bezogenen Schälkraft hat im Vergleich zu den unbelasteten Verbindungen stark abgenommen, weiterhin ergibt eine statistische Auswertung (Zweistichproben t-Test, $\alpha = 5\%$) signifikante Änderungen hinsichtlich der bezogenen Schälkraft.

Im Vergleich zu den unbelasteten Verbindungen ist die Schälkraft der laserstrahlgeschweißten Verbindungen nach Beenden des Langzeitversuchs statistisch signifikant höher (Zweistichproben t-Test, $\alpha = 5\%$) (**Abbildung 74**). Für die Varianten US-Al ergeben sich keine signifikanten Änderungen im Vergleich zu unbelasteten Verbindungen.

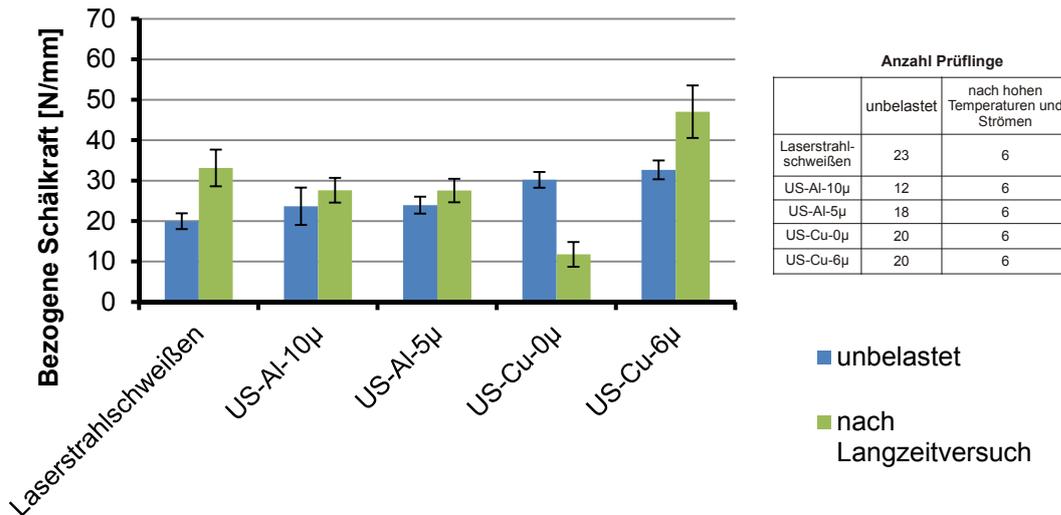


Abbildung 74: Auf die Verbindungsbreite bezogene Schälkräfte nach Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall

3.8.4.5 Schliffbilder

Unbelastete laserstrahlgeschweißte Verbindungen versagen direkt an der Grenzfläche zum Kupfersubstrat (**Abbildung 75**, links). Im Schälversuch versagen mit hohen Temperaturen und Strömen belastete Verbindungen bei deutlich höheren Schälkräften als unbelastete Verbindungen (**Abbildung 74**). Um eine mögliche Änderung des Versagensbilds bewerten zu können, werden Schliffbilder von zwei der bei hohen Temperaturen belasteten und anschließend geschälten Verbindungen angefertigt. Die Bruchstelle der belasteten Verbindungen liegt nicht an der Grenzfläche zum Kupfersubstrat, sondern ist weiter in Richtung der Schmelzzone (Bereich des Aluminiums) verschoben (**Abbildung 75**).

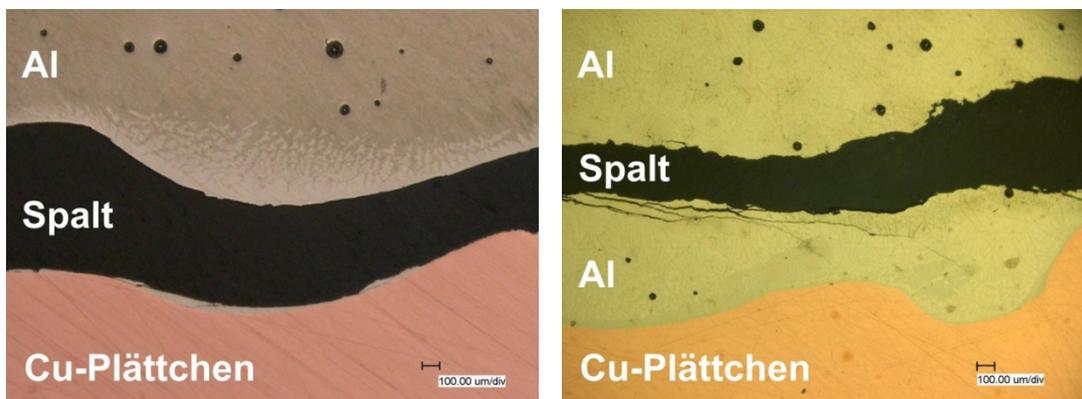


Abbildung 75: Schliffbild einer laserstrahlgeschweißten Verbindung nach Durchführung des Schälversuchs. Links: Bruchstelle der unbelasteten Verbindung, rechts: Bruchstelle nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

3.8.4.6 Zugversuch widerstandsgeschweißter Verbindungen

Durch die Dauerbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen ändert sich die Auszugskraft der widerstandsgeschweißten Verbindungen im Vergleich zu den unbelasteten Verbindungen nur geringfügig (**Abbildung 76**). Nach Beenden des Versuchs ist der Mittelwert der Auszugskraft 67 N kleiner als im unbelasteten Fall. Dies stellt keine signifikante Änderung dar.

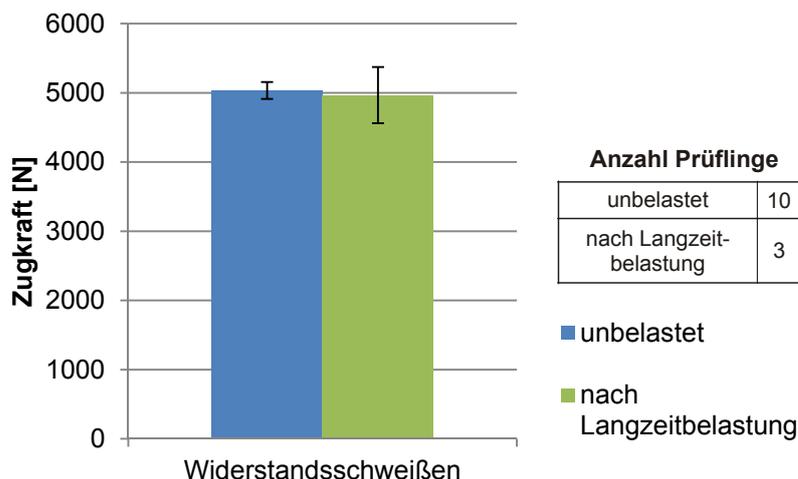


Abbildung 76: *Ermittelte Auszugkräfte nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall*

3.8.4.7 EDX-Analyse

In Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Schlifffbilder der belasteten Verbindungen sind für alle untersuchten Varianten intermetallische Phasen nachweisbar. Die intermetallischen Phasen treten für die Schweißverfahren Ultraschallschweißen und Widerstandsschweißen nicht in Form von Bändern, sondern als einzelne, untereinander nicht verbundene Bereiche auf (**Abbildung 77**, **Abbildung 78**).

Für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Silberbeschichtung treten die intermetallischen Phasen im Bereich der Silberbeschichtung auf (**Abbildung 77**, **Abbildung 78**), für die Variante US-Cu-0 μ sind an der Grenzfläche zwischen Aluminium und Kupfer intermetallische Phasen erkennbar (**Abbildung 83**). Die Dicke der intermetallischen Phasen der Variante US-Cu-0 μ wird im Punkt P1 zu ca. 3 μ m bestimmt (**Abbildung 83**). Im Punkt P1 ist das Masseverhältnis von Aluminium zu Kupfer 19,5 Gewichtsprozent zu 80,5 Gewichtsprozent. Dies entspricht der Phase γ_2 (Cu₂Al) (**Tabelle 2**). Im Falle der Variante US-Cu-6 μ treten die Elemente Aluminium, Kupfer und Silber in der Schweißzone in unterschiedlichen Gewichtsverhältnissen auf (**Tabelle 30**).

Bei den laserstrahlgeschweißten Verbindungen sind die intermetallischen Phasen sowohl für unbelastete als auch für belastete Verbindungen in der gesamten Schweißzone räumlich verteilt (**Abbildung 79**, **Abbildung 80**). Das Phasenband zwischen dem Kupferplättchen und der Schweißzone ist bei den mit hohen Temperaturen und Strömen belasteten Verbindungen deutlich breiter als bei unbelasteten Verbindungen (**Abbildung 79**). Aus der EDX-Analyse ist ersichtlich, dass der Übergang von 100 gew. % zu 75 gew. % Kupfer bei den belasteten Verbindungen nicht abrupt erfolgt, sondern sich über das gesamte Phasenband erstreckt (Messpunkt P20 bis P23 in **Abbildung 80**).

Für widerstandsgeschweißte Verbindungen bilden sich die intermetallischen Phasen insbesondere im Bereich der Ecken der Kupferhülsen (**Abbildung 81**). Mittels EDX-Analyse werden bei den widerstandsgeschweißten Verbindungen intermetallische Phasen mit hohen Anteilen an Aluminium und Kupfer sowie geringen Silberanteilen nachgewiesen (**Abbildung 82**). Die intermetallischen Phasen treten insbesondere im Bereich der Ecken der Kupferhülse auf (**Abbildung 81**, **Abbildung 82**).

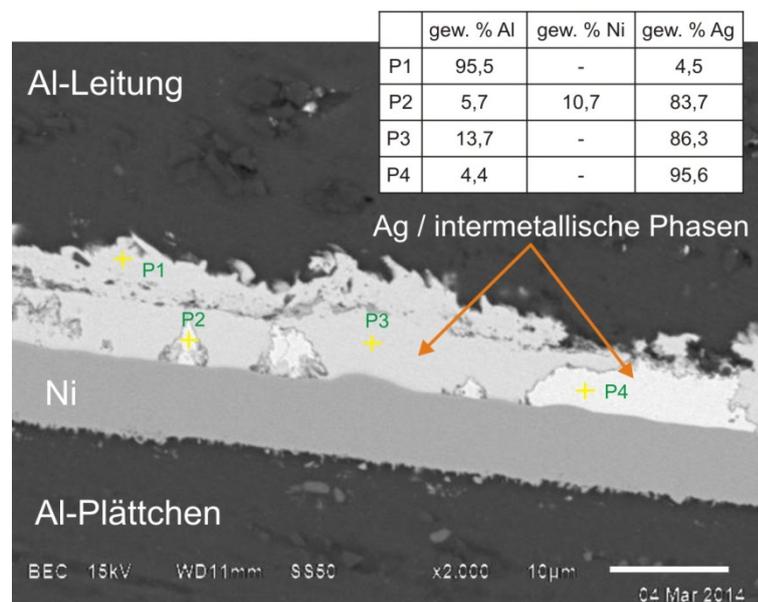


Abbildung 77: REM-Aufnahme des Querschliffs US-Al-5 μ mit intermetallischen Phasen nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

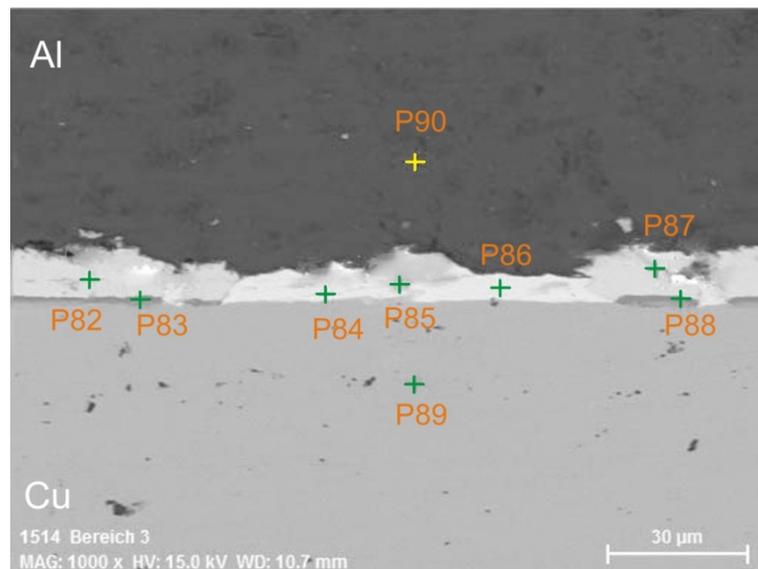


Abbildung 78: REM-Aufnahme des Querschliffs US-Cu-6 μ mit intermetallischen Phasen nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

Tabelle 30: EDX-Analyse an ausgewählten Punkten im Schliffbild US-Cu-6 μ

Messpunkt	Massenprozent Element		
	Al	Cu	Ag
P82	15	-	84,9
P83	37,8	62,2	-
P84	-	-	100
P85	-	60,1	39,9
P86	-	3,9	96,1
P87	14,9	-	85,1
P88	39,8	52,4	7,9
P89	-	100	-
P90	100	-	-

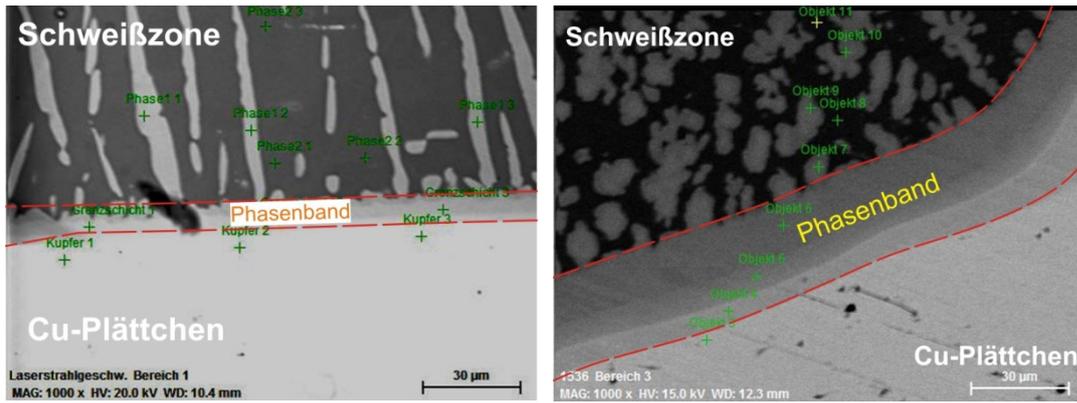
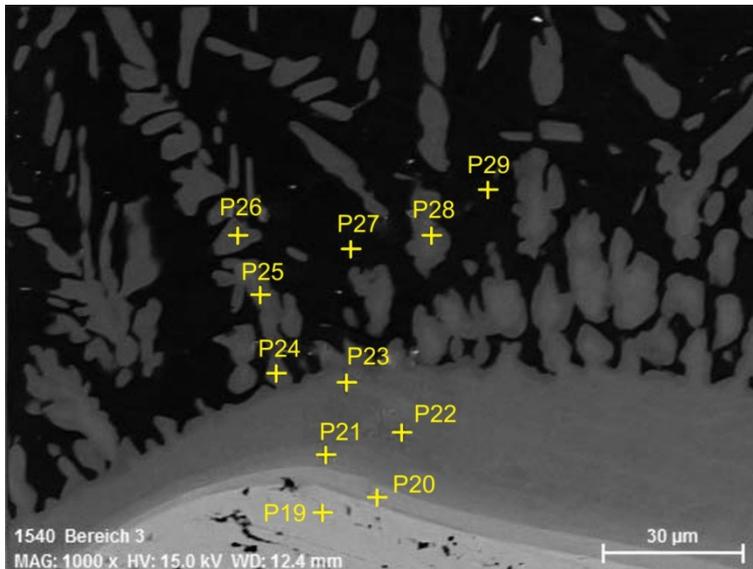


Abbildung 79: Querschliff einer laserstrahlgeschweißten Verbindung. Links: Unbelastete Verbindung mit schmalem Phasenband. Rechts: Mit hohen Temperaturen und Strömen belastete Verbindung mit breiterem Phasenband



	gew. % Al	gew. % Cu
P 19	-	100
P 20	10,9	89,1
P 21	19,7	80,3
P 22	21,1	78,9
P 23	22,6	77,4
P 24	26,3	73,7
P 25	25,4	74,6
P 26	26,2	73,8
P 27	42,6	57,4
P 28	24,7	75,3
P 29	40,6	59,4

Abbildung 80: REM-Aufnahme mit EDX-Analyse einer laserstrahlgeschweißten Verbindung nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

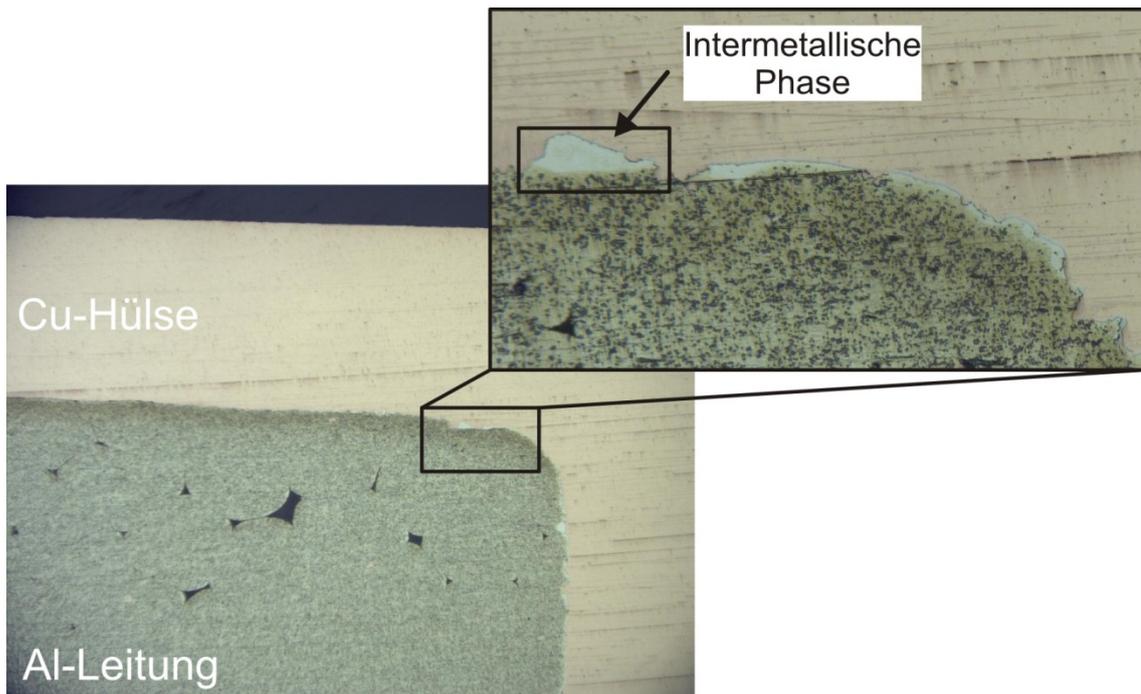


Abbildung 81: Querschliff einer widerstandsgeschweißten Verbindung nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

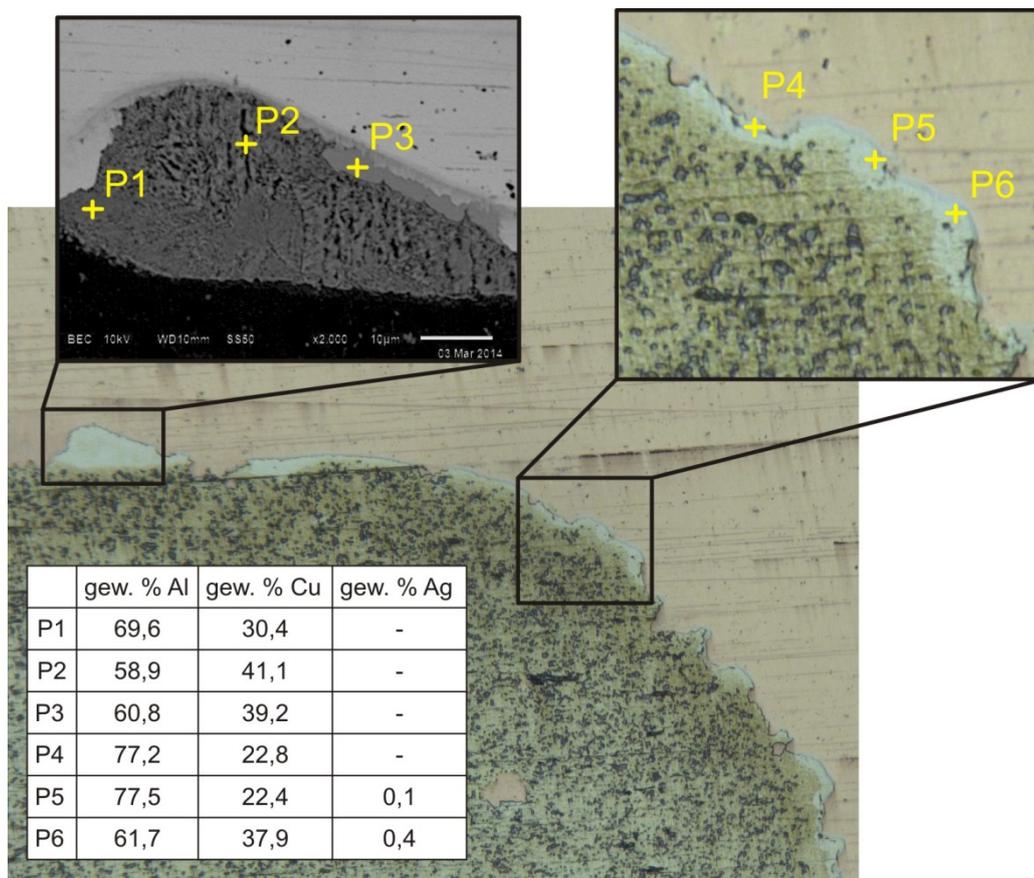


Abbildung 82: Querschliff einer widerstandsgeschweißten Verbindung nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

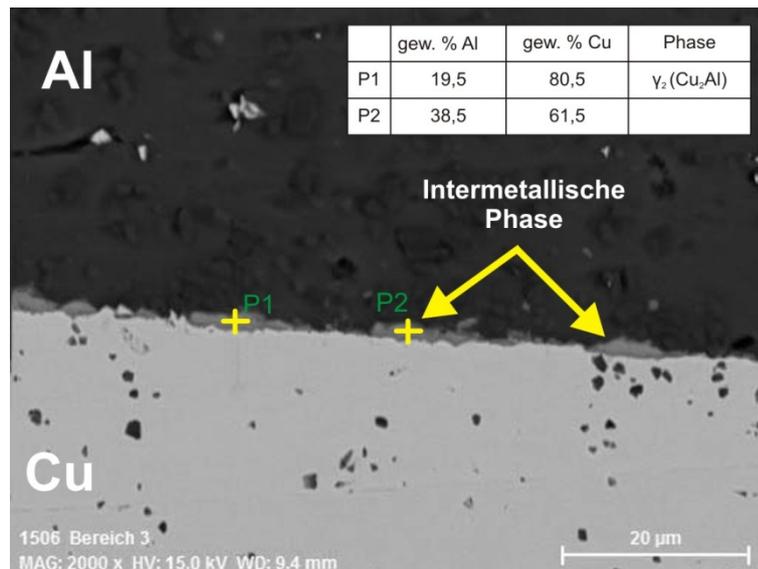


Abbildung 83: REM-Aufnahme des Querschliffs US-Cu-0 μ mit intermetallischen Phasen nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen

3.9 Diskussion der Ergebnisse

3.9.1 Einfluss von Temperaturwechseln

Durch Temperaturwechsel können bei stoffschlüssigen Multimaterialverbindungen mechanische Spannungen entstehen. Grund ist, dass sich die Materialien bedingt durch den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verschieden stark ausdehnen. Der Einfluss der Belastung mit schnellen Temperaturwechseln auf die Verbindungen stellt sich wie folgt dar:

Im Falle der ultraschallgeschweißten Verbindungen sind die Mittelwerte der bezogenen Schälkraft nach der Prüfung jeweils höher als für unbelastete Verbindungen (**Abbildung 54**). Signifikante Änderungen ergeben sich für die Varianten US-Al-5 μ und US-Cu-6 μ , für die Varianten US-Al-10 μ und US-Cu-0 μ sind die Änderungen nicht signifikant. Bei der Durchführung von Schälversuchen mit unbelasteten ultraschallgeschweißten Verbindungen wurden Prozessschwankungen bei der Herstellung nachgewiesen (siehe Abschnitt 3.5). Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die teilweise höheren Schälkräfte auf Schwankungen beim Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Durch die Belastung wird die bezogene Schälkraft für alle Varianten nicht negativ beeinflusst. Für laserstahlgeschweißte und widerstandsgeschweißte Verbindungen wird kein signifikanter Einfluss der Belastung auf mechanischen Eigenschaften nachgewiesen (**Abbildung 54**, **Abbildung 55**). Somit wird für keine der untersuchten Varianten ein negativer Einfluss der Belastung auf die mechanische Beständigkeit gemessen.

In einer anderen Arbeit wurde der Einfluss von schnellen Temperaturwechseln auf die mechanische Beständigkeit von ultraschallgeschweißten Verbindungen mit Aluminiumleitungen und Kupferplättchen untersucht [BAT-06] (siehe auch Abschnitt 2.6.1).

In der genannten Arbeit wurde nach einer Temperaturwechselbelastung mit 100 Zyklen der Abfolge $85\text{ °C} - 0\text{ °C} - 85\text{ °C}$ ebenfalls kein negativer Einfluss der Belastung auf die mechanische Beständigkeit festgestellt [BAT-06]. Somit sind die Unterschiede der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Kupfer nicht so hoch, dass es für die untersuchten Schweißverfahren und den geprüften Temperaturunterschied zu einer mechanischen Schädigung der Verbindung kommt.

3.9.2 Einfluss von Temperatur- und Stromzyklen

In einem Bordnetz sind die Verbindungen Temperaturwechseln im Bereich von -40 °C bis $+180\text{ °C}$ ausgesetzt. Ergänzend zur Untersuchung des Einflusses von schnellen Temperaturwechseln wird der Einfluss von Temperatur- und Stromzyklen in diesem Temperaturbereich untersucht. Die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen erfolgt in einem Klimaprüfschrank mit einer Gleichstromquelle (siehe Abschnitt 3.7). Wie bei der Belastung mit schnellen Temperaturwechseln können durch die Temperatur- und Stromzyklen in der Verbindung mechanische Spannungen entstehen. Verringert sich aufgrund der möglichen mechanischen Spannungen die scheinbare oder wahre Verbindungsfläche, ist ein mechanisches oder elektrisches Versagen der Verbindung möglich.

Mechanische Beständigkeit der Verbindungen

Für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Aluminiumplättchen wird durch die Belastung keine signifikante Änderung der bezogenen Schälkraft nachgewiesen (**Abbildung 66**). Für die Variante US-Cu- 6μ ist die bezogene Schälkraft nach der Belastung signifikant höher als im unbelasteten Fall. Aufgrund der Prozessschwankungen bei der Herstellung der Verbindung kann nicht ausgeschlossen werden, dass die höhere Schälkraft auf Schwankungen beim Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Die bezogene Schälkraft der Variante US-Cu- 0μ ist nach der Belastung signifikant kleiner als im unbelasteten Zustand. Die EDX-Analyse liefert für alle Varianten des Ultraschallschweißens keinen Hinweis auf Wachstum intermetallischer Phasen durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen (**Tabelle 24**). Es ist daher unwahrscheinlich, dass das unterschiedliche Verhalten der Varianten US-Cu- 6μ und US-Cu- 0μ auf das Wachstum intermetallischer Phasen zurückzuführen ist. Der Wert des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silber liegt zwischen dem Wert von Aluminium und Kupfer (**Tabelle 3**). Eine mögliche Erklärung für das unterschiedliche Verhalten ist, dass die Silberbeschichtung auf den Verbindungen der Variante US-Cu- 6μ den Einfluss der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen auf die mechanische Beständigkeit abmildert. In einer anderen Arbeit wird ebenfalls eine Temperaturwechselprüfung mit ultraschallgeschweißten Verbindungen durchgeführt. Untersucht werden Schweißverbindungen zwischen einer Aluminiumleitung (Querschnitt 10 mm^2) und unbeschichteten Kupferplättchen [BAT-06]. Die Verbindungen werden in einem Klimaprüfschrank in einer dreistündigen Aufheizphase von 25 °C auf 55 °C aufgeheizt.

Nach einer dreistündigen Haltezeit werden die Verbindungen erneut innerhalb von drei Stunden auf 25 °C abgekühlt. Die relative Feuchte beträgt während der Prüfung zwischen 93 und 97 %, der beschriebene neunstündige Zyklus wird 6 mal wiederholt. Es wird keine signifikante negative Beeinflussung der mechanischen Beständigkeit nachgewiesen [BAT-06]. Der in [BAT-06] untersuchte Temperaturzyklus deckt jedoch einen kleineren Temperaturbereich ab, als der in dieser Arbeit untersuchte Zyklus. Weiterhin ist die Zyklenzahl bedeutend kleiner als die Zyklenzahl in dieser Arbeit (6 anstatt 120). Bei den laserstrahlgeschweißten und den widerstandsgeschweißten Verbindungen ergeben sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die mechanische Stabilität (**Abbildung 66**, **Abbildung 67**). Ausschließlich für die Variante US-Cu-0 μ ist die mechanische Beständigkeit der Verbindungen nach der Belastung signifikant kleiner, wobei bereits bei der Herstellung der Verbindungen dieser Variante Prozessschwankungen aufgetreten sind. Eine schädigende Wirkung der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen ist somit lediglich für Verbindungen der Variante US-Cu-0 μ wahrscheinlich.

Elektrische Beständigkeit der Verbindungen

Die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen kann z.B. durch eine Verringerung der wahren Kontaktfläche auch einen schädigenden Einfluss auf die elektrische Beständigkeit der Verbindungen ausüben. Zur Bewertung des Einflusses auf die elektrische Beständigkeit werden die Änderung des Verbindungswiderstands während der Prüfung und die Änderung der Stromtragfähigkeit ermittelt. Für ultraschallgeschweißte und laserstrahlgeschweißte Verbindungen beträgt die größte gemessene Änderung des Medians des Verbindungswiderstands 0,24 $\mu\Omega$ (**Tabelle 22**). Im Falle der widerstandsgeschweißten Verbindungen ergibt sich eine Änderung des Medians des Verbindungswiderstands von 1,45 $\mu\Omega$, in Relation zur Spannweite der gemessenen Werte stellt dies jedoch eine geringe Änderung dar (**Abbildung 64**). In einer anderen Arbeit wird das Langzeitverhalten einer Stromschienenverbindung bestehend aus einer versilberten Kupferstromschiene und einer unbeschichteten Aluminiumstromschiene untersucht. Durch eine Auslagerung bei 105 °C für 10.000 Stunden steigt der Verbindungswiderstand von ca. 2,2 $\mu\Omega$ auf ca. 6,2 $\mu\Omega$ an [SCH-09]. In Relation zu dieser Änderung sind die gemessenen Änderungen des Verbindungswiderstands durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen gering. Die Stromtragfähigkeit ändert sich durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen um bis zu 4,1 % (**Tabelle 23**). Um Unsicherheiten bei der Temperaturmessung und in der Messanordnung zu berücksichtigen, ist es üblich, auf die Basis-Strombelastbarkeitskurve einen Korrekturfaktor von 0,8 anzuwenden [DIN 60512-5-2]. In Relation zu dem üblichen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Messunsicherheit sind die gemessenen Änderungen der Stromtragfähigkeit gering (**Tabelle 23**).

Aufgrund der geringen Änderung des Gesamtwiderstands durch die Belastung und die geringe Änderung der Stromtragfähigkeit wird der Einfluss der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen auf die elektrische Beständigkeit als gering eingestuft.

3.9.3 Einfluss von Langzeitbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen

Durch hohe Temperaturen und Ströme können die Schweißverbindungen insbesondere durch Interdiffusion altern. In einem Langzeitversuch werden die Verbindungen für 6.000 Stunden in einem Wärmeofen belastet (siehe Abschnitt 3.8).

Mechanische Beständigkeit der ultraschallgeschweißten Verbindungen

Die mechanische Beständigkeit von ultraschallgeschweißten Verbindungen wurde zunächst an Schweißverbindungen mit Aluminiumleitungen mit PVC-Mantel untersucht (Bezeichnung US-Cu-6 μ PVC in **Abbildung 84**). Schweißverbindungen mit PVC-Mantel weisen eine auf die Verbindungsbreite bezogene Schälkraft von 50,8 N/mm auf (**Abbildung 84**). Für Versuche mit hohen Temperaturen ist die thermische Beständigkeit des PVC-Mantels von 105 °C nicht ausreichend, daher werden Ultraschallschweißverbindungen mit einer Aluminiumleitung mit Silikonmantel hergestellt. Bei der Herstellung von Schweißverbindungen mit Silikonmantel sind Prozessschwankungen aufgetreten.

Einige Schweißverbindungen konnten teilweise mit der Hand abgelöst werden bzw. nicht alle Einzeldrähte überdecken die gesamte Schweißverbindung (**Abbildung 48**). Zur Durchführung von Versuchen wurden Verbindungen ausgewählt, welche die beschriebenen Mängel nicht aufweisen. Im unbelasteten Zustand ist die bezogene Schälkraft der Verbindungen mit Silikonmantel signifikant kleiner als die bezogene Schälkraft der Verbindungen mit PVC-Mantel (**Abbildung 84**). In Schliffbildern und der EDX-Analyse werden für unbelastete Verbindungen keine intermetallischen Phasen nachgewiesen.

Schälkräfte Ultraschallschweißen

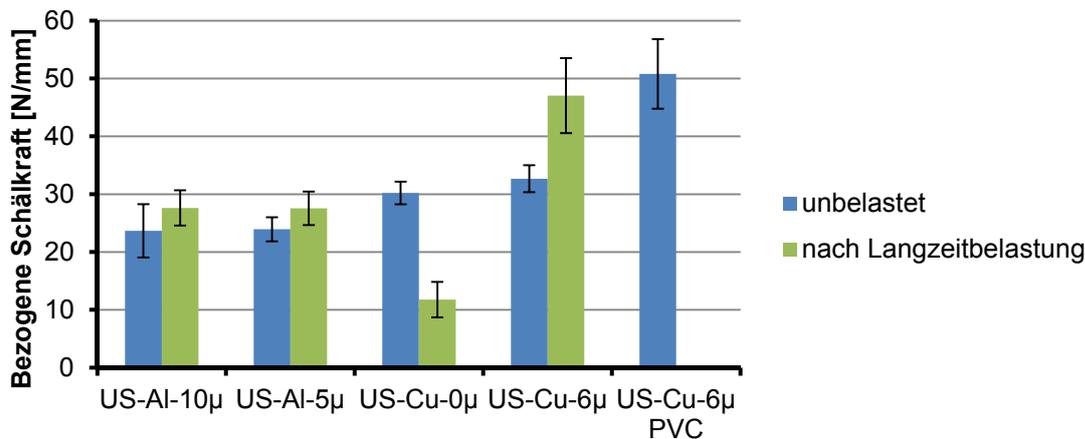


Abbildung 84: Auf die Verbindungsbreite bezogene Schälkräfte nach Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen. Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall

Im Schälversuch werden für die Varianten US-Al nach der Langzeitbelastung im Wärmeofen keine signifikanten Änderungen gegenüber dem unbelasteten Zustand gemessen (**Abbildung 84**). Nach 6.000 h Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen ist die mechanische Stabilität der Variante US-Cu-0µ drastisch reduziert, der Mittelwert der bezogenen Schälkraft beträgt nur noch 11,8 N/mm (**Abbildung 84**). Die Änderung ist signifikant, weiterhin hat sich der Mittelwert auf etwa 1/3 des Werts der unbelasteten Verbindungen verringert. Für die Variante US-Cu-6µ ergeben sich nach der Belastung signifikant größere Schälkräfte als im unbelasteten Zustand. Beim Schweißprozess der Verbindungen sind Prozessschwankungen aufgetreten. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die höheren Schälwerte nach den Belastungen auf ebendiese Prozessschwankungen zurückzuführen sind. Die bezogenen Schälkräfte unterscheiden sich weiterhin nach der Langzeitbelastung nicht signifikant von den bezogenen Schälkräften der unbelasteten Verbindungen der Variante US-Cu-6µ-PVC (**Abbildung 84**). In Schlibbildern werden nach der Belastung für sämtliche Varianten des Ultraschallschweißens intermetallische Phasen nachgewiesen (**Abbildung 78**, **Abbildung 83**). Die intermetallischen Phasen treten als einzelne, untereinander nicht verbundene Bereiche auf. Im Falle der Variante US-Cu-0µ entstehen die intermetallischen Phasen an der Grenzfläche zwischen dem Kupferplättchen und der Aluminiumleitung (**Abbildung 83**). Die Dicke der intermetallischen Phasen der Variante US-Cu-0µ wird im Punkt P1 zu ca. 3 µm bestimmt (**Abbildung 83**). In diesem Punkt beträgt das Masseverhältnis von Aluminium zu Kupfer 19,5 Gewichtsprozent zu 80,5 Gewichtsprozent. Dies entspricht der Phase γ_2 (Cu₂Al) (**Tabelle 2**). Bei den Varianten US-Cu-6µ und US-Al treten die intermetallischen Phasen im Bereich der Silberbeschichtung auf, wobei die Elemente Aluminium, Kupfer und Silber in unterschiedlichen Gewichtsverhältnissen nachgewiesen werden (**Abbildung 77**, **Abbildung 78**).

In einigen Arbeiten zum Langzeitverhalten von Schweißverbindungen und von bedingt lösbaren Verbindungen entstehen die intermetallischen Phasen in Form von Bändern [BRA-93], [BRA-94], [RAY-79], [SCH-09], [WAL-77a]. So wurde in einer Arbeit nach der Auslagerung einer versilberten Stromschiene bei 180 °C für 5.500 Stunden eine durchgehende intermetallische Phase mit einer Gesamtdicke von ca. 7 µm nachgewiesen [SCH-09]. Anhand der gemessenen Schälkräfte nach der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen ist ersichtlich, dass lediglich für die Variante US-Cu-0µ eine negative Beeinträchtigung der mechanischen Beständigkeit stattfindet. In Form von Bändern beeinflussen intermetallische Phasen die Duktilität wesentlich mehr, als in Form von kleinen, getrennten Einschlüssen [MYS-04]. In anderen Arbeiten kam es bei Vorhandensein von intermetallischen Phasen zu Rissbildung innerhalb der Phasen und an Grenzen zur Nachbarphase [BRA-93], [NAK-77]. Eine mögliche Erklärung für die unbeeinträchtigte mechanische Stabilität der Varianten US-Al und US-Cu-6µ ist somit, dass die intermetallischen Phasen als einzelne, untereinander nicht verbundene Bereiche auftreten. Weiterhin unterscheidet sich die Elementzusammensetzung der Phasen in der Variante US-Cu-0µ von der Elementzusammensetzung in den übrigen ultraschallgeschweißten Verbindungen. Die intermetallischen Phasen der Variante US-Cu-0µ stammen aus dem System Aluminium/Kupfer, wie etwa die Phase γ_2 (Cu_2Al) in Punkt P1 (**Abbildung 83**). Für die übrigen ultraschallgeschweißten Verbindungen werden auch intermetallische Phasen mit einem hohen Silberanteil nachgewiesen (P84 bis P87 in **Tabelle 30**). Für die Varianten US-Cu-6µ und US-Al-10µ werden in einigen Phasen die Elemente Aluminium und Silber im Massenverhältnis 15 zu 85 nachgewiesen (P87 in **Tabelle 30** für US-Cu-6µ). Dies entspricht der Phase γ (Ag_2Al) aus dem System Aluminium/Silber. Intermetallische Phasen mit hohem Silberanteil haben in einer Untersuchung der mechanischen Festigkeit von laserstrahlgeschweißten Aluminium-Kupfer Verbindungen einen positiven Einfluss auf die Duktilität der Verbindung [MYS-04]. Grundsätzlich können intermetallische Phasen in Abhängigkeit von der homologen Übergangstemperatur vom spröden in den duktilen Zustand in eher spröde und eher duktile Phasen eingeteilt werden [PAU-77]. Die Phase Al_2Cu aus dem System Aluminium Kupfer zählt zu den eher spröden Phasen, wohingegen die Phase Ag_2Al als eher duktil eingestuft wird [PAU-77]. Somit haben zwei Einflussfaktoren möglicherweise einen positiven Einfluss auf die mechanische Beständigkeit der Verbindungen der Varianten US-Cu-6µ und US-Al: Die intermetallischen Phasen sind nicht miteinander verbunden, sodass die schädigende Wirkung abgemildert wird. Weiterhin sind intermetallische Phasen mit einem hohen Silberanteil entstanden, die nicht so spröde sind, wie intermetallische Phasen aus dem System Aluminium/Kupfer. Ein ähnliches Verhalten in Bezug auf die mechanische Stabilität wurde bei laserstrahlgeschweißten Aluminium/Kupfer Verbindungen festgestellt, bei denen bereits beim Schweißvorgang intermetallische Phasen entstehen: Verbindungen ohne Silberzusatz versagen in der Zugprüfung früher, als Verbindungen, bei denen ein Silberzusatz verwendet wird.

Das unterschiedliche Verhalten wird mit der geringeren Duktilität der intermetallischen Phasen aus dem System Aluminium/Kupfer begründet [MYS-04], [SAR-93]. In einer anderen Untersuchung von Schweißverbindungen mit Aluminiumleitungen und unbeschichteten Kupferplättchen wurde nach 1049 h Belastung mit einer Temperatur von 85 °C kein negativer Einfluss der mechanischen Beständigkeit festgestellt [BAT-06]. Ein möglicher Grund ist, dass sowohl die Temperatur, als auch die Versuchsdauer kürzer war.

Mechanische Beständigkeit der laserstrahlgeschweißten Verbindungen

Der Mittelwert der bezogenen Schälkraft der unbelasteten laserstrahlgeschweißten Verbindungen beträgt 20 N/mm (**Abbildung 54**), dies ist der niedrigste gemessene Wert aller unbelasteten Verbindungen. Beim Laserstrahlschweißen entstehen prozessbedingt bereits bei der Herstellung intermetallische Phasen, die in der Schweißzone räumlich verteilt sind (**Abbildung 51**). In der EDX-Analyse wird an der Grenzfläche zum Kupferplättchen eine Schicht der intermetallischen Phase Cu_4Al_3 aus dem System Aluminium/Kupfer detektiert (**Abbildung 51**). Die Dicke der intermetallischen Phase beträgt ca. 8 μm .

In der Schweißzone existiert ein abrupter Übergang der Kupferkonzentration von reinem Kupfer auf 75 Gewichtsprozent und die Verbindungen versagen an der Grenzfläche zum Kupferplättchen (**Abbildung 51**, **Abbildung 52**). In einigen anderen Arbeiten ist die mechanische Beständigkeit der Verbindungen stark beeinträchtigt, sobald die Dicke der intermetallischen Phasen einen Wert von 2 μm – 5 μm übersteigt [RAY-79], [BRA-07], [VEE-97]. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten laserstrahlgeschweißten Verbindungen trifft dies nicht zu. Nach der Langzeitbelastung ist das Phasenband der intermetallischen Phasen auf eine Dicke von bis zu 30 μm angewachsen. Trotzdem ist die mechanische Beständigkeit der Verbindungen im belasteten Zustand höher als im unbelasteten Zustand (**Abbildung 74**, **Abbildung 79**). Das Phasenband an der Grenzfläche zum Kupferplättchen ist nach der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen deutlich breiter als im Falle der unbelasteten Verbindungen (**Abbildung 79**). Weiterhin ändert sich die Kupferkonzentration von 100 Gewichtsprozent auf 75 Gewichtsprozent an der Grenzfläche zum Kupferplättchen nicht sprunghaft, sondern erstreckt sich über das gesamte Phasenband (**Abbildung 80**). Diese Änderung ist vermutlich auf Diffusionsvorgänge zurückzuführen und beeinflusst das Bruchverhalten der Verbindung. Die Bruchstelle ist für die mit hohen Temperaturen und Strömen belastete Verbindungen in Richtung Schweißzone verschoben und die Neigung zu Bruchverhalten bei geringen Schälkräften wird verzögert (**Abbildung 75**).

Mechanische Beständigkeit der widerstandsgeschweißten Verbindungen

Durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen ändert sich die Auszugkraft der widerstandsgeschweißten Verbindungen nicht signifikant (**Abbildung 76**). Im unbelasteten Zustand werden in der EDX-Analyse keine intermetallischen Phasen nachgewiesen. Durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen sind insbesondere im Bereich der Ecken der Kupferhülsen intermetallische Phasen mit einem geringem Silberanteil und einem hohen Aluminium- und Kupferanteil entstanden (**Abbildung 81**, **Abbildung 82**). Die Dicke der intermetallischen Phasen liegt lokal teilweise deutlich über dem in anderen Arbeiten als für die mechanische Stabilität kritisch angesehenen Wert von $2\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$ (**Abbildung 82**). Da bei den widerstandsgeschweißten Verbindungen die Kupferhülse mit der Aluminiumleitung verpresst ist, haben die intermetallischen Phasen vermutlich einen geringeren Einfluss auf die mechanische Stabilität als bei stoffschlüssigen Verbindungen ohne verpresste Hülse.

Elektrische Beständigkeit der Verbindungen

Der Einfluss auf die elektrische Beständigkeit der Verbindung wird durch Vergleich der Widerstandswerte sowie durch einen Vergleich der Stromtragfähigkeit vor und nach der Belastung bewertet. Für die ultraschallgeschweißten und laserstrahlgeschweißten Verbindungen beträgt die Änderung des Gesamtwiderstands durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen maximal $2,0\ \mu\Omega$ (1,3 Prozent, **Tabelle 26**).

Im Falle der widerstandsgeschweißten Verbindungen ergibt sich eine Änderung des Gesamtwiderstands von $0,05\ \mu\Omega$ (**Tabelle 27**). In einer anderen Arbeit wird das Langzeitverhalten einer Stromschienenverbindung bestehend aus einer versilberten Kupferstromschiene und einer unbeschichteten Aluminiumstromschiene untersucht. Durch eine Auslagerung bei $105\ ^\circ\text{C}$ für 10.000 Stunden steigt der Verbindungswiderstand von ca. $2,2\ \mu\Omega$ auf ca. $6,2\ \mu\Omega$ an [SCH-09]. In Relation zu dieser Änderung sind die gemessenen Änderungen des Verbindungswiderstands durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen gering. Die größte Änderung der Stromtragfähigkeit bei $120\ ^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur nach Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen beträgt 3,9 Prozent gegenüber dem Wert der unbelasteten Verbindungen (**Tabelle 23**). In Relation zu dem nach [DIN 60512-5-2] üblichen Korrekturfaktor von 0,8 zur Berücksichtigung der Messunsicherheit sind die gemessenen Änderungen der Stromtragfähigkeit gering. Die durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen entstandenen intermetallischen Phasen haben somit keinen signifikanten negativen Einfluss auf den Verbindungswiderstand und die Stromtragfähigkeit. Im Falle der laserstrahlgeschweißten Verbindungen wird nach der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen ein Band von intermetallischen Phasen mit einer Dicke von bis zu $30\ \mu\text{m}$ nachgewiesen (**Abbildung 79**). Trotzdem sind der Verbindungswiderstand und die Stromtragfähigkeit nahezu unverändert (**Tabelle 29**, **Abbildung 71**).

Der Einfluss der intermetallischen Phasen auf den Verbindungswiderstand der laserstrahlgeschweißten Verbindungen wird wie folgt abgeschätzt: Es wird davon ausgegangen, dass sich eine geschlossene Schicht der intermetallischen Phase γ_2 ausbildet. Dies ist die intermetallische Phase mit dem höchsten spezifischen elektrischen Widerstand im System Aluminium/Kupfer (**Tabelle 2**). Weiterhin wird angenommen, dass sich die intermetallische Phase im Bereich der Schweißverbindung zwischen der Leitung L_1 und dem Kupferplättchen P_1 ausbildet (**Abbildung 39**). Eine solche intermetallische Phase hätte die Form eines Blocks mit der Grundfläche $12 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ entsprechend den Abmessungen der Grundfläche des Leitungsstücks L_1 (**Tabelle 10**). Ferner soll die intermetallische Phase jeweils über die gesamte Berührfläche elektrisch leitend dem Leitungsstück L_1 und dem Plättchen P_1 verbunden sein. In Abhängigkeit von der Dicke d der Phase ergibt sich deren elektrischer Widerstand gemäß Tabelle 31. Bei einer Dicke von $30 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt der Widerstand der intermetallischen Phase lediglich $11,8 \text{ n}\Omega$. Unter der Annahme einer idealen Kontaktierung ($A_c = A_a$) wurde der Verbindungswiderstand einer laserstrahlgeschweißten Verbindung zu $1,55 \text{ }\mu\Omega$ ermittelt, in Relation dazu ist der Einfluss einer intermetallischen Phase der Dicke $30 \text{ }\mu\text{m}$ bei flächiger Kontaktierung vernachlässigbar (**Tabelle 14**, **Tabelle 31**). Der Widerstand der laserstrahlgeschweißten Verbindungen ist nach der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen nahezu unverändert, wobei ein Phasenband mit einer Dicke von bis zu $30 \text{ }\mu\text{m}$ vorhanden ist (**Abbildung 79**).

Somit hat die Verbindung im Bereich der Schweißzone vermutlich einen eher flächigen Charakter, sodass der Einfluss intermetallischer Phasen auf den Verbindungswiderstand der geschweißten Verbindungen geringer ausfällt, als bei lösbaren Verbindungen.

Tabelle 31: *Berechneter Widerstand einer intermetallischen Phase auf einer laserstrahlgeschweißten Verbindung in Abhängigkeit von deren Dicke. Spezifischer Widerstand der intermetallischen Phase: $14,2 \text{ }\mu\Omega \text{ cm}$*

Dicke d [μm]	Widerstand [$\text{n}\Omega$]
1	0,39
5	1,97
10	3,94
20	7,89
30	11,83
50	19,72
100	39,44

3.9.4 Bewertung des Langzeitverhaltens

Die Nutzungsdauer von elektrischen Verbindungen in KFZ-Bordnetzen wird für einen PKW auf 6.000 Betriebsstunden abgeschätzt (siehe Abschnitt 3.8). Der Einfluss der Belastung mit Temperaturwechseln sowie der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen auf die Langzeitstabilität wurde untersucht. Im Folgenden wird die Langzeitstabilität in Bezug auf die untersuchten Belastungen bewertet.

Ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Silberbeschichtung

Für die Varianten US-Al und US-Cu-6 μ hat die Belastung mit Temperaturwechseln sowie mit Temperatur- und Stromzyklen keinen negativen Einfluss auf die mechanische Beständigkeit der Verbindungen (**Abbildung 84**). Die Stromtragfähigkeit der Verbindungen bei 120 °C Umgebungstemperatur nimmt nach der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen sowie nach 6.000 Stunden Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen um bis zu 3,2 % ab (**Tabelle 23**, **Tabelle 29**). In Relation zur Messunsicherheit des Prüfverfahrens stellt dies eine geringe Änderung dar. Somit wird für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Silberbeschichtung kein signifikanter negativer Einfluss der Belastung auf die Langzeitstabilität festgestellt.

Ultraschallgeschweißte Verbindungen mit unbeschichteten Kupferplättchen

Die Stromtragfähigkeit der ultraschallgeschweißten Verbindungen mit unbeschichteten Kupferplättchen ändert sich durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen sowie durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen für 6.000 Stunden um bis zu -3,9 % (**Tabelle 23**, **Tabelle 29**).

Um Unsicherheiten bei der Temperaturmessung und in der Messanordnung zu berücksichtigen, ist es üblich, auf die Basis-Strombelastbarkeitskurve einen Korrekturfaktor von 0,8 anzuwenden [DIN 60512-5-2]. In Relation zu diesem Korrekturfaktor sind die gemessenen Änderungen der Stromtragfähigkeit der Verbindungen gering. In Bezug auf die elektrischen Eigenschaften ergibt sich somit keine signifikante negative Beeinflussung durch die untersuchten Belastungen. Nach der Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen ist die Schälkraft der Verbindungen signifikant kleiner als im unbelasteten Fall (**Abbildung 84**). Nach der Langzeitbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen für 6.000 Stunden beträgt der Mittelwert der Schälkraft nur noch etwa 1/3 des Werts der unbelasteten Verbindungen (**Abbildung 84**). Mittels EDX-Analyse wird die spröde intermetallische Phase γ_2 (Cu₂Al) nachgewiesen (Punkt P1 in **Abbildung 83**). Nach 6.000 Stunden Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen ist die mechanische Beständigkeit der Verbindungen stark reduziert.

Laserstrahlgeschweißte Verbindungen

Die Belastung mit schnellen Temperaturwechseln sowie mit Temperatur- und Stromzyklen hat keine signifikante Änderung der Schälkraft zur Folge (**Abbildung 54**, **Abbildung 66**). Nach der Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen für 6.000 Stunden ist die Schälkraft sogar deutlich höher als im unbelasteten Fall. In Bezug auf die Stromtragfähigkeit werden keine signifikanten Änderungen durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen sowie durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen gemessen. Die Stromtragfähigkeit nimmt für laserstrahlgeschweißte Verbindungen um maximal 0,7 % ab (**Tabelle 23**, **Tabelle 29**). Daher haben die untersuchten Belastungen keinen signifikanten negativen Einfluss auf die mechanische und elektrische Beständigkeit während der Nutzungsdauer der Verbindungen (6.000 h).

Widerstandsgeschweißte Verbindungen

Durch sämtliche untersuchten Belastungen findet keine signifikante Änderung der mechanischen Beständigkeit der widerstandsgeschweißten Verbindungen statt (**Abbildung 55**, **Abbildung 67**, **Abbildung 76**). Durch die Belastung mit Temperatur- und Stromzyklen sowie durch die Belastung mit hohen Temperaturen und Strömen nimmt die Stromtragfähigkeit um bis 4,1 % ab (**Tabelle 23**, **Tabelle 29**). In Relation zu dem nach [DIN 60512-5-2] üblichen Korrekturfaktor von 0,8 zu Berücksichtigung von Messunsicherheiten stellt dies eine geringe Änderung dar. Somit findet für die widerstandsgeschweißten Verbindungen keine signifikante Änderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften durch die untersuchten Belastungen statt. Die Langzeitbelastung mit hohen Temperaturen und Strömen für 6.000 Stunden hat keinen signifikanten negativen Einfluss auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Verbindung.

4 Zusammenfassung

In KFZ-Bordnetzen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen soll Aluminium als Leitermaterial eingesetzt werden. Da die Steckverbindungen der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (Akkumulator, E-Maschine, Leistungselektronik) aus Kupfer bestehen, ist eine Multimaterialverbindung der artungleichen Metalle Aluminium und Kupfer erforderlich.

Die Verbindung der Aluminiumleitung mit einem Kupfer-Steckverbinder kann durch eine Schweißverbindung erfolgen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Eignung der Schweißverfahren Laserstrahlschweißen, Ultraschallschweißen und Widerstandsschweißen zum Herstellen einer Verbindung zwischen der Aluminiumleitung und dem Kupfer-Steckverbinder untersucht. Für alle Schweißverfahren erfolgte die Untersuchung von Schweißverbindungen zwischen einer Aluminiumleitung und versilberten Kupferkontakten. Im Falle des Ultraschallschweißens wurden zusätzlich Schweißverbindungen zwischen einer Aluminiumleitung und unbeschichteten Kupferkontakten sowie Verbindungen zwischen einer Aluminiumleitung und versilberten Aluminiumkontakten mit Nickel als Diffusionssperre untersucht.

In einem Bordnetz sind elektrische Verbindungen hohen Temperaturen sowie schnellen Temperaturwechseln ausgesetzt. Hochvoltleitungen mit Silikonmantel für den Einsatz in KFZ-Bordnetzen sind grundsätzlich für einen Betriebstemperaturbereich von -40 °C bis $+180\text{ °C}$ spezifiziert, z.B. [LEO-12a]. Aus Untersuchungen von Multimaterialverbindungen für den Einsatz in der Energietechnik ist bekannt, dass Multimaterialverbindungen insbesondere bei hohen Temperaturen nicht zwangsweise langzeitstabil sind. Eine beschleunigte Alterung kann stattfinden, da alle bekannten Alterungsmechanismen für elektrische Verbindungen temperaturabhängig sind. Bei hohen Temperaturen können Multimaterialverbindungen vorwiegend durch Interdiffusion altern. Dabei bilden sich intermetallische Phasen, die häufig einen negativen Einfluss auf die mechanische und elektrische Beständigkeit einer Verbindung haben. Temperaturwechsel können in Multimaterialverbindungen aufgrund des unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu mechanischen Spannungen führen. Verringert sich durch diese Spannungen die Verbindungsfläche, ist ein mechanisches oder elektrisches Versagen der Verbindungen möglich.

Der Einfluss von schnellen Temperaturwechseln auf die mechanische Beständigkeit der Verbindungen wurde in einem ersten Schritt in einem Temperaturbereich von -40 °C bis $+130\text{ °C}$ untersucht.

- Für alle untersuchten Varianten wird kein signifikanter negativer Einfluss der Belastung auf die mechanische Beständigkeit ermittelt. Die Unterschiede im thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Kupfer sind somit nicht so hoch, dass es im geprüften Temperaturbereich zu einer Schädigung der Verbindung kommt.

Der Einfluss von Temperaturwechseln auf die mechanische und elektrische Beständigkeit der Verbindungen wurde in einem weiteren Versuch für 720 Stunden im Betriebstemperaturbereich der Leitungen (-40 °C bis $+180\text{ °C}$) geprüft.

- Es wird für alle untersuchten Varianten kein signifikanter negativer Einfluss auf den Verbindungswiderstand und die Stromtragfähigkeit der Verbindungen festgestellt.
- In Bezug auf die mechanische Beständigkeit wird für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit unbeschichteten Kupferplättchen ein negativer Einfluss der Belastung auf die mechanische Beständigkeit festgestellt.

Die Nutzungsdauer einer Verbindung in einem KFZ-Bordnetz wurde auf 6.000 Stunden abgeschätzt. Daher wurde die mechanische und elektrische Beständigkeit der Schweißverbindungen in einem Langzeitversuch geprüft. Hierfür wurden die Verbindungen für 6.000 Stunden mit Temperaturen von 180 °C (maximale Betriebstemperatur der Leitung) belastet.

- Nach 6.000 Stunden Belastung sind für alle untersuchten Varianten intermetallische Phasen nachweisbar.
- Für ultraschallgeschweißte Verbindungen mit Silberbeschichtung entstehen eher duktile intermetallische Phasen, die teilweise einen hohen Silberanteil aufweisen. Die mechanische Beständigkeit wird nicht negativ beeinflusst.
- Bei ultraschallgeschweißten Verbindungen mit unbeschichteten Kupferplättchen werden spröde intermetallische Phasen aus dem System Aluminium/Kupfer nachgewiesen. Die mechanische Beständigkeit ist nach 6.000 Stunden Belastung unzureichend.
- Bei laserstrahlgeschweißten Verbindungen sind bereits im unbelasteten Zustand intermetallische Phasen vorhanden, deren Dicke nach der Langzeitbelastung auf bis zu $30\text{ }\mu\text{m}$ angewachsen ist. Trotzdem ist die mechanische Beständigkeit nach der Belastung signifikant höher als im unbelasteten Zustand. Es wurde ein veränderter Konzentrationsgradient von Aluminium zu Kupfer in der Schweißzone nachgewiesen.

- Im Falle der widerstandsgeschweißten Verbindungen hat die Belastung keinen signifikanten Einfluss auf die mechanische Beständigkeit der Verbindungen.
- In Bezug auf den Verbindungswiderstand und die Stromtragfähigkeit der Verbindungen werden nach 6.000 Stunden Belastung für alle untersuchten Varianten keine signifikanten Änderungen im Vergleich mit unbelasteten Verbindungen nachgewiesen. Die Belastung und die entstandenen intermetallischen Phasen haben keine negativen Auswirkungen auf die elektrischen Eigenschaften der Verbindungen.

Mit den untersuchten Schweißverfahren Laserstrahlschweißen, Ultraschallschweißen und Widerstandsschweißen können elektrische Verbindungen zwischen Aluminiumleitungen und Kupferkontaktteilen hergestellt werden, die unter den Betriebsbedingungen in einem KFZ-Bordnetz (Nutzungsdauer 6.000 Stunden, Betriebstemperatur bis +180 °C) langzeitstabil sind. Während der Nutzungsdauer der Verbindungen ist mit dem Wachstum intermetallischer Phasen zu rechnen. In der Schweißzone erfolgt eine flächige Verbindung der Fügepartner, in diesem Fall ist der Einfluss intermetallischer Phasen auf den Verbindungswiderstand gering. Grundsätzlich können intermetallische Phasen in eher spröde und in eher duktile Phasen eingeteilt werden. Treten eher spröde intermetallische Phasen auf, ist die mechanische Beständigkeit der Verbindungen unzureichend. Entstehen eher duktile intermetallische Phasen, die nicht untereinander verbunden sind, hat dies keinen negativen Einfluss auf die mechanische Beständigkeit der Verbindungen.

5 Literatur

- [ARO-96] Aronstein, J.:
AC and DC Electromigration in Aluminum Contact Junctions
Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Contacts,
Chicago, September 1996, S. 311 - 320
- [BER-96] Bergmann, R.:
*Zum Langzeitverhalten des Widerstands elektrischer Stromschienen-
verbindungen*
VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [BAT-06] Batzlsperger, A.:
*Verarbeitung von Aluminiumleitungen – Erstellung und Qualifizierung
einer Ultraschallschweißverbindung bestehend aus einer Aluminiumlei-
tung und einem Kupferkontaktstreifen*
Diplomarbeit, Fachhochschule Landshut, 2006
- [BLU-10] Blumenroth, F.:
*Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit Schraubenfedern
in Anlagen der Elektroenergie-technik*
Dissertation, TU Dresden, 2010
- [BON-48] Bonwitt, W.:
*An Experimental Investigation of the Electrical Performance of Bolted
Aluminum-to-Copper Connections*
Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Band 67,
Heft 2, Januar 1948, S. 1208 - 1219
- [BON-73] Bond, T.; McGeary, L.:
Nickel Plating for Improved Electrical Contact to Aluminum
IEEE Transactions on Industry Applications, Band IA-9, Heft 3,
Mai 1973, S. 326 - 331
- [BOR-04] Born, C.:
Ultraschallschweißen zellulärer metallischer Werkstoffe mit Blechen
Werkstoffkundliche Berichte, Band 11, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D.
Eifler,
Technische Universität Kaiserslautern, 2004

- [BOY-00] Boyer, L.; Tristani, L.:
A Model for the Contact Resistance Evolution During a Fretting Test
Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Contacts,
Stockholm, Juni 2000, S. 457 - 463
- [BRA-91] Braunović, M.:
Evaluation of Different Platings for Aluminum-to-Copper Connections
Proceedings of the 37th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts,
Chicago, Oktober 1991, S. 249 - 260
- [BRA-92] Braunović, M.; Aleksandrov, N.:
*Intermetallic Compounds at Aluminum-to-Copper and Copper-to-Tin
Electrical Interfaces*
Proceedings of the 38th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts,
Philadelphia, Oktober 1992, S. 24 - 34
- [BRA-93] Braunović, M.; Aleksandrov, N.:
*Effect of Electrical Current on the Morphology and Kinetics of For-
mation of Intermetallic Phases in Bimetallic Aluminum-Copper Joints*
Proceedings of the 39th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts,
Pittsburgh, September 1993, S. 261 - 268
- [BRA-94] Braunović, M.; Alexandrov, N.:
*Intermetallic Compounds at Aluminum-to-Copper Electrical Interfaces:
Effect of Temperature and Electric Current*
IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing
Technology, Part A, Band 17, Heft 1, März 1994, S. 78 - 85
- [BRA-07] Braunović, M.; Končić, V.; Myškin, N.:
Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology
CRC Press, Boca Raton, 2007
- [DEL-14] Schutzvereinigung DEL-Notiz e.V.
<http://www.del-notiz.org/>
Zuletzt abgerufen am 20.02.2014, 13:25
- [DET-64] Dettner, W.; Elze, J.:
Handbuch der Galvanotechnik
Carl Hanser Verlag, München, 1964

- [DIL-00] Dilthey, U.:
Laserschweißen - Handbuch zum BMBF-Projektverband „Qualifizierung von Laserverfahren“ im Rahmen des Förderkonzeptes Laser 2000
Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, Düsseldorf, 2000
- [DIL-06] Dilthey, U.:
Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1,
Springer Verlag, Berlin, 2006
- [DIX-60] Dixon, C.; Nelson, F.:
The Effect of Elevated Temperature on Flash-Welded Aluminum-Copper Joints
Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Band 78,
Heft 6, Januar 1960, S. 491 - 495
- [DOH-10] Dohlus, R.:
Photonik: Physikalisch-technische Grundlagen der Lichtquellen, der Optik und des Lasers,
Oldenbourg Verlag, München, 2010
- [FAH-11] Fahrenwaldt, H.J.; Schuler, V.:
Praxiswissen Schweißtechnik
Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [FRI-10] Fritz, H.; Schulze, G.:
Fertigungstechnik
Springer Verlag, Berlin, 2010
- [GEM-13a] Fa Gemmel:
Legierungsbeschreibung AlMgSi1 F30,
<http://www.gemmel-metalle.de/werkstoffe/legierungsbeschreibung-almgsi1f30.html>
Abgerufen am 7.11.2013, 15:33
- [GEM-13b] Fa Gemmel:
Legierungsbeschreibung Cu-OF,
<http://www.gemmel-metalle.de/werkstoffe/legierungsbeschreibung-cu-of.html>
Abgerufen am 7.11.2013, 15:33

-
- [GEV-06] Gevatter, H.; Grünhaupt, U.:
Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil
Springer Verlag, Berlin, 2006
- [GÜN-02] Günther, U.:
Kfz-spezifische integrierte Schaltungen
In: Elektronik im Kraftfahrzeugwesen
Expertverlag, Renningen, 2002
- [HAN-00] Hannel, S.; Abry, J.; Fouvry, S.; Kasper, Ph.:
Experimental Relationship Between the Electrical Performance and the Fretting Regime
Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Contacts,
Stockholm, Juni 2000, S. 451 - 456
- [HOL-67] Holm, R.:
Electric Contacts, Theory and Applications
Springer Verlag, Berlin, 1967
- [HUP-96] Huppatz, W.; Paul, M.; Friedrich, S.:
Oberflächenbehandlung von Aluminium
In: Aluminium-Taschenbuch. Aluminium Verlag GmbH, Düsseldorf,
1996
- [JAC-82] Jackson, R.:
Electrical Performance of Aluminum/Copper Bolted Joints
IEE Proceedings C: Generation, Transmission & Distribution, Band 129,
Heft 4, Juli 1982, S. 177 - 184
- [JEL-97] Jelinek, T.:
Oberflächenbehandlung von Aluminium
Leutze Verlag, Saulgau, 1997
- [KAL-11] Kalpakjian, S.; Schmid, S. R.; Werner, E.:
Werkstofftechnik
Pearson Verlag, München 2011

- [KOE-08] Koether, R.; Rau, W.:
Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure
Hanser Verlag, München, 2008
- [KUP-13] Deutsches Kupferinstitut:
Werkstoffdatenblatt Cu-DHP
www.kupfer-institut.de/front_frame/pdf/Cu-DHP.pdf
Abgerufen am 7.11.2013, 15:33
- [LEO-12a] Fa. LEONI:
Datenblatt Geschirmte Silikonisierte HV Leitung mit Aluminium Leiter
FHL(R)AL2GCB2G
Stand 12.09.2012
- [LEO-12b] Fa. LEONI:
Datenblatt FLALRY T105 Fahrzeugbatterieleitung mit Aluminiumleiter
Stand 26.06.2012
- [LIP-07] Lipowsky, H.; Arpaci, E.:
Copper in the Automotive Industry
WILEY-VCH, Weinheim, 2007
- [MIY-06] Miyachi Unitek Corporation:
Fundamentals of small Parts Resistance Welding
2006
- [MOV-13] Movahedi, M.; Kokabi, A.; Seyed Reihani, S.; Cheng, W.; Wang, C.:
Effect of Annealing Treatment on Joint Strength of Aluminum-Steel Friction Stir Lap Weld
Materials & Design, Band 44, Februar 2013, S. 487 - 492
- [MYS-04] Mys, I.; Schmidt, M.:
Laser Micro Welding of Dissimilar Cu-Al Materials for Electronic Contacts
Proceedings of the 4th LANE, Erlangen, September 2004, S. 623 - 631
- [NAK-77] Nakamura, M.; Yonezawa, Y.:
Durability of Al-Cu Hot-Pressure Welding Joints
Wire Journal International, April 1977, S. 71 - 78

- [PAU-77] Paufler, P.:
Plastizität intermetallischer Phasen
In: Intermetallische Phasen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1977
- [POP-05] Poprawe, R.:
Lasertechnik für die Fertigung
Springer Verlag, Berlin, 2005
- [RAY-79] Rayne, J.; Bauer, C.:
Effect of Intermetallic Phase Formation on Electrical and Mechanical Properties of Flash-Welded Al-Cu Couples
Weldments: Physical metallurgy and failure phenomena: Proceedings of the Fifth Bolton Landing Conference, 1979, S. 353 - 360
- [RUN-87] Runde, M.:
Mass Transport in Stationary Contact Points
IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Band 10, Heft 1, März 1987, S. 89 - 99
- [RUN-89] Runde, M.; Honde, E.; Totdal, E.:
Current-induced Aging of Contact Spots
Proceedings of the 35th IEEE Holm-Conference on Electrical Contacts, Chicago, September 1989, S. 213-220
- [SAR-93] Sarady, I.; Lundquist, B.; Magnusson, C.:
Joining of Al to Cu using Pulsed Nd:YAG Laser and Optical Fibres
Laser Materials Processing Conference (ICALEO), Florida, Oktober 1993, S. 630 - 639
- [SCH-08a] Schoft, S.:
Langzeitverhalten elektrotechnischer Verbindungen unter Berücksichtigung des Kriechens der Leitermaterialien
VDI Verlag, Düsseldorf, 2008
- [SCH-08b] Schneider, R.; Löbl, H.; Großmann, S.; Chartourni, D.; Schönemann, T.:
The Effect of Interdiffusion on the Long Term Behavior of Bimetal Joints
Proceedings of the 24th International Conference on Electrical Contacts, St. Malo, Juni 2008, S. 222 - 227

- [SCH-09] Schneider, R.; Löbl, H.; Großmann, S.; Schönemann, T.; Hoidis, M.:
Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer-Verbindungen in der Elektroenergietechnik.
Metall 11/2009, Giesel-Verlag, Hannover, 2009, S. 591 - 594
- [SCH-11] Schmitt, W.; Kißling, S.; Behrens, V.:
Elektrochemisch hergestellte Schichtsysteme auf Aluminium für Kontaktanwendungen
Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, September 2011, S. 136 - 141
- [SCH-12] Schneider, R.:
Langzeitverhalten geschraubter Stromschienenverbindungen in der Elektroenergietechnik
Dissertation, TU Dresden, 2012
- [SLA-99] Slade, P. (Editor):
Electrical Contacts, Principles and Applications
Marcel Dekker, New York, 1999
- [VEE-97] Veerkamp, W.:
Copper-to-Aluminum Transitions in High DC Bus Systems
IEEE Transactions on Industry Applications, Band 33, Heft 4, 1997,
S. 1027 - 1034
- [VIN-02] Vinaricky, E.:
Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen
Springer Verlag, Berlin, 2002
- [WAL-77a] Wallach, E.; Davies, G.:
Joint Resistances and Current Paths in Heat-Treated Aluminum/Copper Solid-Phase Welds
Metal Science, Band 11, Heft 3, März 1977, S. 97 – 102
- [WAL-77b] Wallach, E.; Davies, G.:
Mechanical Properties of Aluminum-Copper Solid-Phase Welds
Metals Technology, Band 4, Heft 4, April 1977, S. 183 - 190

[WOD-04] Wodara, J.:
Ultraschallfügen und -trennen
DVS-Verlag, Düsseldorf, 2004

6 Normenverzeichnis

- [DIN EN 14610] EN 14610:
Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse
Dreisprachige Fassung, 2004
- [DIN EN 1464] EN 1464:
Klebstoffe – Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rollenschälversuch
Deutsche Fassung, 2010
- [DIN 54461] DIN 54461;
Strukturklebstoffe - Prüfung von Klebverbindungen - Biegeschälversuch
Dezember 2005
- [DIN EN 60068-2-14] DIN EN 60068-2-14:
Umgebungseinflüsse - Teil 2-14: Prüfverfahren - Prüfung N: Temperaturwechsel
Deutsche Fassung, 2009
- [DIN 60512-5-2] DIN EN 60512-5-2:
Steckverbinder für elektronische Einrichtungen - Mess- und Prüfverfahren - Teil 5-2: Prüfungen der Strombelastbarkeit; Prüfung 5b: Strombelastbarkeit (Derating-Kurve)
Deutsche Fassung, 2003
- [DIN EN 60947-1] DIN EN 60947-1:
Niederspannungsschaltgeräte – Teil 1: Allgemeine Festlegungen
Deutsche Fassung, 2007
- [DIN EN 60998-1] DIN EN 60998-1:
Verbindungsmaterial für Niederspannungs-Stromkreise für Haushalt und ähnliche Zwecke – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
Deutsche Fassung, 2005