



Experimentelle Untersuchungen zum Fügen von Aluminium und Kupfer

von

Dominik VOGG BSc, Mat.Nr. 01225827

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom- Ingenieur (Dipl.-Ing. oder DI)

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl

Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Wien, November 2022

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Schweißverbindungen von Aluminium, Kupfer und deren Mischverbindung mittels eines Faserlasers und eines Scheibenlasers. Insgesamt wurden 235 Proben in Überlappanordnung anhand eines Lasers miteinander verschweißt, wobei 96 Proben auf die Vorversuche, 66 Proben auf eine Aluminium-Aluminium Verbindung, 52 Proben auf eine Aluminium-Kupfer Verbindung und 21 Proben auf eine Kupfer-Kupfer Verbindung fallen.

Die Vorversuche dienten zur experimentellen Findung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht, dabei wurde eine Vielzahl an Kombinationen der wesentlichen Parameter ausprobiert und miteinander verglichen. Die Vorversuche beliefen sich nur auf die Aluminium-Aluminium, sowie auf die Aluminium-Kupfer Verbindungen. Die darauffolgenden Proben wurden für diverse Untersuchungen herangezogen. Dabei wurden die Aluminium-Aluminium und die Aluminium-Kupfer Schweißverbindungen mit jeweils einer bestimmten Parameterkombination miteinander verschweißt. Bei den Kupfer-Kupfer Proben wurden 4 verschiedene Parameterkombinationen angewendet, wobei sich dabei zwei nur in der Ausrichtung der miteinander verschweißten Bleche unterscheiden.

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der theoretischen Aufarbeitung der genannten Schweißverbindungen mittels Hochleistungslasers. Dabei werden Grundlagen zu dieser Thematik als auch experimentelle Ergebnisse anderer Arbeiten vorgestellt. Der Fokus liegt dabei einen Einstieg und eine theoretische Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche zu schaffen.

Der zweite Teil behandelt die verwendeten Materialien und die verwendeten Geräte, welche zur Durchführung der Schweißungen und Versuche herangezogen wurden.

Das darauffolgende Kapitel beinhaltet den wesentlichen Teil dieser Arbeit, dabei werden die empirischen Versuche und Untersuchungen bearbeitet. Es werden zuerst die Erkenntnisse der durchgeführten Vorversuche diskutiert, welche die Parameter für eine qualitativ hochwertige Schweißnaht als Ziel hatten. Darauffolgend werden die Ergebnisse der Messungen des elektrischen Widerstandes, die computertomographischen Untersuchungen der Schweißnähte, die lichtmikroskopischen Untersuchungen der Querschliffe von den Schweißnähten, die Ergebnisse der Zugversuche, sowie die Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie veranschaulicht.

Nach dem empirischen Teil folgt eine Diskussion der gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse. Dabei wird ein starker Fokus auf den Vergleich der einzelnen Schweißverbindungen mittels Hochleistungslasers gelegt.

Abschließend wird die Arbeit noch auf die wesentlichen Aussagen zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf zukünftige, mögliche Tätigkeiten gegeben.

Abstract

This paper deals with welded joints of aluminium, copper and their combined welded joints using a fiber laser and a disk laser. In total there have been 235 specimens welded together through a laser in a lap configuration, with 96 specimens for the preliminary tests, 66 specimens for the aluminium-aluminium joints, 52 specimens for the aluminium-copper joints and 21 specimens for the copper-copper joints. The preliminary tests were used to find a high quality joint for each material pairing, with a large number of different parameters which have the biggest impact on the quality of the welded joint. These parameter configurations were put in comparison to each other. The preliminary tests only covered the aluminium-aluminium and the aluminium-copper joints. The successive samples were used for various investigations. The aluminium-aluminium and the aluminium-copper material pairings were each welded to one another using a specific combination of parameters for the appropriate material pairing. Four different parameter combinations were used for the copper-copper material pairing, two of the parameter combinations differ only in the alignment of the sheets welded together.

The first part of this work deals with the theoretical refurbishment of the mentioned welded joints produced by a laser. This part of this work contains basics on this topic as well as experimental results of other works. The focus is on creating an introduction and a theoretical basis for the experiments carried out in the following chapters.

The second part contains the materials used and the equipment used in this work to carry out the welding joints and tests.

The following chapter contains the main part of this work, the empirical tests and investigations are mentioned. First, the findings of the preliminary tests carried out are discussed and compared, which aimed to find a high quality welding joint for each material pairing. The results of the electrical resistance measurements, the computer tomographic examinations of the welding joints, the light microscopic examinations of the cross-sections of the welding joints, the results of the tensile tests and the examinations using a scanning electron microscopy (SEM) are illustrated below the preliminary tests.

The empirical part of this work is followed by a discussion of the results and findings which have been created through this work. A strong focus is put on the comparison of the individual welded joints of the different material pairings using a laser.

After that this work is then summarized in terms of the essential statements and an outlook on possible future activities is given.

Danksagung

Einen besonderen Dank möchte ich an Herrn Prof. Dr. Gerhard Liedl aussprechen, der mich bei meinen Schweißversuchen stets hervorragend beraten und ermutigt hat und für mich das Verfassen dieser Arbeit ermöglicht hat.

Weiters möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn Projektass. DI Gerald Humenberger bedanken, der einen wesentlichen Teil der Betreuung meiner Arbeit übernommen hat und mich immer bei meinen Schweißversuchen im Labor stets tatkräftig unterstützt und gefördert hat.

Außerdem möchte ich mich auch herzlich bei Astotec Automotive GmbH, besonders bei Frau Dr. Andrea Lehner und Herrn Dr. Robert Raab für die ausgezeichnete Betreuung vonseiten Astotec bedanken, die mir stets bei den durchzuführenden Untersuchungen mit Rat und Tat zur Seite standen. Weiters möchte ich mich bei den Herren Manuel Soulek, Matthias Auer und Christoph Dobias für deren Unterstützung bedanken. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei der Firma Trumpf bedanken, welche die Kupfer-Kupfer Schweißproben für mich fertigten.

Weiters bedanke ich mich recht herzlich bei Frau Karin Whitmore und bei USTEM-Wien für die Schulung und Bereitstellung eines Rasterelektronenmikroskops.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch besonders bei meinen Eltern bedanken, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben und mich auch in den schwierigen Phasen meines Studiums immer wieder ermutigt haben.

Erklärung zur Urheberschaft

Ich, Dominik VOGG BSc, Mat.Nr. 01225827 erkläre hier an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbst geschrieben und die damit verbundene Forschung selbst durchgeführt habe, unter ausschließlicher Verwendung der zitierten Literatur. Falls Textstellen aus Quellen verwendet wurden, wurden sie entsprechend gekennzeichnet. Ich bestätige, dass diese Arbeit eigenständig und nicht bereits anderswo bereits für eine Prüfung oder als Abschlußarbeit eingereicht wurde.

Mir ist klar, dass die eingereichte Arbeit elektronisch mit entsprechenden Hilfsmitteln und Software-Tools untersucht werden kann (Plagiaritätsüberprüfung). Dies dient zum Einen dazu, dass die eingereichte Arbeit den hohen Qualitätsstandards der jeweiligen Regeln ausgezeichneter wissenschaftlicher Praxis der Verhaltensregeln der TU Wien entspricht. Andererseits dient der Vergleich mit Arbeiten anderer Studenten auch dazu, meine eigenen persönlichen Schutzrechte zu wahren.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Motivation	10
2	Stand des Wissens	11
2.1	Laserstrahlschweißen	11
2.2	Aluminium	11
2.2.1	Schweißen von Aluminium	12
2.2.2	Beeinflussung der Schweißnaht durch die Oxidschicht	13
2.2.3	Heißrisse in Aluminiumlegierungen	13
2.2.4	Porenbildung von Aluminium	13
2.3	Kupfer	14
2.3.1	Laserschweißen von Kupfer	14
2.3.2	Gasaufnahme von Kupfer	16
2.4	Zweistoffsystem Al-Cu	16
2.5	Kupferschweißungen durch grüne Hochleistungsstrichlaser von Dold et al.	17
2.5.1	Wärmeleitungsschweißen von Dold et al.	17
2.5.2	Tiefschweißen von Dold et al.	19
2.5.3	Oberflächeneinfluss von Dold et al.	20
2.6	Laserschweißen von dünnen Kupfer und Aluminium Blechen von Fortunato und Ascari	21
2.6.1	Versuchsaufbau von Fortunato und Ascari	21
2.6.2	Ergebnisse der Versuche von Fortunato und Ascari	21
2.6.3	Morphologie und Mikrostruktur einer Schweißnaht mittels Wobbeln von Fortunato und Ascari	28
2.6.4	Ergebnisse der Zugversuche von Fortunato und Ascari	28
2.7	Laserschweißen von Aluminiumblechen (AA 2014 Aluminium): prozessbedingte Herausforderungen von Alfieri et al.	31
2.7.1	Zuführung des Schutzgases von Alfieri et al.	31
2.7.2	Probleme der Interaktion von Laser und Material von Alfieri et al.	32
2.7.3	Porosität von Alfieri et al.	33
2.7.4	Verdampfung von Magnesium von Alfieri et al.	35
2.7.5	Aufweichung der Schweißnaht von Alfieri et al.	35
2.8	Erkenntnisgewinn aus der Literatur	37
3	Geräte	39
3.1	Werkstoffe und Probenpräparation	39
3.1.1	Proben für die Vorversuche	39
3.1.2	Proben für die Untersuchungen	39
3.2	verwendete Formeln	42

3.3	Verwendete Geräte	42
3.3.1	YLR-1500 CT Ytterbium Faser Laser	42
3.3.2	IRC 5 von ABB Robotics	43
3.3.3	Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop	43
3.3.4	ATM Brillant 200	43
3.3.5	Trumpf Tru Laser Cell 3000	43
3.3.6	Trumpf Tru Disk 8000	43
3.3.7	Trumpf Tru Disk 10001	43
3.4	Messgeräte	44
3.4.1	Messgerät für Messung des elektrischen Widerstands	44
3.4.2	Zugversuchsprüfmaschine	44
3.4.3	Feldemissionsrasterelektronenmikroskop	44
4	Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht	45
4.1	Schweißung einer Aluminium-Aluminium Verbindung	45
4.1.1	Schnellübersicht	45
4.1.2	Leistung	45
4.1.3	Vorschubgeschwindigkeit	46
4.1.4	Fokus	48
4.1.5	Schutzgaszuführung	49
4.1.6	Schweißunterlage	49
4.1.7	Anschleifen der Proben	53
4.1.8	Chargen des Materials	55
4.2	Schweißung einer Aluminium-Kupfer Verbindung	55
4.2.1	Leistung	55
4.2.2	Vorschubgeschwindigkeit	55
4.2.3	Fokus	57
4.2.4	Schutzgaszuführung	59
4.2.5	Schweißunterlage	59
4.2.6	Porenbildung	61
4.2.7	Aluminiumaustritt	64
4.2.8	Verwendung einer Leistungsrampe	65
4.2.9	Beginn und Ende der Schweißnaht	67
4.2.10	Chargen	67
4.3	Erkenntnisse aus den Vorversuchen	68
4.4	Schweißung einer Kupfer-Kupfer Verbindung	69
5	Ergebnisse der durchgeführten Versuche	70
5.1	Messung des elektrischen Widerstands	70
5.1.1	Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung	70
5.1.2	Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung	70

Inhaltsverzeichnis

5.1.3	Elektrischer Widerstand einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung	73
5.2	Computertomographische Untersuchungen der Schweißnähte	74
5.2.1	Computertomographische Analyse von Aluminium-Aluminium Schweißproben	74
5.2.2	Computertomographische Analyse von Aluminium-Kupfer Schweißproben	76
5.2.3	Computertomographische Analyse von Kupfer-Kupfer Schweißproben	77
5.3	Lichtmikroskopische Untersuchungen	79
5.3.1	Lichtmikroskopische Untersuchung von Aluminium-Aluminium Schweißverbindung	80
5.3.2	Lichtmikroskopische Untersuchung von Aluminium-Kupfer Schweißverbindung	83
5.3.3	Lichtmikroskopische Untersuchung von Kupfer-Kupfer Schweißverbindung	86
5.4	Zugversuche	90
5.4.1	Zugversuche Rohmaterial Aluminium	90
5.4.2	Zugversuche Rohmaterial Kupfer	91
5.4.3	Zugversuche der Schweißverbindung Aluminium-Aluminium	92
5.4.4	Zugversuche der Schweißverbindung Aluminium-Kupfer	95
5.4.5	Zugversuche der Schweißverbindung Kupfer-Kupfer	98
5.5	Untersuchung mittels Rasterelektronenmikroskops	103
5.5.1	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Aluminium-Aluminium Schweißungen	103
5.5.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Aluminium-Kupfer Schweißungen	105
5.5.3	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Kupfer-Kupfer Schweißungen	120
6	Diskussion	126
7	Zusammenfassung und Ausblick	131
7.1	Zusammenfassung	131
7.2	Ausblick	133
	Literatur	141

1 Einleitung

Das Wort LASER setzt sich aus den englischen Wörtern Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation zusammen und erläutert im eigentlichen Sinne einen physikalischen Vorgang. Dabei handelt es sich um die Lichtverstärkung durch eine induzierte Aussendung von Strahlung. Jedoch hat es sich so eingebürgert, dass das dazu verwendete Gerät so bezeichnet wird. Je nach technischer Ausführung kann man die elektromagnetische Strahlung (*Laserstrahlung*) mit spezifischen Eigenschaften erzeugen und auch in diversen Anwendungsbereichen wirtschaftlich nutzen.[24]

1.1 Motivation

Der weiterhin steigende Einsatz von Lasern als „Strahlwerkzeuge“ in der modernen industriellen Fertigung deutet sowohl auf den großen Nutzen sowie auf eine breite Akzeptanz dieser Technologie hin. Dabei kann man eine Zunahme der Anwendungsbereiche, als auch bei den speziell angepassten Modifikationen für außerordentliche Anwendungen beobachten.[24]

Die Vorteile eines Lasers werden insbesondere im Bereich der industriellen Fertigung sichtbar. Diese werden für das Schneiden, Bohren, für eine Oberflächenbehandlung, sowie zum Schweißen von unterschiedlichen Materialien für ein weites Anwendungsgebiet eingesetzt.[21]

Die Verbindung von unterschiedlichen Metallen, sowie auch der verstärkte Einsatz von Aluminium in der Automobilindustrie legt ein großes Potential für eine erhebliche Gewichtsreduktion offen.[31]

Da Kupfer eine besonders gute elektrische Leitfähigkeit aufweist, wird dieser Werkstoff am häufigsten im Bereich der Kontaktierungen sowie der elektrischen Leiter verwendet. Jedoch wird dieser Werkstoff aus Leichtbau- und Kostengründen oftmals durch Aluminium ersetzt, dies gelingt aber nicht immer vollständig und es sind Schnittstellen zwischen elektrischen Leiter und Gerät notwendig und somit kommt es zu einer Bimetallverbindung zwischen Kupfer und Aluminium.[6]

Aber auch der weltweit exponentiell steigende Verbrauch an Kupferblechen, sowie die Automatisierung von Prozessen und die gestiegenen Qualitätsanforderungen bei einer höheren Effizienz von Kupferverbindungen wurden für industrielle Anwendungen zur Herausforderung. Durch diese Umstände ist ein Einsatz eines Hochleistungslasers naheliegend, da dieser eine hohe Präzision, eine hohe Energiedichte und eine kurze Prozessdauer bereitstellen kann.[5]

2 Stand des Wissens

Dieser Abschnitt soll einen allgemeinen Überblick über die Thematik des Laserschweißens von Aluminium, Kupfer und deren Mischverbindung vermitteln. Dabei wird auf die besonderen Eigenschaften der Materialien sowie auf bereits vorhandene Literatur eingegangen. Das Laserstrahlschweißen an sich wird ebenfalls kurz vorgestellt.

2.1 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen wird in die Gruppe der Schmelzschweißverfahren eingegliedert, dabei wird mithilfe von inerten Schutzgasen und ohne Verwendung von Zusatzwerkstoffen meist in Stumpf- oder Überlappanordnung eine Schweißnaht erzeugt. Die maßgeblichen Eigenschaften von Laserschweißanlagen werden hauptsächlich von drei Komponenten beeinflusst, diese sind das laseraktive Medium, der Resonator sowie die Pumpquelle. Die generierte Wellenlänge wird durch das verwendete Medium bestimmt, die Qualität des Strahles von den beiden anderen Komponenten[32]. Die Unterscheidungskriterien von Laserschweißanlagen sind:

- das laseraktive Medium (*zum Beispiel CO₂, Nd : YAG*)
- der Aggregatzustand des laseraktiven Mediums (*gasförmig, flüssig oder fest*)
- die Art der Anregung (*elektrisch oder optisch*)
- die Geometrie des laseraktiven Materials (*Stab-, Slab-, Scheiben- oder Faserlaser*) sowie
- der Betriebsmodus (*kontinuierlich oder gepulst*). [26]

Die Einschätzung der Schweißignung eines bestimmten Werkstoffes erfolgt über den Reflexions- beziehungsweise Absorptionsgrad der aufgebrachten Laserstrahlung. Dieser ist in Abbildung 2.1 für verschiedene Materialien veranschaulicht. Der Absorptionsgrad ändert sich dabei maßgebend mit der Wellenlänge der Laserstrahlung. Dieser liegt bei einer Wellenlänge von $1,07 \mu\text{m}$ bei etwa 2 % für Kupfer und 4 % für Aluminium. Somit wird im infraroten Wellenlängenbereich die Laserstrahlung für diese beiden Materialien nur zu einem sehr kleinen Teil absorbiert.

2.2 Aluminium

Eine auffällige Eigenschaft von Aluminium ist, dass es nur eine Art von Oxid bildet. Al_2O_3 beginnt erst bei hohen Temperaturen zu schmelzen und bildet sich sehr rasch auch bei Raumtemperatur an der metallisch blanken Oberfläche. Zum einen erhöht die relativ

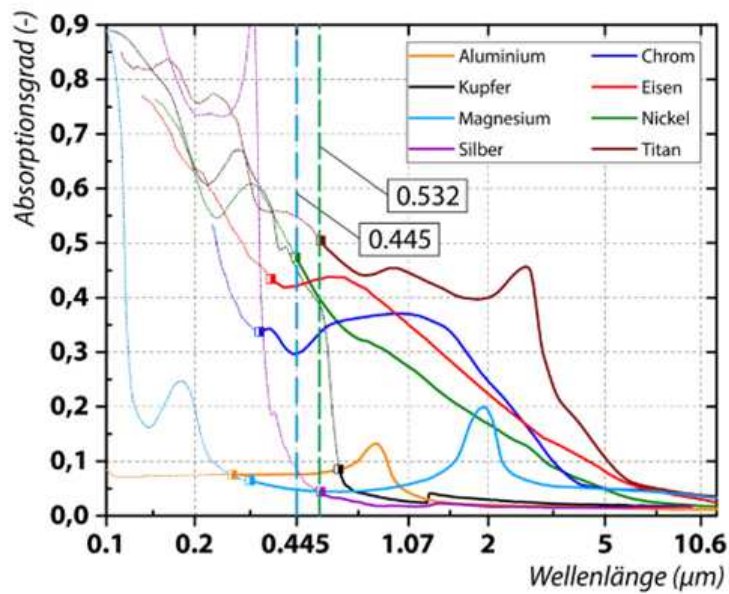


Abbildung 2.1: Absorptionsgrad unterschiedlicher Materialien[22]

dünne Oxidschicht den Widerstand gegen Korrosion, andererseits wird jedoch durch die elektrisch nichtleitende Schicht die Schweißbeignung verringert. Dadurch kann es durchaus sinnvoll sein diese Oxidschicht vor dem Schweißvorgang zu entfernen. Die für eine praktische Anwendung wichtigsten Legierungselemente von Aluminium sind Kupfer, Silizium, Magnesium, Zink und Mangan. Es können auch Spuren von Beryllium, Bor, Natrium und Strontium in Aluminium vorkommen. Jedoch gibt es für Aluminium kein Element das eine ähnliche Bedeutung wie Kohlenstoff für Stahl hat. Die Festigkeitssteigerung durch die Legierungselemente erfolgt hauptsächlich durch Ausscheidungshärten bei Auslagerung des Werkstoffs. Dabei bestimmt die Auslagerungstemperatur wesentlich die Form sowie auch die Verteilung der so erzeugten Ausscheidungen im Grundmaterial. Hierbei können kohärente, teilweise kohärente sowie auch nicht kohärente Ausscheidungen erzeugt werden. Dabei hat die Auslagerungstemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Form und die Verteilung der Ausscheidungen, welche in Abbildung 2.2 dargestellt sind. Aluminium weist bei Raumtemperatur ein kubisch flächenzentriertes Raumgitter auf und zeigt auch keine Gitterumwandlung bei einer Temperaturänderung. Aufgrund der kubisch flächenzentrierten Raumstruktur tritt bei Aluminium keine ausgeprägte Streckgrenze auf.[13]

2.2.1 Schweißen von Aluminium

Dadurch, dass Aluminium keine Gitterumwandlung beim Abkühlungsprozess erfährt, bleibt eine Aufhärtungsgefahr in der Wärmeeinflusszone aus. Aufgrund der eingebrachten Wärme, welche ein Lösungsglühen der Ausscheidungen zur Folge hat kommt es bei

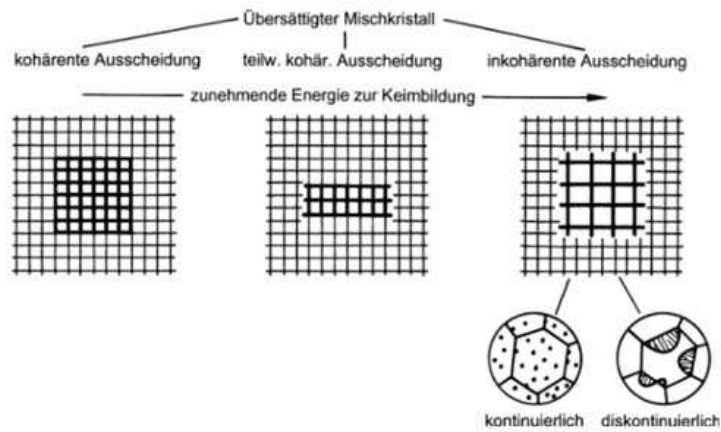


Abbildung 2.2: Ausscheidungsformen eines übersättigten Mischkristalls[7]

kaltverfestigten und bei den aushärtbaren Aluminiumlegierungen zu einem starken Abfall der Festigkeit im Bereich der Schweißnaht.

2.2.2 Beeinflussung der Schweißnaht durch die Oxidschicht

Durch die hohe Affinität von Aluminium zum Sauerstoff wird an der Luft sehr schnell eine dünne Oxidschicht an der Oberfläche des Werkstücks gebildet. Diese Schicht an der Oberfläche verhindert durch ihre Dichtheit ein tiefergehendes Eindringen von Sauerstoff in das Werkstück. Der Schmelzpunkt von Al_2O_3 liegt bei zirka $2050\text{ }^\circ\text{C}$ und weicht vom Schmelzbereich der Aluminiumlegierungen, welche bei zirka $550\text{ }^\circ\text{C}$ - $650\text{ }^\circ\text{C}$ zu schmelzen beginnen wesentlich ab.[13]

2.2.3 Heißrisse in Aluminiumlegierungen

Aluminiumlegierungen zeigen häufig ein breites Erstarrungsintervall und sind dadurch auch heißrissegefährdet. Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Heißrissen kann durch ein Vorwärmen des Werkstücks realisiert werden. Der Anteil an gerissenen Schweißnahtverbindungen kann mittels Vorwärmen stark reduziert werden. Silizium und Magnesium haben ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Heißrisseanfälligkeit von Aluminiumlegierungen. Das Verhalten der drei Aluminiumlegierungen auf der linken Seite in Abbildung 2.3 erklärt sich durch die auf der rechten Seite dargestellte Grafik in dieser Abbildung.[13]

2.2.4 Porenbildung von Aluminium

Eine nicht unwesentliche Problematik beim Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen stellt die vorkommende Porosität der erzeugten Schweißnähte dar. Diese Porosität tritt durch das Zusammenwirken von diversen Besonderheiten von Aluminium

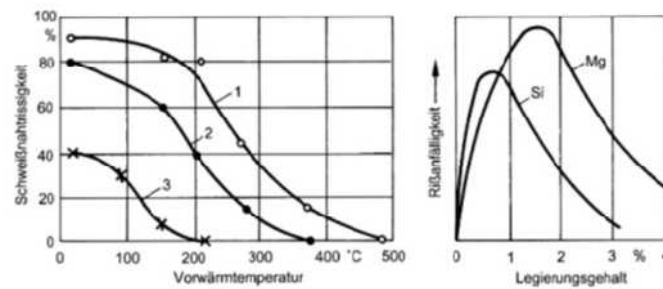


Abbildung 2.3: Risshäufigkeit von Aluminiumschweißnähten in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur, Linie 1: AlMgMn, Linie 2: AlMg 2,5, Linie 3: AlMg 3,5[9]

auf und ist schwierig zu vermeiden. Ein Großteil der Poren wird durch Wasserstoff hervorgerufen, welcher während der Erstarrung aus der Schmelze ausgeschieden wird. Der Phasenübergang von der Schmelze zum Kristall wird von einer sprunghaften Änderung der Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium begleitet (*Abbildung 2.4*). Die Schmelze kann im Vergleich zum sich bildenden Kristall ein Vielfaches an Wasserstoff aufnehmen. In der Folge kommt es zu einem Überschuss an Wasserstoff in der Schmelze, dieser scheidet sich in Form von Gasblasen an der Erstarrungsfront aus. Aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes und der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ergibt sich eine relativ hohe Erstarrungsgeschwindigkeit. Die ausgeschiedenen Gasblasen haben somit nicht genügend Zeit um in der Schmelze durch die geringere Dichte bis an die Oberfläche aufzusteigen. Die Gasblasen werden von der Erstarrungsfront eingeholt und bleiben als Poren in der Schweißnaht bestehen, dies wird auch als metallurgische Porenbildung bezeichnet. Dieser Effekt tritt am stärksten bei Reinaluminium auf, da Reinaluminium über kein Schmelz- beziehungsweise Erstarrungsintervall verfügt. Somit gilt es das Angebot an Wasserstoff während des Schweißprozesses auf ein Minimum zu reduzieren.[13]

2.3 Kupfer

2.3.1 Laserschweißen von Kupfer

Die *Abbildung 2.5* zeigt den Unterschied von Wärmeleitungs- und Tiefschweißen. Der Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum Tiefschweißen erfolgt sprunghaft bei einer nur geringen Veränderung der Leistung und ansonst gleichbleibenden Parametern. Dieser Übergang wird als Schwelle gekennzeichnet. Die Tiefe der sich ruckartig bildenden Dampfkapillare kann eine Mindestschweißtiefe nicht unterschreiten.[24]

Nach einer lokalen Aufschmelzung steigt die Absorption der Laserstrahlung im Schmelzbad des Kupfers sehr stark an und bei einer Ausbildung einer Dampfkapillare beträgt die Absorption knapp 100 %. Um eine Beschädigung oder Zerstörung der Laseroptiken durch Rückstrahlung des auftreffenden Laserstrahls vorzubeugen sollte der Laserkopf geringfügig geneigt werden. Der Werkstoff Kupfer weist bei einer Wellenlänge im Bereich von zirka $0,6 \mu\text{m}$ einen Absorptionsgrad von ungefähr 30 % auf, damit ist bei

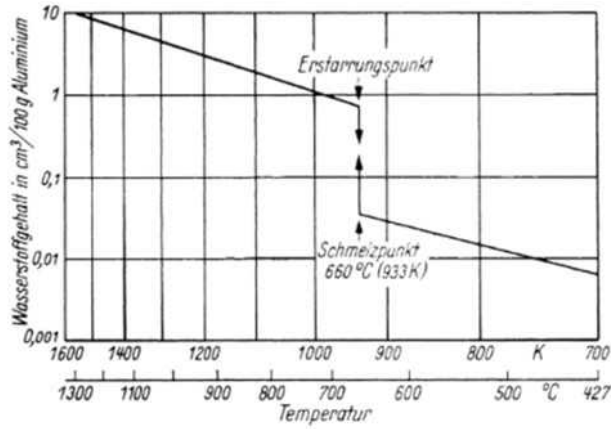


Abbildung 2.4: Wasserstofflöslichkeit in Aluminium[38]

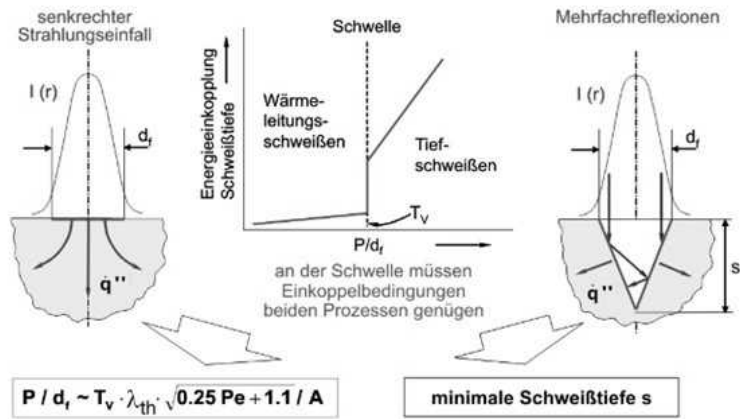


Abbildung 2.5: Unterschied zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefenschweißen als Funktion der Leistung beziehungsweise des Strahlparameterquotienten P/df [24]

einer entsprechenden Leistung ein wirtschaftliches Fügen durch Laserschweißen realisierbar. Legierungen von Kupfer weisen im Allgemeinen einen höheren Absorptionsgrad auf als reines Kupfer, diese können somit besser laserstrahlgeschweißt werden als reines Kupfer.[32]

2.3.2 Gasaufnahme von Kupfer

Im flüssigen Aggregatzustand tendiert Kupfer Gase aus der Atmosphäre, zum Beispiel Sauerstoff oder Wasserstoff aufzunehmen. Die Löslichkeit von Sauerstoff ist in Kupfer bei der Erstarrungstemperatur des Eutektikums (1065 °C) im festen Zustand 0,09 %. Auch bei geringen Mengen wird durch eine eutektische Reaktion der Restschmelze Cu-Oxid (CuO und Cu_2O) gebildet. Diese Phase zeichnet sich durch ihre Sprödigkeit aus und wird vorwiegend im interdendritischen Bereich an den Korngrenzen gebildet und führt somit zu einer Verringerung der Schweißnahtzähigkeit.[4]

Kupfer ist in der Lage Wasserstoff im flüssigen sowie auch im festen Zustand zu lösen. Durch eindringen in den hochoverhitzten, sauerstoffhaltigen Bereich während des Schweißprozesses resultiert der Prozess in einer Reduktion des an Sauerstoff gebundenen Kupfers anhand der Bildung von Wasserdampf. Dieser kann durch die Größe seiner Moleküle nicht wieder nach außen diffundieren und wird unter hohem Druck im festen Gefüge eingeschlossen. Infolge werden die Korngrenzen aufgeweitet und der gebildete Wasserdampf kann entweichen. Die daraus folgende Rissbildung beziehungsweise die Lockerung des Gefüges wird als Wasserstoffkrankheit bezeichnet.[4]

2.4 Zweistoffsystem Al-Cu

Das Zustandsdiagramm von Kupfer-Aluminiumverbindungen weist eine Vielzahl an spröden intermetallischen Verbindungen auf. Diese führen zu einer Verringerung der Verbindungsfestigkeit und auch zu einer Erhöhung des spezifischen Widerstands im Vergleich zum Grundwerkstoff. Die Erhöhung des spezifischen Widerstands kann somit bei Stromdurchfluss zu einem lokalen Temperaturanstieg im Bereich der Fügestelle führen.[6]

Die hohe Härte der intermetallischen Phasen im Vergleich zum Grundwerkstoff kann aufgrund der gesteigerten ionischen und kovalenten Bindungen und der somit einhergehenden Verringerung der metallischen Bindungen zurückgeführt werden. Die komplexe Kristallstruktur der intermetallischen Phasen verhindert eine Reduzierung der inneren Spannungen und sorgt somit für eine Erhöhung der Sprödigkeit. Dabei weisen die kupferreichen Gebiete die größte Härte auf. Die Bindung der Elektronen in den neu entstandenen Bindungen resultiert zusätzlich in einer Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit im Bereich der intermetallischen Phasen. Aufgrund der genannten einhergehenden Probleme mit den intermetallischen Phasen, sollten diese auf ein Minimum reduziert werden.[37]

Die hier genannten Probleme aufgrund der intermetallischen Phasen führten auch zu der Auffassung, dass eine Aluminium-Kupfer-Verbindung mit herkömmlichen Methoden als nicht schweißbar eingestuft wurde. [35]

Die Tabelle 2.1 zeigt die Härte und den spezifischen elektrischen Widerstand der sich bildenden intermetallischen Phasen. Dabei wird der Aluminium- beziehungsweise der Kupfergehalt in der Phase angegeben.

Phase	Cu [wt%]	Al [wt%]	Härte [HV]	spez. el. Widerstand [$\mu\Omega cm$]
Cu	100	0	100	1,75
$\gamma_1 Cu_9Al_4$	80	20	1050	14,2
δCu_3Al_2	78	22	180	13,4
$\xi_2 Cu_4Al_3$	75	25	624	12,2
$\eta_2 CuAl$	70	30	648	11,4
$\theta CuAl_2$	32	68	630	-
Al	0	100	60	2,9

Tabelle 2.1: Phasen Kupfer-Aluminium[8][40][12]

2.5 Kupferschweißungen durch grüne Hochleistungsstrichlaser von Dold et al.

Durch die starke Zunahme des Einsatzes von Kupfer im Hinblick auf Elektromobilität und Elektronik wird der Bedarf an reproduzierbaren Schweißnähten mit hoher Qualität stetig höher. Mithilfe von Strategien wie Wobbeln

(*Überlagerung einer Linearbewegung mit einer Kreisbewegung*) können mittels hochbrillanten Lasern Tiefschweißprozesse mit zufriedenstellender Qualität der Schweißnaht bereits erzeugt werden. Jedoch stellen reproduzierbare Wärmeleitungsnahten und Schweißungen von kleinen Bauteilen mit geringer Wärmekapazität noch immer eine Herausforderung dar.[14] Verglichen mit einem Laserstrahl im infraroten Bereich ist eine Laserstrahlung im Hinblick auf den Absorptionsgrad bei einer Wellenlänge von 515 nm deutlich günstiger, dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.6 veranschaulicht. Ein Laserstrahl im grünen Lichtbereich kann somit die aufgebrachte Laserleistung wesentlich effizienter in das Material einbringen als ein Laser mit einer längeren Wellenlänge.[14]

2.5.1 Wärmeleitungsschweißen von Dold et al.

Das Wärmeleitungsschweißen findet überall dort seine Anwendung wo glatte Nähte und eine hohe Schweißqualität gefordert sind. Dabei darf die absorbierte Energie das Material nicht auf Verdampfungstemperatur bringen, sondern muss die Temperatur im Intervall des Schmelzbereiches halten. Somit wird die Bildung einer Dampfkapillare verhindert. Bei einer Verwendung von einem Laserstrahl im infraroten Bereich würde sich durch den niedrigen Absorptionsgrad im kalten Zustand des Blechs und einen hohen Absorptionsgrad im warmen Zustand des Blechs ein zu kleines Prozessfenster ergeben um eine gute Reproduzierbarkeit gewährleisten zu können. Durch Schwankungen der Oxidation an der Oberfläche kann es zu leichten Absorptionsänderungen kommen, diese Auswirkungen auf die Schweißnaht fallen bei der Wahl eines grünen Laserstrahles deutlich geringer aus als bei einer Verwendung eines Laserstrahls im infraroten Bereich. Außerdem bildet

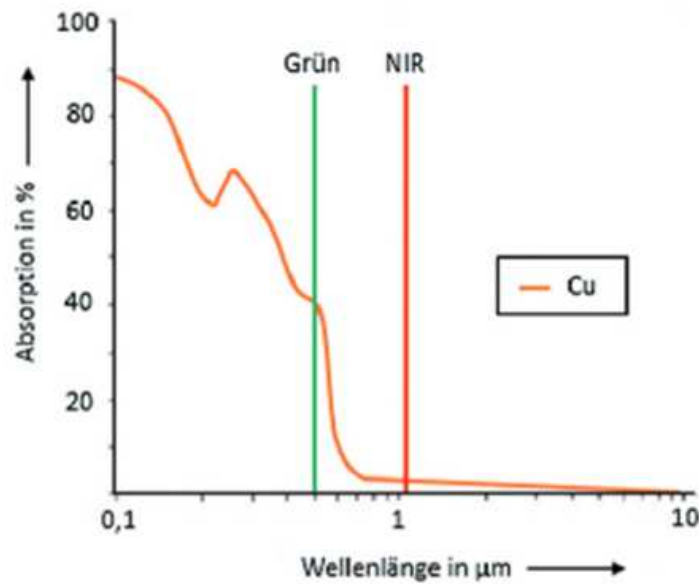


Abbildung 2.6: Absorption von Kupfer bei Raumtemperatur und senkrechtem Laserstrahl einer polierten Oberfläche[15]

sich die Schweißnaht bei der Wahl eines grünen Lasers deutlich schneller als bei einer Wahl eines infraroten Lasers. Somit werden die bei infraroten Laserquellen oft auftretenden ungeschweißten Anfangsbereiche vermieden, dieser Bereich kann bei infraroten Lasern sehr stark variieren. Ist der Laser einmal vollständig eingekoppelt, bleibt der Prozess über die gesamte Schweißnahtlänge stabil und wird nicht unterbrochen. Auch der Einkoppelgrad bleibt dabei auf einem stabilen Niveau, somit kann ein Überhitzen des Werkstücks vermieden werden. Damit können auch Schweißnähte an Folien und sehr kleinen Bauteilen realisiert werden, ohne diese durch Schwankungen bei der Einkopplung zu beschädigen.[14]

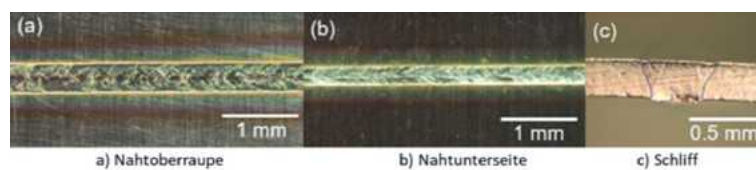


Abbildung 2.7: Wärmeleitungsschweißnaht in Kupfer mit grünem Laser: a) Nahtoberseite, b) Nahtunterseite, c) Querschliff[14]

Die Abbildung 2.7 zeigt eine Nahtanalyse einer mittels Wärmeleitungsschweißen hergestellten Schweißnaht. Da die Ausbildung einer Dampfkapillare ausbleibt ergibt sich ein sehr ruhiges Schmelzbad. Dies hat zur Folge, dass auch keine Spritzer im Bereich der Schweißnaht auftreten. Dünne Bleche und Folien können unter Ausnutzung des

Wärmestaus an der Rückseite verhältnismäßig tiefer geschweißt werden als dickere Bleche. Charakterisiert wird das Wärmeleitungsschweißen mithilfe des Aspektverhältnisses, welches immer kleiner als 1 ist

(*Aspektverhältnis = Tiefe der Schweißnaht/Breite der Schweißnaht*).[14]

2.5.2 Tiefschweißen von Dold et al.

Laser mit einer Wellenlänge im grünen Bereich können auch zum Tiefschweißen verwendet werden. Dabei kann eine reproduzierbare Einkopplung erzeugt werden, welche auch während des Prozesses stabil bleibt. Dies kann durch eine Schweißung mittels einer Laserstrahlung im infraroten Bereich nicht zur Gänze gewährleistet werden.[16]

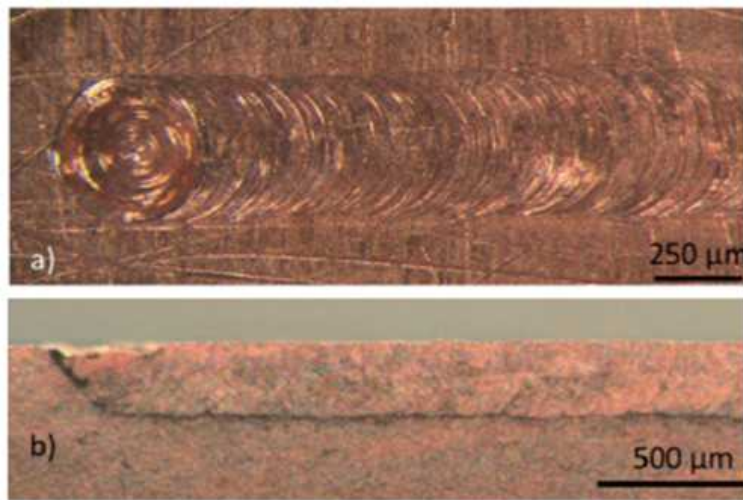


Abbildung 2.8: a) Nahtoberseite und b) dazugehöriger Längsschliff einer mit grünem Laser geschweißten Naht[14]

Die Abbildung 2.8 zeigt eine Tiefschweißung mittels grünem Laserstrahl, dabei kann man eine in etwa gleichbleibende Einschweißtiefe im Werkstoff deutlich erkennen. Der Einsatz eines grünen Laserstrahls vermeidet auch manchmal notwendige, komplexe Prozessstrategien wie das Wobbeln, welches normalerweise für die Erzeugung einer spritzerreduzierten und stabilen Schweißnaht von Kupfer mittels infraroten Lasers eingesetzt wird.[14]



Abbildung 2.9: Spritzerarmer Tiefschweißprozess von Kupfer mit grünem Laserstrahl: a) optimales Intensitätsprofil zum Kupferschweißen, b) Hochgeschwindigkeitsaufnahme, c) Nahtoberseite, d) Querschliff[14]

Eine starke Fokussierung hat sich besonders im Hinblick auf die Erzeugung von hochwertigen und spritzerarmen Schweißnähten bewährt. Das in Abbildung 2.9 a dargestellte abgerundete Intensitätsprofil ruft ein Schmelzdepot um die Dampfkapillare hervor, welche in Abbildung 2.9 b zu sehen ist. Das erzeugte Schmelzdepot fängt die Bewegungsenergie der Schmelze, welche von vorne nach hinten um die Dampfkapillare fließt, auf. Dies führt zu einem ruhigen und äußerst spritzerarmen Schweißprozess. In Abbildung 2.9 c sieht man die dadurch erzeugte, gleichmäßige Schuppung ohne Auswürfe oder sonstigen Defekten der Schweißnaht. Die Abbildung 2.9 d zeigt zusätzlich noch einen Querschliff der Schweißnaht.[14]

2.5.3 Oberflächeneinfluss von Dold et al.

Bei einer Verwendung von infraroter Laserstrahlung kann die Beschaffung der Oberfläche einen erheblichen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit nehmen. Die Infrarotstrahlung kann von stark oxidierten Oberflächen wesentlich besser absorbiert werden als von polierten Oberflächen.[16]

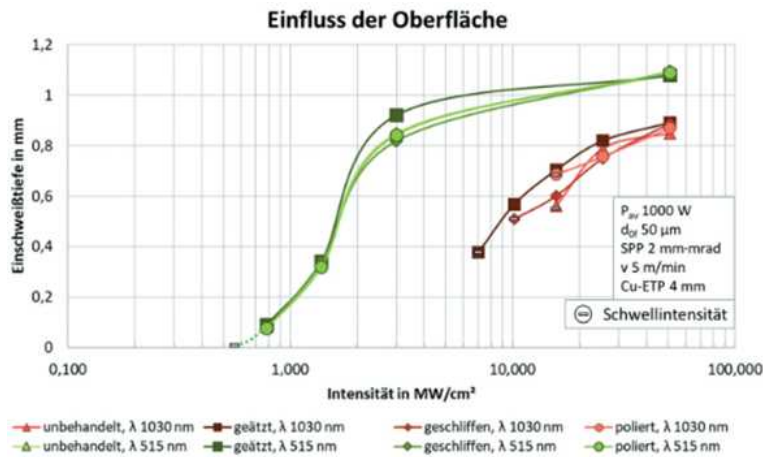


Abbildung 2.10: Einfluss der Kuperoberfläche auf das Schweißergebnis mit unterschiedlichen Wellenlängen[14]

Die Abbildung 2.10 veranschaulicht den Einfluss der unterschiedlich präparierten Oberflächen unter Verwendung eines grünen und infraroten Laserstrahls. Bei Verwendung einer infraroten Laserstrahlung können bei einer bestimmten Intensität auf geätzten Oberflächen Schweißnähte erzeugt werden, welche bei einer polierten Oberfläche noch kein Schmelzbad hervorruft.[14]

Als alternatives Mittel zur Erzeugung eines stabilen Einkoppelverhaltens bei Verwendung eines infraroten Laserstrahls können die Oberflächen mittels Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesse zum Beispiel mit Chrom oder Nickel für den Schweißprozess vorbereitet werden.[15]

Bei Verwendung eines grünen Lasers können diese zusätzlichen Arbeitsschritte vernachlässigt werden. Ebenso können die Lagerbedingungen für Kupfer wesentlich verein-

facht werden.[14]

2.6 Laserschweißen von dünnen Kupfer und Aluminium Blechen von Fortunato und Ascari

In dieser Arbeit von Fortunato und Ascari wurde eine single mode continuous wave (CW) Laserquelle verwendet. Diese wurde für lineare Schweißnähte sowie für die Anwendung des Wobbelns herangezogen. Die Untersuchungen dieser Arbeit beziehen sich auf den Einfluss der Laserleistung, des Fokussdurchmessers und der Verfahrensgeschwindigkeit des Laserkopfes auf die Mikrostruktur und die mechanische Festigkeit der Schweißnaht. Dabei wurden bis zu drei Schweißnähte in paralleler Orientierung in das Werkstück eingebracht, um den Einfluss auf die mechanische Festigkeit bestimmen zu können.[18]

2.6.1 Versuchsaufbau von Fortunato und Ascari

Für die durchgeführten Versuche wurden reines Kupfer, mehr als 99,6 % Kupfer, verwendet, welches mit einer dünnen Nickelschicht überzogen wurde um den Leistungseintrag des Lasers in das Material zu verbessern und um eine Oberflächenoxidation zu vermeiden. Die Wahl des Aluminiums führte ebenfalls zu einer sehr reinen Form, nämlich zu AA1060, mit einem Aluminiumgehalt von 99,4 %, einem Siliziumgehalt von 0,25 % und einem Eisenanteil von 0,35 %. Die Geometrie der Proben wurde mit einer Länge von 80 mm, einer Breite von 45 mm und einer Dicke von 0,3 mm gewählt. Die Proben wurden in der Anordnung einer Überlappkonfiguration (*siehe Abbildung 2.11*) verschweißt und zwar mit dem Aluminiumwerkstoff an der Oberseite, sowie auch an der Unterseite.[18] Als Laserschweißgerät wurde ein IPG YLR-1000-SM single-mode Faserlaser gewählt, mit einer Maximalleistung von 1000 W und einer Wellenlänge von 1070 nm.[18]

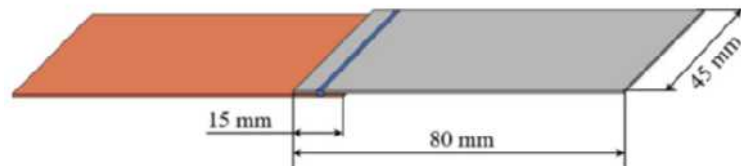


Abbildung 2.11: Abmessungen der Überlappverbindungen für dünne Bleche[18]

Die notwendige Bewegung des Wobbelns, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, wurde mittels Programmierung des Galvokopfes realisiert. Dabei wurde eine rotatorische mit einer linearen Bewegung überlagert.[18] Bei mehreren Schweißverbindungen wurde ein Abstand von 3 mm zwischen den Schweißnähten gewählt. Die gesamte Versuchsreihe belief sich auf zirka 700 Schweißvorgänge.[18]

2.6.2 Ergebnisse der Versuche von Fortunato und Ascari

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Arbeit von Fortunato und Ascari vorgestellt. Für die vorgestellten Versuche wurde eine Brennweite von 160 mm verwendet.

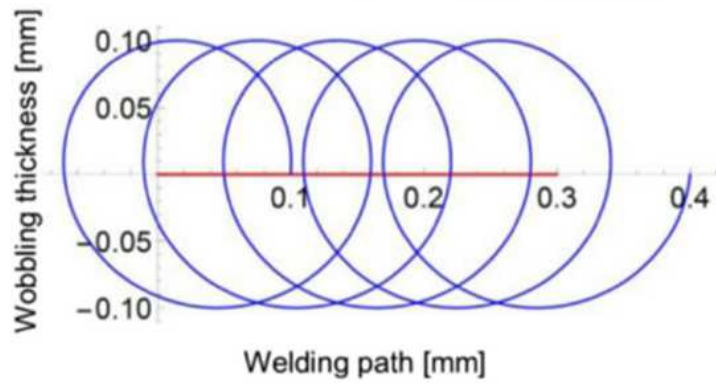


Abbildung 2.12: Vorgehensweise beim Wobbeln[18]

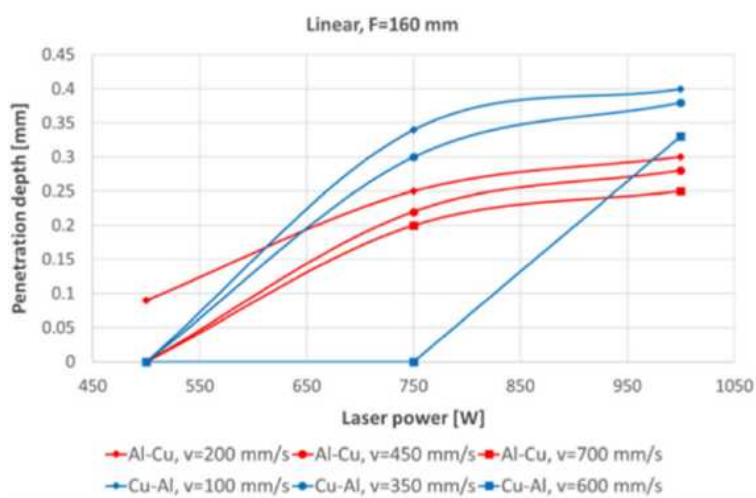


Abbildung 2.13: Einschweißtiefe mit einer Brennweite von 160 mm[18]

In den Ergebnissen der Auswertung finden sich vier Hauptgruppen für die Zuordnung der Einschweißtiefe: keine Schweißung, teilweise Schweißung, volle Schweißung und volle Durchschweißung. Die Abbildungen 2.13 und 2.14 veranschaulichen auch die unterschiedliche Schweißbad Morphologie von den Al-Cu und Cu-Al Konfigurationen. Im ersten Fall zeigt die Schweißnaht an der oberen Oberfläche die größte Breite und verjüngt sich mit zunehmender Einschweißtiefe. Die zweite Konfiguration zeigt ein gegenteiliges Verhalten. Dies kommt durch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien zustande. Dabei spielen besonders der Wärmeleitungskoeffizient und die Schmelztemperatur eine Rolle.[18]

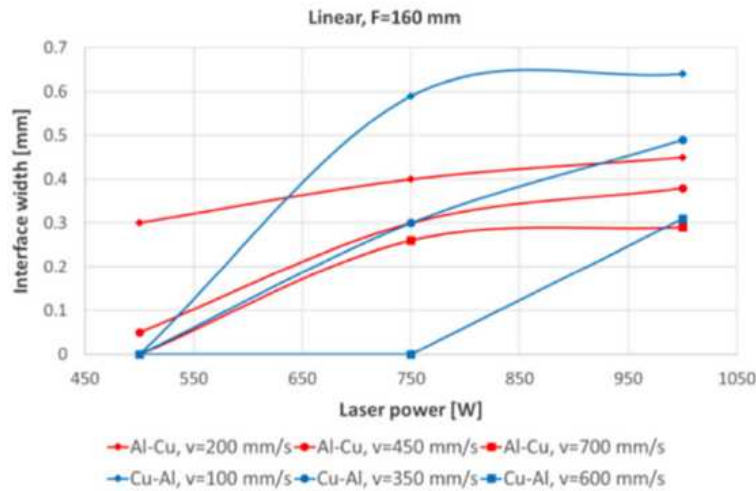


Abbildung 2.14: Schweißnahtbreite mit einer Brennweite von 160 mm[18]

In den Abbildungen 2.15 und 2.16 werden Querschliffe von unterschiedlichen Leistungen und unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt, dabei werden beide Materialanordnungen betrachtet.

In der Materialanordnung, bei welcher das Aluminium an der Oberseite ist, wird zuerst das Material mit der niedrigeren Schmelztemperatur vom Laserstrahl erwärmt und das darunterliegende Kupfer mit einem wesentlich höheren Schmelzpunkt und einer höheren thermischen Leitfähigkeit wird weit weniger aufgeschmolzen als das Aluminium an der Oberseite. Wenn jedoch Kupfer an der Oberseite ist, wird die eingebrachte Wärme sehr schnell an der Kontaktfläche zum Aluminium abgeleitet, dies ist aufgrund der höheren Schmelztemperatur des Kupfers, wird das Aluminium abrupt geschmolzen und wird bei überhöhter Energie des Lasertrahls mehr oder weniger geschnitten. Wenn der Schmelzpunkt des Kupfers erreicht wird und sich ein Keyhole ausbilden kann steigt die Absorption sprunghaft an und zieht eine Überhitzung der Schmelze nach sich, welche die entstandene Wärme an das darunterliegende Aluminium in einem sehr hohen Ausmaß abgibt.[18]

Die gezeigte Abbildung 2.17 veranschaulicht die Wiedererstarrung der Schmelze nach dem Schweißvorgang einer teilweisen Schweißung bei einer Al-Cu Anordnung mit einer Brennweite von 160 mm. Durch diese Illustration wird klar, dass diese Schweißung mit-

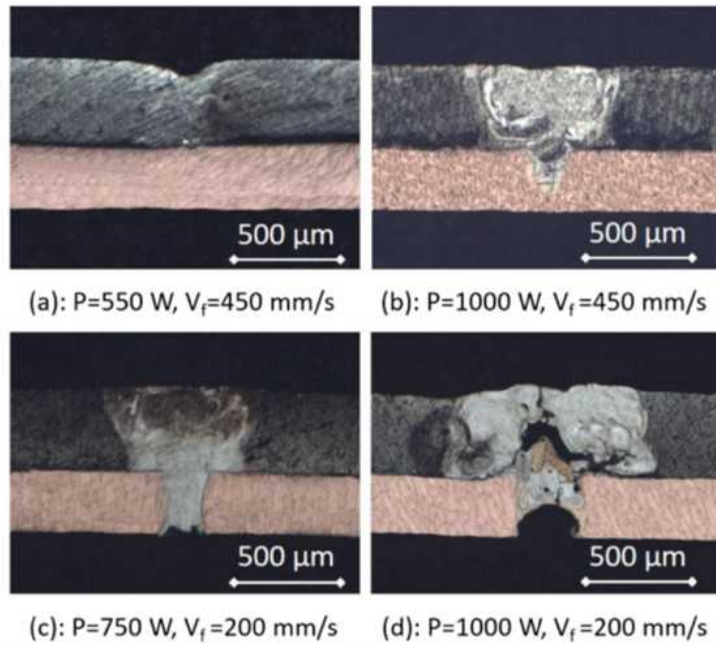


Abbildung 2.15: Linearer Vorschub, $F= 160 \text{ mm}$, Al-Cu[18]

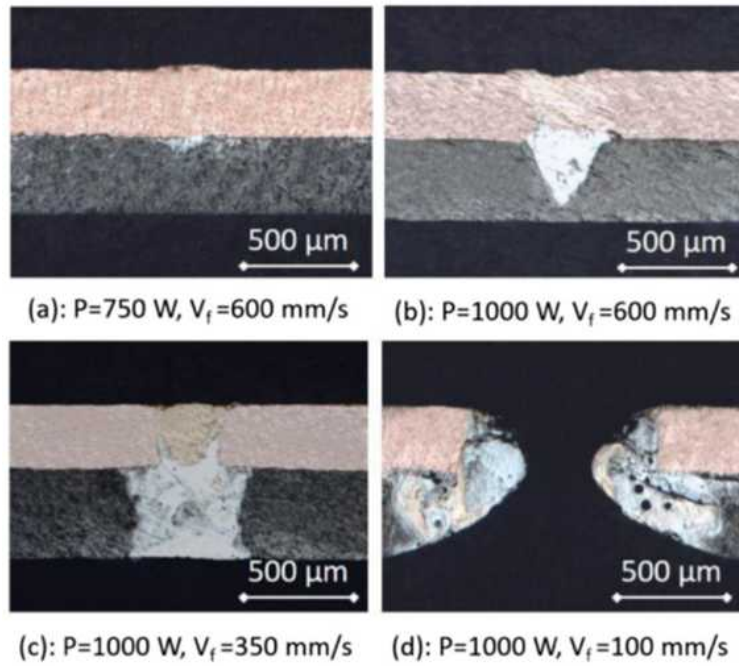


Abbildung 2.16: Linearer Vorschub, $F= 160 \text{ mm}$, Cu-Al[18]

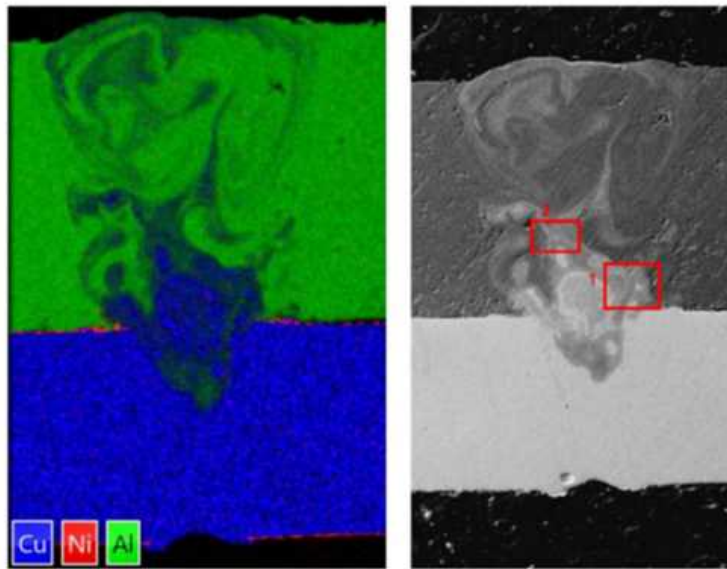


Abbildung 2.17: SEM-EDS Aufnahmen für teilweise Schweißung (Al-Cu),
F= 160 mm[18]

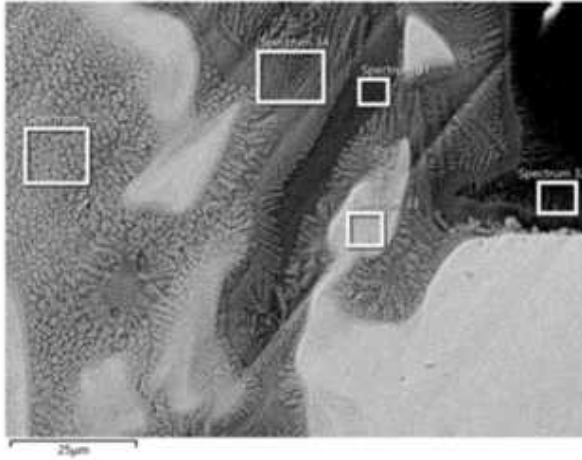
tels Ausbildung eines Keyholes durchgeführt wurde. Es entsteht dabei eine rege Durchmischung mittels des hohen Druckes des Metallampfes, dieser bringt teilweise Kupfer in die Aluminiumschicht nach oben. Die dünne Nickelschicht, welche als rote Schicht zu erkennen ist, verschwindet im Bereich der Schweißnaht vollkommen, dies ist aufgrund teilweiser Verdampfung und Vermischung mit den anderen Materialien.[18]

Die Werkstoffzusammensetzungen der Zone 1 und der Zone 2, der Al-Cu Anordnung werden in den Abbildungen 2.18 und 2.19 dargestellt und die vorkommenden Elemente aufgelistet.

Die Abbildung 2.20 zeigt eine Schweißnaht mit dem Kupferwerkstoff an der Oberseite, bei einer Brennweite von 160 mm und teilweiser Schweißung. Dabei wurde wieder ein Keyhole ausgebildet, jedoch unterscheidet sich die Durchmischung von der Al-Cu Konfiguration. Das dichtere Kupfer sinkt bei dieser Anordnung nach unten und die Vermischung der Werkstoffe wird in die untere Schicht verlagert. Dazu wurden EDS-Analysen im Bereich der Kontaktfläche und im mittleren unteren Bereich angestellt.[18]

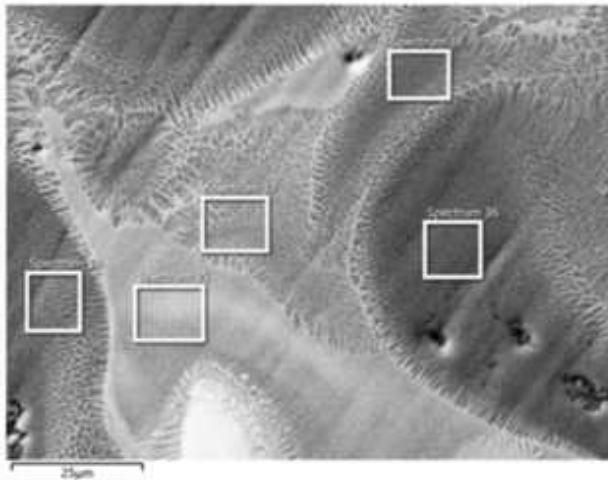
Die Abbildungen 2.21 und 2.22 zeigen die Werkstoffzusammensetzungen der Zonen 1 und 2 bei einer Cu-Al Anordnung.

Die Analyse der Werkstoffzusammensetzung wurde in der Arbeit von Fortunato und Ascari aufgrund der Verteilung der Elemente in der Schweißnaht durchgeführt und hatte nicht als Hauptziel die Bestimmung der auftretenden intermetallischen Phasen.[18]



Wt.%	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Total
Spectrum 30	36,05	0,03	0,2	0,27	63,45	100
Spectrum 31	71,55	0,07	0,27	0,06	28,05	100
Spectrum 32	86,53	0,06	0,26	2,55	10,6	100
Spectrum 33	11,47	0,1	0,15	0,42	87,87	100
Spectrum 34	53,18	0,12	0,22	0,23	46,24	100

Abbildung 2.18: Werkstoffzusammensetzung Zone 1 (Kontaktfläche) Al-Cu, F= 160 mm, Spectrum 30 links, Spectrum 31 mitte rechts oben, Spectrum 32 rechts, Spectrum 33 unten, Spectrum 34 mitte links oben[18]



Wt.%	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Total
Spectrum 35	63,49	0,09	0,22	0,38	35,82	100
Spectrum 36	97,86	0,03	0,33	0,03	1,74	100
Spectrum 37	74,91	0,02	0,29	0,21	24,57	100
Spectrum 38	90,75	0,04	0,22	0,13	8,85	100
Spectrum 39	90,26	0,06	0,29	0,31	9,08	100

Abbildung 2.19: Werkstoffzusammensetzung Zone 2 (mittlerer oberer Bereich) Al-Cu, F= 160 mm, Spectrum 30 links, Spectrum 35 mitte unten, Spectrum 36 mitte rechts, Spectrum 37 mitte oben, Spectrum 38 oben rechts[18]

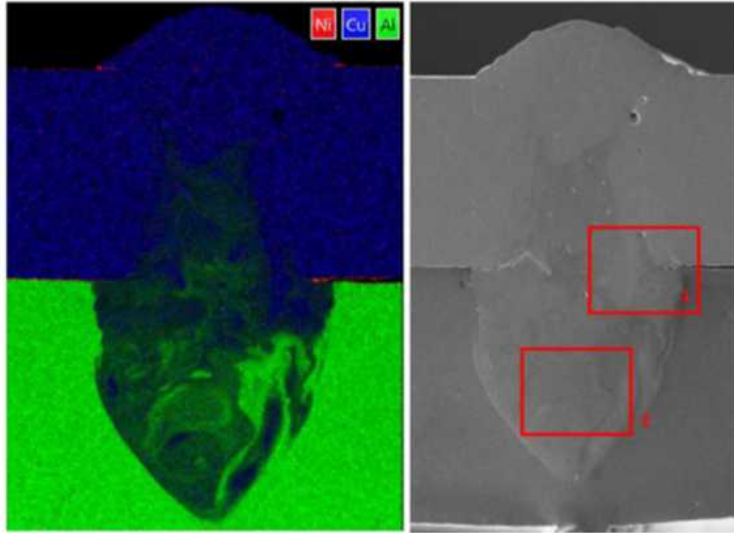
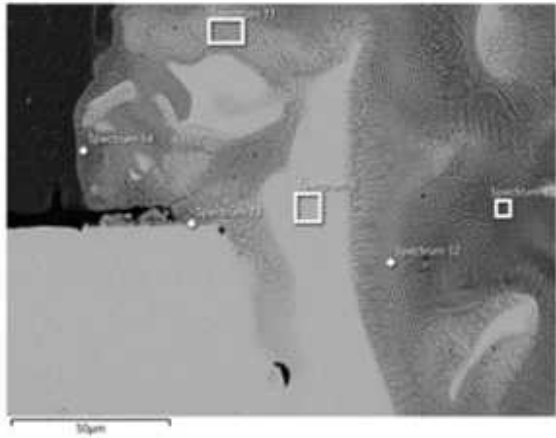


Abbildung 2.20: SEM-EDS Aufnahmen für teilweise Schweißung (Cu-Al),
F= 160 mm[18]



Wt. %	Al	Si	P	Fe	Ni	Cu	Total
Spectrum 9	7,74	0,05	0,03	0,12	0,01	92,05	100
Spectrum 10	62,88	0,07	0,05	0,26	0,28	36,47	100
Spectrum 11	31,15	0,03	0,09	0,22	0,79	67,72	100
Spectrum 12	40,24	0,05	0,1	0,09	0,43	59,09	100
Spectrum 13	39,06	0,05	2,29	0,2	7,43	50,97	100
Spectrum 14	62,53	0,11	0,04	0,16	0,65	36,53	100

Atomic %	Al	Si	P	Fe	Ni	Cu	Total
Spectrum 9	16,48	0,09	0,05	0,12	0,01	83,23	100
Spectrum 10	79,87	0,08	0,06	0,16	0,16	19,67	100
Spectrum 11	51,5	0,05	0,13	0,18	0,6	47,54	100
Spectrum 12	61,24	0,07	0,13	0,07	0,3	38,19	100
Spectrum 13	58,95	0,07	3,02	0,14	5,15	32,67	100
Spectrum 14	79,61	0,13	0,04	0,1	0,38	19,75	100

Abbildung 2.21: Werkstoffzusammensetzung Zone 1 (Kontaktfläche) Cu-Al,
F= 160 mm, Spectrum 9 mitte, Spectrum 10 rechts, Spectrum 11 oben,
Spectrum 12 unten, Spectrum 13 mitte links[18]

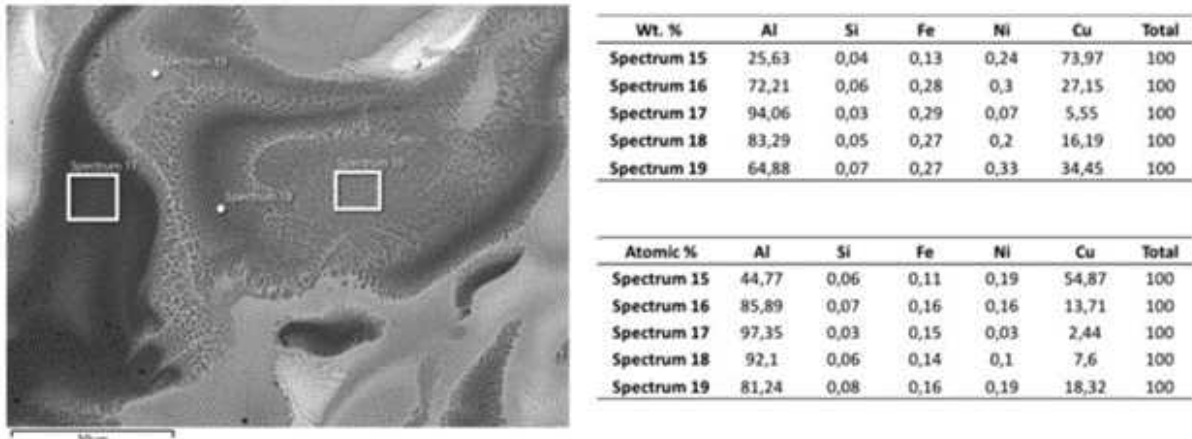


Abbildung 2.22: Werkstoffzusammensetzung Zone 2 (mittlerer unterer Bereich) Cu-Al, $F=160$ mm, Spectrum 15 oben rechts, Spectrum 16 mitte rechts, Spectrum 17 links, Spectrum 18 mitte, Spectrum 19 oben links[18]

2.6.3 Morphologie und Mikrostruktur einer Schweißnaht mittels Wobbeln von Fortunato und Ascari

Im Hinblick auf die Einschweißtiefe wurden bei der Versuchsreihe von Fortunato und Ascari alle Proben entweder durchgeschweißt oder völlig durchgeschnitten. Die Ergebnisse zeigen hier deutlich, dass mittels Wobbeln, mit einer kleinen Spotgröße sich ein schwer zu handhabender Zustand im Hinblick auf die Wärmeeinbringung ergibt.[18]

Auch bei dieser Verfahrensweise, wie in Abbildung 2.23 zu sehen, führt eine Reduktion der aufgetragenen Laserstrahlenergie oder eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer Reduktion der aufgeschmolzenen Bereiche.[18]

2.6.4 Ergebnisse der Zugversuche von Fortunato und Ascari

Für diese Versuchsreihe mit dem Versuchsaufbau von Abbildung 2.24 wurden jeweils 10 Proben der unterschiedlichen Parameterwahl herangezogen. Die maximal erreichbare Zugkraft wurde bei beiden Verfahren (*linear und wobbeln*) bei einer Verbindungsbreite an der Kontaktfläche zwischen den beiden Blechen von 0,2 mm bis 0,3 mm erreicht. Bei kleineren Breiten der Kontaktstelle kam es zu einer geringeren Zugfestigkeit, sowie bei einer größeren Breite als 0,3 mm. Dies ist aufgrund der größeren thermischen Einflusszone und einer verstärkten Ausbildung von intermetallischen Phasen zurückzuführen.[18]

Weiters wurde bei linearem Vorschub ein höherer Durchschnittswert der gemessenen Zugfestigkeit erreicht als mittels Wobbeln, bei gleicher Breite an der Kontaktstelle der beiden Bleche. Die Strategie des Wobbelns bedeutet stets einen höheren Energieeintrag als bei einer linearen Verfahrensweise, dies hat zur Folge, dass höhere Temperaturen und niedrigere Abkühlgeschwindigkeiten erzielt werden im Vergleich zu einer linearen Verfahrensweise. Diese Umstände führen zu einem verstärkten Wachstum der intermetallischen Phasen und setzen somit die Zugfestigkeit der Schweißverbindung herab.[29]

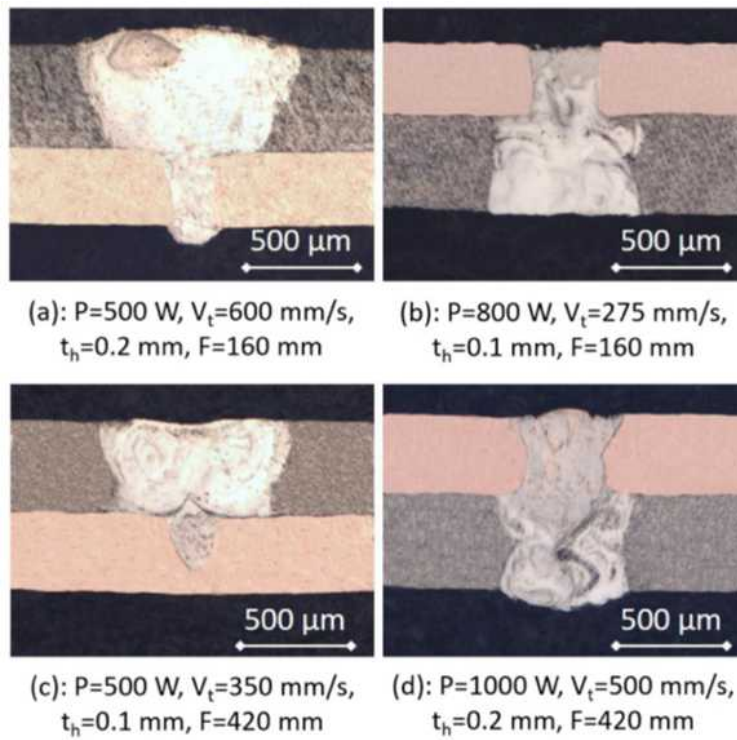


Abbildung 2.23: Schweißnaht mittels Wobbeln[18]

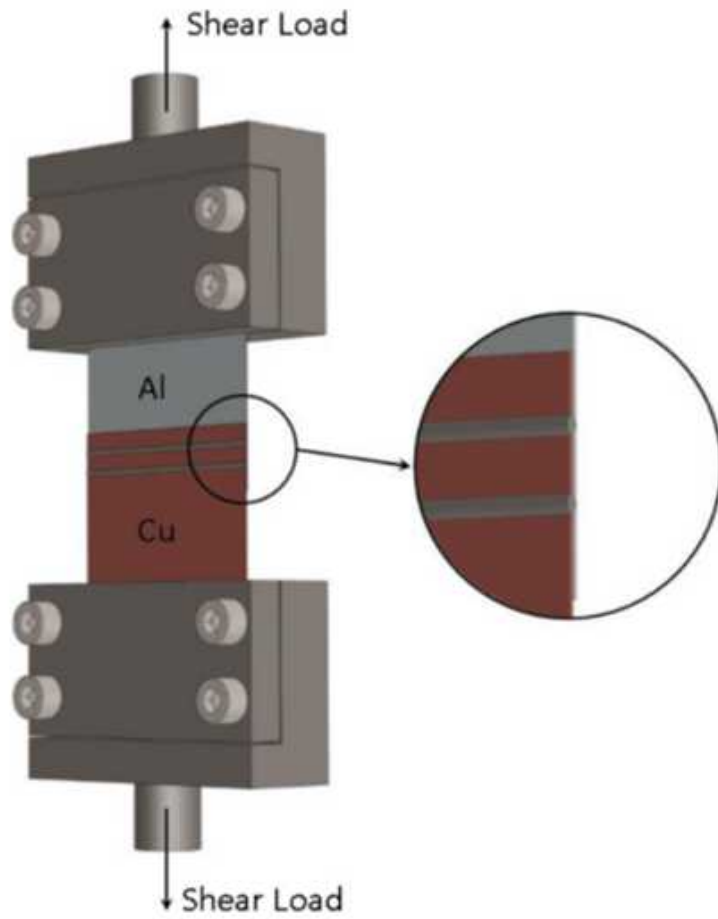


Abbildung 2.24: Versuchsaufbau Zugfestigkeit Fortunato und Ascari[18]

Die Ergebnisse der Arbeit von Fortunato und Ascari können keinen optimalen Wert für die Breite der Schweißverbindung im Hinblick auf die Zugfestigkeit liefern. Jedoch kann gesagt werden, dass eine breite Schweißverbindung zu einer verstärkten Ausbildung von intermetallischen Phasen führt, welche die Zugfestigkeit herabsetzen. Bei einer Wahl von 2 Schweißbädern konnte die Zugfestigkeit bei einer linearen Verfahrensweise um zirka 20 % gesteigert werden. Eine Verschweißung mittels Wobbeln brachte eine Verringerung von rund 15 %, dies gilt auch für eine Anordnung mit Kupfer an der Oberseite und Aluminium an der Unterseite. Eine Wahl von 3 Schweißbädern brachte im Vergleich von 2 Schweißbädern lediglich eine Steigerung der Zugfestigkeit von etwa 5 %.[18]

2.7 Laserschweißen von Aluminiumblechen (AA 2014 Aluminium): prozessbedingte Herausforderungen von Alfieria et al.

Bei der hier vorgestellten wissenschaftlichen Arbeit wurden die Themen wie die richtige Wahl des Schutzgases, die Schwelle der auf die Fläche bezogenen Leistung zur Erzeugung eines Keyholes, der Einfluss von Magnesium auf die Porenbildung, der Einfluss auf die Stabilität des Prozesses, als auch die Aufweichung in dem Bereich des Schmelzbades bearbeitet. Dabei wurden Härtmessungen nach Vickers, EDS-Analysen und Zugversuche durchgeführt.[2]

Als Material für die durchgeführten Versuche wurde die Aluminiumlegierung AA 2024 gewählt, diese enthält einen relativ hohen Anteil an Kupfer (3,8 % - 4,9 %) als auch einen relativ hohen Anteil an Magnesium (1,2 % - 1,8 %).[2]

Das Verschweißen von Aluminiumblechen mittels Laser wird durch die starke Reflexion der Laserstrahlung der verwendeten Werkstoffe, die hohe thermische Leitfähigkeit, einer geringen Viskosität im flüssigen Zustand und einer starken Neigung zur Porenbildung erschwert.[3] [20]

Zusätzlich wurde eine Verdampfung und ein genereller Schwund an Legierungselementen durch den Schweißprozess festgestellt[2], dieser Umstand führte zu einer Änderung der chemischen Zusammensetzung innerhalb der Schweißnaht.[39]

Eine Instabilität des erzeugten Keyholes kann zu einer rauen Oberfläche der Schweißnaht, einer verstärkten Ausbildung von makroskopischen Poren innerhalb der Schweißnaht und somit zu einer qualitativ schlechten Schweißverbindung führen.[39] [23]

Einer Instabilität des erzeugten Keyholes kann vorab mittels einer Scannertechnik entgegengewirkt werden. [27]

2.7.1 Zuführung des Schutzgases von Alfieria et al.

Da der Laserstrahl sowohl mit dem Metaldampf, welcher aufgrund des Keyholes erzeugt wird, als auch mit dem Schutzgas interagiert, ist die Wahl des Schutzgases nicht unwesentlich. Der Laserstrahl führt zu einer Ionisation oberhalb der Schweißnaht, dabei muss eine Plasmabildung verhindert werden, um die Erreichung des Laserstrahls der Oberfläche des Werkstücks mit minimaler Behinderung sicherzustellen. Somit werden eine maximale Qualität und eine möglichst hohe Einschweißtiefe gewährleistet. Wird die

Plasmabildung nicht verhindert, kann es zu einer Änderung des Brechungsindex und einer ungeplanten Defokussierung des Laserstrahls kommen.[30]

Da Helium im Vergleich zu Argon ein höheres Ionisationspotential aufweist und somit resistenter gegenüber einer Plasmabildung ist, wird dieses für Aluminiumschweißungen bevorzugt. Dadurch entstehen auch im Vergleich zu einer Verwendung von Argon feinere Spritzer. Bei den Versuchen hierbei wurde ein Schutzgasstrom von 15 l/Minute bei einem Zuführungswinkel von 25 Grad verwendet. Somit konnte eine laminare Strömung erreicht werden, welche das Schmelzbad vor äußeren Verwirbelungen schützt.[2]

2.7.2 Probleme der Interaktion von Laser und Material von Alfieria et al.

Eine Behinderung der Diffusion stellt häufig die vorhandene natürliche Oxidschicht von Aluminium an der Oberfläche der Proben dar, welche verschweißt werden sollen.[2]

Das vorhandene Aluminiumoxid schmilzt erst bei einer Temperatur von 2050 °C (Davis JR. Aluminium and Aluminium Alloys. Material Park: ASM International; 1993), wohingegen das Grundmaterial schon bei etwa 600 °C zu schmelzen beginnt. Daher kann es als ratsam angesehen werden das Aluminiumoxid vor der Schweißung zu entfernen, sowie auch alle anderen ungewünschten Materialien an der Oberfläche. [2]

Ein weiteres Problem bei einer Laserschweißung von Aluminium stellt der niedrige Absorptionsgrad und die relativ hohe thermische Leitfähigkeit dar. Es muss eine höhere Energie pro Volumen bei Aluminium im Vergleich zu Stahl aufgebracht werden, obwohl Stahl einen deutlich höheren Schmelzpunkt aufweist.[2]

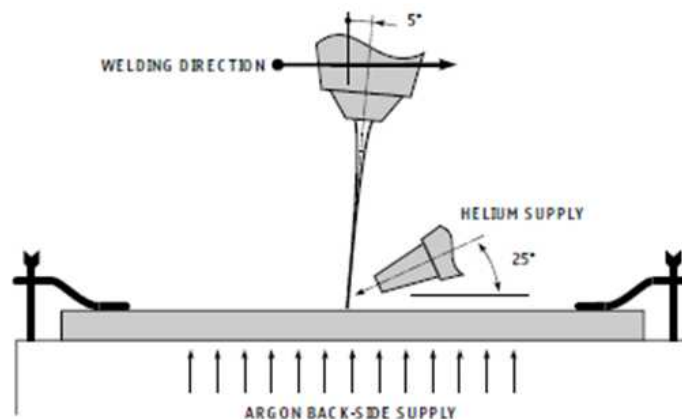


Abbildung 2.25: Setup für Laserschweißen von Aluminium: Kupfer-Lanze für Schutzgaszuführung und Schutzgas an der Rückseite[2]

Die starke Reflexion der Laserstrahlung an der Aluminiumoberfläche kann ebenfalls zu Problemen beim Schweißprozess führen. Deshalb ist es ratsam den Laserkopf seitlich leicht zu neigen, wie in Abbildung 2.25, um eine Rückreflexion in die optischen Komponenten zu vermeiden.[2]

Der Reflexionsgrad hängt von der Wellenlänge der Laserstrahlung und der Temperatur der Werkstückoberfläche ab, wobei der Reflexionsgrad mit steigender Temperatur

abnimmt.[39]

2.7.3 Porosität von Alfieria et al.

Bei der Schweißung von Aluminium treten im Allgemeinen zwei Arten von Poren auf. Die erste Art der auftretenden Poren sind Mikroporen, wie in Abbildung 2.26 zu erkennen sind, mit einem Durchmesser von unter $50\ \mu\text{m}$. [20]

Diese führen im Allgemeinen nicht zu einer technischen Ablehnung der Schweißnaht und haben ihren Ursprung meist aufgrund von Wasserstoff oder anderen vorkommenden Gasen in Folge einer inadäquaten Schweißnahtvorbereitung. [2]

Makroporen hingegen haben eine Ausdehnung von mehr als $300\ \mu\text{m}$ und beeinflussen die mechanischen Eigenschaften in einem erheblichen Maße. Diese Art der Poren befindet sich im Allgemeinen in der Mitte der Schweißnaht. [1]

Als mögliche Ursache solcher Makroporen könnte ein nicht optimales Kollabieren des Keyholes verantwortlich sein. [2]

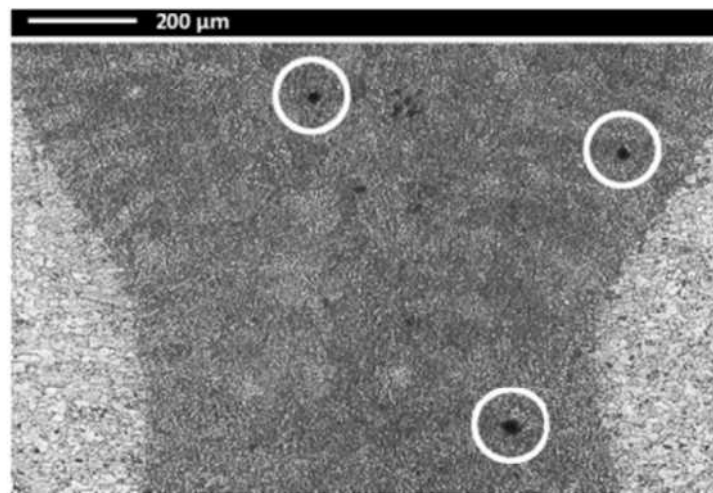


Abbildung 2.26: Mikroporen in der Querschnittsfläche der Schweißnaht (Dicke: 1,25 mm, Leistung: 1600 W, Vorschub: 80 mm/s, fokussierter Laserstrahl) [2]

Defokussierung von Alfieria et al.

Wie für alle anderen Materialien wird auch für das Aluminiumschweißen laut Literatur eine Defokussierung empfohlen. [23][25]

Durch die Defokussierung kann in Folge die Porosität sowie die Einschweißtiefe positiv beeinflusst werden. [2]

Der Laserstrahl ist nach oben und unten um den Brennpunkt symmetrisch, jedoch werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt, je nachdem ob man in positiver oder negativer Richtung zum Werkstück defokussiert. [2]

Der Einfluss der Defokussierung wird in der Arbeit von Alfieri et al. anhand von 3,2 mm dicken Aluminiumblechen in Stumpfstoßanordnung veranschaulicht. Dabei wurde eine konstante Laserleistung von 1800 W bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s verwendet. Die Defokussierung belief sich dabei auf +/- 1 mm von der Werkstückoberfläche.[2] Die Auswirkungen der Defokussierung auf die Porosität der Schweißnaht wird in Abbildung 2.27 veranschaulicht, dabei wird auf eine Defokussierung von +/- 1 mm von der Werkstückoberfläche eingegangen. Ein Optimum für die Bildung von makroskopischen Poren wird dabei bei einer Defokussierung von -0,5 mm erreicht.

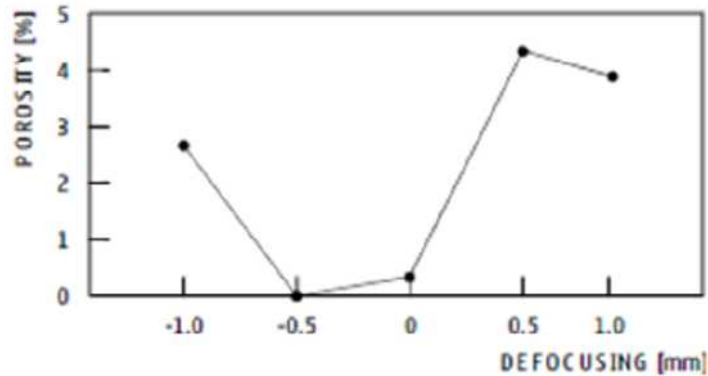


Abbildung 2.27: Ausbildung von Makro-Poren in Abhängigkeit der Defokussierung[2]

In Abbildung 2.28 werden Querschliffe einer Schweißnaht, welche mit einer Defokussierung von -1 mm von der Werkstückoberfläche erzeugt wurde dargestellt, dabei zeigt sich eine Instabilität des Keyholes während des Schweißprozesses.

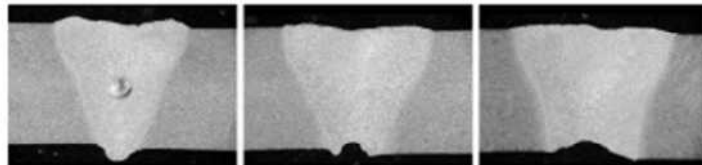


Abbildung 2.28: Querschliffe einer Schweißnaht mit instabilem Keyhole in 10 mm Abständen (Dicke: 3,2 mm, Leistung: 1800 W, Vorschubgeschwindigkeit: 10 mm/s, 1 mm Defokussierung in negativer Richtung)[2]

Bei einer Durchschweißung konnte bei der Arbeit von Alfieri, Caiazzo und Sergi eine minimale Porosität bei einer negativen Fokuslage von 0,5 mm erreicht werden. Eine stärkere Defokussierung führte zu einer höheren Instabilität des Keyholes und zu einer teilweisen Kollabierung, welche in Gaseinschlüssen resultierten.[2]

2.7.4 Verdampfung von Magnesium von Alfieria et al.

Ein instabiles Keyhole wird bei legierten Materialien erwartet, da es aufgrund der unterschiedlichen Schmelz- und Siedetemperaturen der vorhandenen Legierungselemente zu fluktuierenden Schweißbedingungen kommen kann.[2]

Es kann eine Abnahme von Magnesium in Richtung des Schweißbades beobachtet werden, wobei lokale Magnesiumkonzentrationen unabhängig vom betrachteten Beobachtungsfeld sind. Dies zeigt, dass es eine rege Durchmischung im Schweißbad gibt.[2]

Die Ergebnisse eines EDS-Scans werden in Abbildung 2.29 und Abbildung 2.30 veranschaulicht. Dabei wurden im oberen Drittel der Schweißnaht zwei Messstrecken mit jeweils fünf Messpunkten untersucht. Der Magnesiumanteil steigt mit dem Abstand zur Schweißnaht an und deutet somit auf einen Magnesiumschwund im Bereich der Schweißnaht hin.

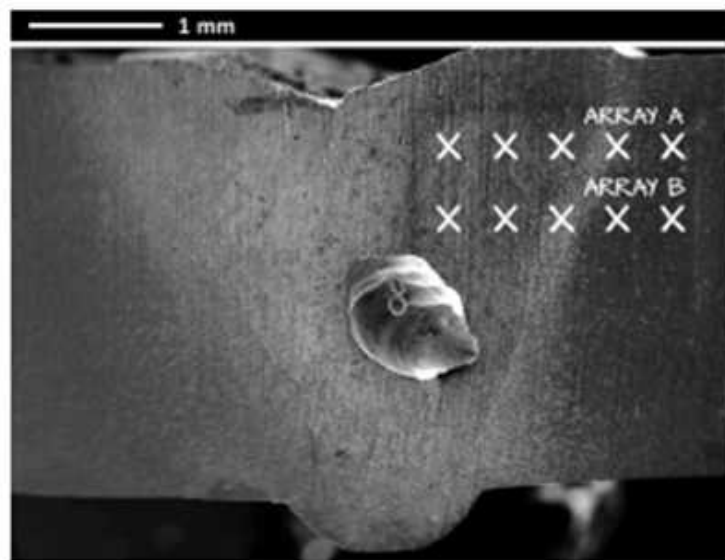


Abbildung 2.29: EDS-Scan einer Schweißnaht (Dicke 3,2 mm, Leistung: 1800 W, Vorschubgeschwindigkeit: 10 mm/s, 1mm Defokussierung in negativer Richtung)[2]

Somit kann ein direkter Zusammenhang zwischen Defokussierung, Magnesiumschwund und der Instabilität des Schweißprozesses unterstellt werden.[2]

2.7.5 Aufweichung der Schweißnaht von Alfieria et al.

Zur Bestimmung der Härte im Bereich der Wärmeeinflusszone können Mikro-Härtetestungen senkrecht zur Schweißnaht durchgeführt werden. Nachfolgend wird in Abbildung 2.31 die Mikrohärtigkeit in Bezug zum Abstand zur Schweißnaht veranschaulicht. Diese nimmt im Bereich der Schweißnaht schlagartig ab.[2]

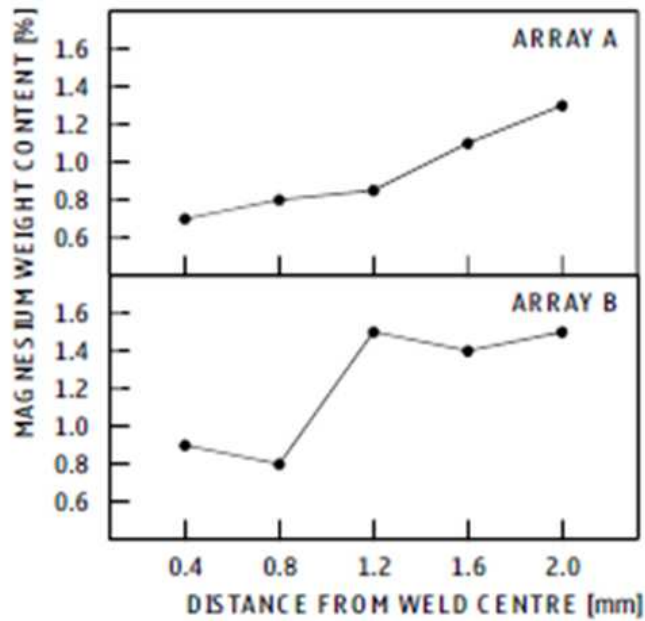


Abbildung 2.30: Magnesiumanteil senkrecht zur Schweißnaht (Dicke 3,2 mm, Leistung: 1800 W, Vorschubgeschwindigkeit: 10 mm/s, 1 mm Defokussierung in negativer Richtung)[2]

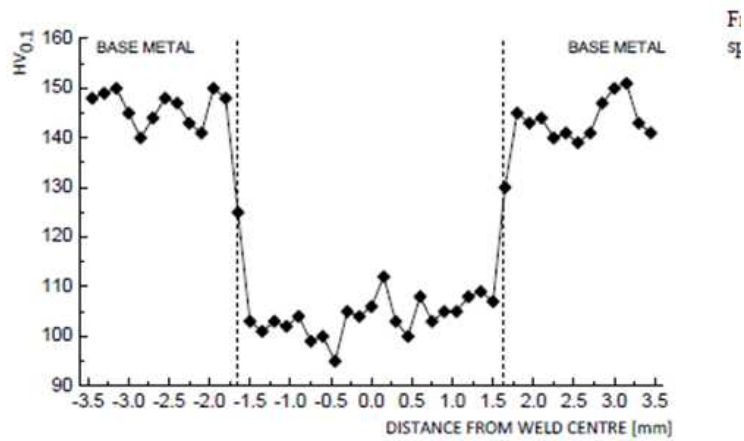


Abbildung 2.31: Vickers Härte senkrecht zur Schweißnaht (Dicke: 3,2 mm, Leistung: 1800 W, Vorschubgeschwindigkeit: 10 mm/s, fokussierter Laserstrahl)[2]

2.8 Erkenntnisgewinn aus der Literatur

Der Erkenntnisgewinn aus der Literatur deckt sich zu einem Großteil mit den Erkenntnissen aus den durchgeführten Vorversuchen, als auch mit den ausgewerteten Proben. Manche Erkenntnisse aus der Literatur konnten aufgrund des Umfangs dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Für das Laserschweißen von Aluminium und Kupfer wird aufgrund der sehr niedrigen Absorption der Laserstrahlung im infraroten Bereich eine hohe Leistung benötigt um genügend Energie für einen Schmelzvorgang einbringen zu können. Die hohe Reflexion der Materialien macht somit auch eine leichte Neigung des Laserkopfes während des Schweißprozesses notwendig, um die oft kostspielige Optik nicht zu beschädigen.[2] Die Beschaffung und die Temperatur der Oberfläche kann ebenfalls einen Einfluss auf den Absorptionsgrad der eingebrachten Laserstrahlung haben, somit kann dieser durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung, beziehungsweise durch eine Vorwärmung beeinflusst werden.[14][15][39] Die benötigte Laserleistung könnte wie in Abbildung 2.1 gezeigt, vor allem für den Werkstoff Kupfer durch die Verwendung eines Lasertyps im grünen Wellenlängenbereich deutlich reduziert werden, da hier der Absorptionsgrad um ein vielfaches höher liegt als im infraroten Wellenlängenbereich. Die Verwendung eines Lasertyps im grünen Wellenlängenbereich ermöglicht außerdem einen effizienten Einsatz der Methode des Wärmeleitungsschweißens. Diese Methode wäre mit einem Lasertyp im infraroten Wellenlängenbereich nur schwer zu realisieren.[14]

Für den Werkstoff Aluminium kann ein Abtragen der Oxidschicht für den Schweißprozess von Vorteil sein, da diese einen sehr hohen Schmelzpunkt aufweist und einen hohen elektrischen Widerstand darstellt.[13] Weiters kann die Bildung von Heißrisen im Aluminium ein Problem für die mechanische Beanspruchung der Schweißnaht darstellen, dieses Problem kann jedoch mittels Vorwärmen der Proben deutlich verringert werden.[13] Diese Heißrisse können in rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen festgestellt werden. Eine weitere Herausforderung für das Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen stellt die Porenbildung durch den im Werkstoff gelösten Wasserstoff dar. Diese entstehende Porosität ist jedoch sehr schwierig zu vermeiden.[13] Zudem tritt durch die eingebrachte Laserleistung in den Aluminiumwerkstoff ein Lösungsglühen der Ausscheidungen auf.[13] Dadurch kommt es zu einem schlagartigen Härteabfall im Bereich der Schweißnaht.[2] Dieser Umstand sollte somit zu einem duktilen Verhalten während eines Zugversuchs im Bereich der Schweißnaht führen. Ebenfalls kommt es beim Schweißvorgang von Aluminiumlegierungen zu einem Magnesiumschwund im Bereich der Schweißnaht, dieser wurde im oberen Drittel der Schweißnaht von Alfieria et al. bestimmt. Helium weist im Vergleich zu Argon für das Schweißen von Aluminium ein höheres Ionisationspotential auf und es entstehen bei einer Verwendung von Helium feinere Spritzer. Die Schutzgaszuführung sollte unter einem Winkel von 25 Grad bei einem Schutzgasstrom von etwa 15 l/Minute realisiert werden.[2] Weiters sollte beim Werkstoff Aluminium eine Defokussierung des Laserstrahls in negativer Richtung angewendet werden, um die Porosität der Schweißnaht positiv zu beeinflussen (*siehe Abbildung 2.27*).[2]

Für die Materialpaarung Aluminium-Kupfer wurden von Fortunato und Ascari zwei

2 *Stand des Wissens*

verschiedene Materialanordnungen in einer Überlappkonfiguration miteinander verschweißt. Dabei war einmal Aluminium und einmal Kupfer an der Oberseite, wobei die Anordnung mit Aluminium an der Oberseite weniger Herausforderungen beim Schweißen verursachte. Zudem wurde ebenfalls auf die Verfahrensweise des Wobbelns eingegangen. Weiters wurden in der Arbeit von Fortunato und Ascari mehrere Parameterkombinationen im Hinblick auf die Schweißnahtbreite und die Schweißnahttiefe vorgestellt. Auch die Vermischung der beiden Materialien im Schmelzbad wird von Fortunato und Ascari betrachtet, wie auch die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche.[18] Ein weiterer wichtiger Aspekt hierbei ist, dass die intermetallischen Phasen bei hohen Temperaturen und geringen Abkühlgeschwindigkeiten im Vergleich zu niedrigeren Temperaturen und hohen Abkühlgeschwindigkeiten mehr Zeit für das Wachstum haben und somit die Zugfestigkeit herabsetzen und den spezifischen elektrischen Widerstand erhöhen.[29]

3 Geräte

3.1 Werkstoffe und Probenpräparation

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den verwendeten Materialien sowie den verwendeten Mitteln zur Probenpräparation. Die durchgeführten Versuche lassen sich in zwei Hauptgruppen teilen. Als erste Gruppe ist hier die Vorversuchsreihe zu nennen. Die zweite Hauptgruppe umfasst die zur Auswertung durchgeführten Schweißversuche mit einer eigens dafür angefertigten Probenaufnahme. Jede Hauptgruppe kann wiederum anhand der Materialpaarung unterschieden werden. In dieser Arbeit wurden drei Materialpaarungen untersucht: Aluminium-Aluminium, Kupfer-Kupfer und Aluminium-Kupfer.

3.1.1 Proben für die Vorversuche

Für die ersten Schweißversuche, welche zur Parameterfindung dienten wurden Proben aus den Materialien AlMg3 sowie Cu-ETP verwendet. Es wurden Proben mit einer Dicke von $1,5\text{ mm}$ mit den Abmessungen 580 mm^2 verwendet. Dabei wurden immer zwei Plättchen deckungsgleich übereinander gelegt und miteinander verschweißt, siehe Abbildung 3.1. Für die Vorversuche wurden unterschiedliche Parameterkombinationen verwendet, um eine qualitativ hochwertige Schweißnaht zu erzeugen. Dabei wurde als Schutzgas Argon als auch Helium verwendet, diese werden daher explizit erwähnt.

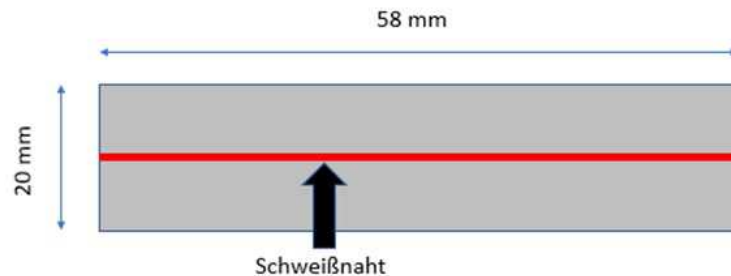


Abbildung 3.1: Lage der Schweißnaht bei den Vorversuchen

3.1.2 Proben für die Untersuchungen

Die Proben, welche zur Auswertung herangezogen wurden, wurden aus der Aluminiumlegierung EN AW-6101-T63 und aus Cu-ETP gefertigt. Dafür wurden Proben mit einer Dicke von 1 mm mit den Abmessungen $608,3\text{ mm}^2$ verwendet. Die Proben wurden versetzt (Überlappkonfiguration) in einer Einspannung aus Aluminium miteinander verschweißt, wie in Abbildung 3.2 dargestellt.

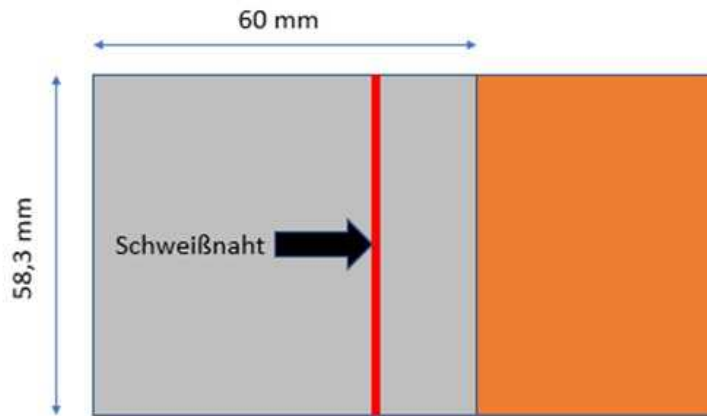


Abbildung 3.2: Lage der Schweißnaht bei den ausgewerteten Proben

Verwendete Parameter der Aluminium-Aluminium Schweißverbindung

- Laser: Faserlaser
- Leistung: 850 W
- Vorschub: 20 mm/s
- Schutzgas: 10 l/Minute Argon
- Fokusslage: Mittelebene der beiden aufeinanderliegenden Proben
- Laserlichtkabel: $\varnothing 100 \mu m$

verwendete Parameter der Aluminium-Kupfer Schweißverbindung

- Laser: Faserlaser
- Leistung: 1000 W mit einer Leistungsminderung um 15 % über die Schweißnahtlänge
- Vorschub: 5 mm/s
- Schutzgas: 15 l/Minute Argon
- Fokusslage: Mittelebene der beiden aufeinanderliegenden Proben
- Laserlichtkabel: $\varnothing 100 \mu m$

Verwendete Parameter der Kupfer-Kupfer Schweißverbindung

Parameter T1

- Laser: Scheibenlaser

3 Geräte

- Leistung: 5000 W (60% *in der Kernfaser*)
- Vorschub: 250 mm/s
- Schutzgas: Druckluft
- Fokusslage: Oberfläche
- Laserlichtkabel: $\text{Ø}50 \mu\text{m}$ im Kern und $\text{Ø}200 \mu\text{m}$ in der Ringfaser

Parameter T2

- Laser: Scheibenlaser
- Leistung: 3000 W (60% *in der Kernfaser*)
- Vorschub: 50 mm/s mittels Wobbeln mit einer Wobbelbreite von 1 mm, einem Wobbelabstand von 0,39 mm und einer Wobelfrequenz von 127 Hz
- Schutzgas: Druckluft
- Fokusslage: Oberfläche
- Laserlichtkabel: $\text{Ø}50 \mu\text{m}$ im Kern und $\text{Ø}200 \mu\text{m}$ in der Ringfaser

Parameter T3

- Laser: Scheibenlaser
- Leistung: 5000 W (60% *in der Kernfaser*)
- Vorschub: 250 mm/s
- Schutzgas: Druckluft
- Fokusslage: Oberfläche
- Laserlichtkabel: $\text{Ø}50 \mu\text{m}$ im Kern und $\text{Ø}200 \mu\text{m}$ in der Ringfaser

Parameter T4

- Laser: Scheibenlaser
- Leistung: 5000 W (60% *in der Kernfaser*)
- Vorschub: 150 mm/s
- Schutzgas: Druckluft
- Fokusslage: Oberfläche
- Laserlichtkabel: $\text{Ø}100 \mu\text{m}$ im Kern und $\text{Ø}400 \mu\text{m}$ in der Ringfaser

3.2 verwendete Formeln

Für die in dieser Arbeit verwendeten Angaben wurde der arithmetische Mittelwert aus

$$\bar{x} = \sum_{i=0}^n x_i \frac{1}{n}$$

berechnet.

Die empirische Standardabweichung wurde mittels der Formel

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

berechnet.

3.3 Verwendete Geräte

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den verwendeten Geräten für diese Arbeit. Dabei werden alle wichtigen Geräte kurz beschrieben, um die Vorgehensweise besser nachvollziehen zu können.

3.3.1 YLR-1500 CT Ytterbium Faser Laser

Für die hier durchgeführten Schweißversuche wurde ein Ytterbium Faser Laser der Firma IPG Laser GmbH herangezogen. Dieser Hochleistungslaser erreicht eine maximale Leistung von 1500 W bei einer Wellenlänge von 1070 nm, diese Wellenlänge befindet sich im Bereich des unsichtbaren Lichts. Dieses Gerät wird als Klasse 4 Hochleistungslaser-Laser nach CFR 1040.10 und nach IEC 60825 eingestuft.[19] Der hier genannte Faserlaser wurde für den Einsatz im industriellen Bereich sowie für den Bereich der Forschung konzipiert. Zu den Haupteigenschaften zählen etwa:

- eine hohe Strahlqualität am Faserausgang
- eine hohe Leistung
- lange Lebenserwartung bei einer hohen Verlässlichkeit
- kompaktes sowie robustes Design
- hohe Effizienz
- besitzt eine externe Computerschnittstelle, Hardwiringschnittstelle
- besitzt einen analogen Kontrollmodus
- Möglichkeit einer schnellen Modulation[19]

An den Laser wurde ein 100 μm dickes Laserlichtkabel für die Führung des Laserstrahls angeschlossen.

3.3.2 IRC 5 von ABB Robotics

Für die Handhabung des Laserkopfes wurde ein IRC 5 Industrieroboter von ABB Robotics verwendet. Der hier betrachtete Roboter besitzt 6 Freiheitsgrade und kann somit alle benötigten Positionen inklusive der benötigten Winkelstellungen erreichen. Die Codierung des Roboters wurde mittels des von ABB entwickelten Programms RAPID durchgeführt.[36]

3.3.3 Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop

Das Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop ist ein optisches Mikroskop mit einer großen Tiefenschärfe und besitzt moderne Messfunktionen für Inspektionen und auch Fehleranalysen. Die Zoomobjektive reichen von 20-200X und 100-1000X. Dieses Mikroskop wurde für die lichtmikroskopischen Untersuchungen verwendet.[10]

3.3.4 ATM Brillant 200

Bei der ATM Brillant 200 handelt es sich um eine leicht zu bedienende Nassschleifmaschine mit einem manuell zu betätigenden Kappschnitt. Die Kühlung der Trennscheibe ist hierbei in die Trennscheibenhaube mit integriert. Diese Maschine wurde für das Schneiden der Proben für die lichtmikroskopische Untersuchung verwendet.[34]

3.3.5 Trumpf Tru Laser Cell 3000

Die Tru Laser Cell 3000 vom Hersteller Trumpf ist eine kompakte sowie hochpräzise Lasermaschine mit fünf ansteuerbaren Achsen. Somit können auch 3-dimensionale Schweißungen durchgeführt werden. Die maximale Verfahrgeschwindigkeit der linearen Achsen beträgt bei dieser Maschine 50 m/ Minute. Diese Maschine wurde zur Herstellung der gesamten Kupfer-Kupfer Proben verwendet.[11]

3.3.6 Trumpf Tru Disk 8000

Für die Prozessparameter T1, T2 und T3 wurde ein Tru Disk 8000 Scheibenlaser des Herstellers Trumpf verwendet. Dieser zeichnet sich durch eine Maximalleistung von 8000 W mit einer Leistungskonstanz von +/- 0,5 % aus. Die Laserstrahlung wird dabei mit einer Wellenlänge von 1030 nm im infraroten Bereich emittiert. Dieser Laser wurde mit einem Laserlichtkabel mit Kern verbunden, welches einen Durchmesser von 50 μm im Kern und 200 μm in der Ringfaser aufweist.[28]

3.3.7 Trumpf Tru Disk 10001

Die Versuchsreihe mit den Parametern T4 wurden mit einem Tru Disk 10001 vom Hersteller Trumpf verschweißt. Dieser erreicht eine maximale Leistung von 10000 W und emittiert die Laserstrahlung bei einer Wellenlänge von 1020 nm. Der Laser wurde mit einem Laserlichtkabel mit einem Durchmesser von 100 μm im Kern und 400 μm in der Ringfaser verbunden.[28]

3.4 Messgeräte

Nachfolgend werden die verwendeten Messgeräte sowie andere Geräte zur Auswertung der Proben vorgestellt.

3.4.1 Messgerät für Messung des elektrischen Widerstands

Für die Messung des elektrischen Widerstands wurde ein Milliohmometer EATON-Sefelec MGR 10 Milliohmometer verwendet. Dieses Messgerät besitzt einen Messbereich von $1 \mu\Omega$ bis $30 k\Omega$ (je nach Ausführung). Der maximal auftretende Fehler bei der Messung wird mit unter 0,03 % angegeben. Der Messstrom beläuft sich auf 10 A.[33]

3.4.2 Zugversuchsprüfmaschine

Die mechanischen Belastungsprüfungen auf Zug wurden mit einer Zwick Roell Z050 durchgeführt, welche eine maximale Zugkraft von 50 kN aufbringen kann.[41]

3.4.3 Feldemissionsrasterelektronenmikroskop

Das Feldemissionsrasterelektronenmikroskop Quanta FEG 250 ist ein hochauflösendes, analytisches Mikroskop welches anhand von Sekundär- und Rückgestreuten Elektronen sowie auch mittels eines Raster- Transmissionen Modus Abbildungen generieren kann. Ausgerüstet wurde das Feldemissionsrasterelektronenmikroskop mit einem SDD Röntgendetektor, als auch mit einer schnellen Hikari EBSD Kamera für eine Struktur-analyse mittels Electron Backscatter Diffraction (EBSD) und Transmission Kikuchi Diffraction (TKD). Die betrachteten Proben können dabei im Low-Vakuum, High-Vakuum als auch im ESEM Modus (bis zu einem Innendruck von 40 mbar) betrachtet werden.[17]

Daraus ergeben sich die folgenden Anwendungsgebiete für das Quanta FEG 250:

- rasterelektronische Untersuchung mit hoher Auflösung
- Röntgenmikroanalyse der chemischen Zusammensetzung
- Untersuchungen der Probenstruktur mittels EBSD
- Betrachtung von nichtleitenden Proben im Low-Vakuum Bereich
- Betrachtung von Proben mit einer bestimmten Feuchtigkeit bei Innendrücken von bis zu 4000 Pa
- in-situ Atomic Force Microscopy (AFM)
- Pikoindenter Untersuchungen[17]

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

Die Vorversuche wurden zur Generierung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht durchgeführt. Dabei wurden viele Erkenntnisse und Erfahrungen im Hinblick auf den Umgang mit dem Faserlaser, als auch im Hinblick auf die speziellen Eigenschaften der verwendeten Materialien bei einem Laserschweißprozess gewonnen. Für die Vorversuche wurden alle Probenmaterialien und Probengrößen herangezogen, welche vorhin definiert wurden.

4.1 Schweißung einer Aluminium-Aluminium Verbindung

Dieser Abschnitt soll der raschen und effizienten Einstellung der verschiedenen Parameter bei einer Schweißverbindung von Aluminium-Aluminium mittels Faserlasers dienen. Die wichtigsten Parameter sind hierbei die Leistung, die Vorschubgeschwindigkeit, die Fokusslage, die Schutzgaszuführung sowie die Unterlage. Leistung, Vorschubgeschwindigkeit sowie Fokusslage stellen hierbei die drei Hauptparameter dar. Eine wichtige Kenngröße für den Schweißprozess ist die Streckenenergie, welche sich aus der Leistung des Lasers und der Vorschubgeschwindigkeit ergibt.

$$Ra = \frac{P}{v} \quad (4.1)$$

Dabei wird die eingebrachte Laserleistung mit P und die Vorschubgeschwindigkeit mit v angegeben.

4.1.1 Schnellübersicht

Die Abbildung 4.1 zeigt die Veränderung des äußeren Erscheinungsbilds bei einer Variation der Parameter.

4.1.2 Leistung

Die Leistung sollte bei einer Aluminium-Aluminium Verbindung nicht im mittleren Bereich gewählt werden, da Aluminium einen relativ geringen Schmelzpunkt aufweist und im flüssigen Zustand eine geringe Viskosität besitzt. Die Leistung für Bleche mit 1 mm Dicke beträgt bei EN Al-6101-T63 in etwa 850 W. Bei einer zu geringen Leistung kann es zu einer starken Oxidation und Poren an der Oberfläche kommen. Wird die Leistung zu hoch gewählt, kommt es zu einer durchhängenden Schweißnaht, beziehungsweise zu einem Trennvorgang der beiden Proben. In der nachfolgenden Tabelle 4.1 wurden die Proben mit einer Fokusslage in der Mittelebene verschweißt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei beiden Proben 20 mm/s, die Schutzgaszuführung wurde mit 10 l/Minute

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht




Probe	Leistung	Vorschub	Fokusslage
 P44	1000 W	10 mm/s	Mitte
 P49	1200 W	20 mm/s	Mitte
 P43	800 W	10 mm/s	0,5 mm oberhalb Mitte

Abbildung 4.1: Schnellübersicht Parameter Aluminium-Aluminium

gewählt. Der Fokus wurde auf die Trennfläche der beiden Aluminiumbleche gelegt. Die Probenabmessungen beliefen sich auf 58,3 mm x 60 mm x 1 mm.

Tabelle 4.1: Parameter ausgewählter Proben Aluminium-Aluminium

Probe	Leistung	Fokus	Vorschub	Schutzgas
Al-Al 1	850 W	Mitte	20 mm/s	10 l/Minute
Probe 59	850 W	Mitte	20 mm/s	10 l/Minute
Probe 55	900 W	Mitte	20 mm/s	10 l/Minute

Die Abbildung 4.2 zeigt einen Querschliff mit einer großen Pore in der Mittelebene der Schweißnaht. In der Abbildung 4.3 wird das äußere Erscheinungsbild einer Schweißnaht bei gleichen Parametern wie bei Probe 59 verwendet wurden dargestellt.

Die Probe 55, welche in Abbildung 4.4 zu sehen ist, wurde mit 50 W mehr, also mit 900 W verschweißt. Wenn die Leistung etwas erhöht wird und man in den Bereich des Durchschweißens kommt, erhält man eine verbreiterte Schweißnaht, welche „durchhängt“. Die Schweißnaht wurde dadurch wesentlich breiter und es kam zu einer Durchschweißung. Durch die geringe Viskosität des flüssigen Aluminiums kann es hier sehr leicht zu einem ungewollten Trennvorgang kommen.

4.1.3 Vorschubgeschwindigkeit

Bei einer Aluminium-Aluminium Verbindung kann die Vorschubgeschwindigkeit etwas höher gewählt werden, da die benötigte Streckenenergie nicht allzu hoch liegt. Bei einer zu geringen Leistung und Vorschubgeschwindigkeit kommt es zu einer Verdampfung des Aluminiums und zu einer starken Oxidation an der Oberfläche. Die nachfolgenden Proben wurden mit einer Fokusslage in der Mitte der Schweißpartner sowie mit 19 l/Minute an Schutzgas bei einer Probendicke von 1,5 mm miteinander verschweißt.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

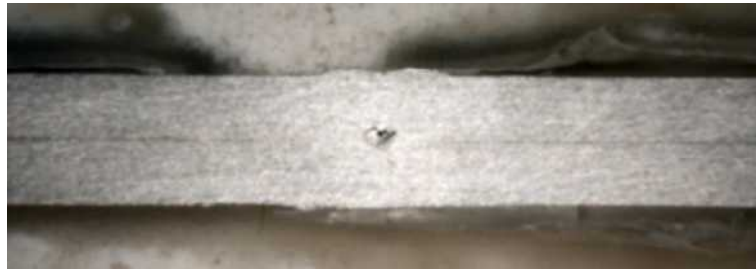


Abbildung 4.2: Probe 59 anhand eines Querschliffes, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm



Abbildung 4.3: Al-Al 1 Darstellung der äußeren Erscheinung der Schweißnaht, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm



Abbildung 4.4: Probe 55 mit durchgeschweißter Schweißnaht, Leistung: 900 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.5: Probe 44 Aluminium-Aluminium, Leistung: 1000 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokuslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

Probe 44, welche in Abbildung 4.5 dargestellt ist, zeigt eine dunkle Oberfläche mit verbranntem Magnesium. Durch die hohe Leistung und die geringe Vorschubgeschwindigkeit weist diese Probe vermehrt Spritzer an der Oberfläche auf, da es zu Auswürfen aus dem Material kommt.



Abbildung 4.6: Probe 49 Aluminium-Aluminium, Leistung: 1200 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokuslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

Bei der Probe 49 in Abbildung 4.6 wurde die Leistung im Vergleich zu Probe 44 zwar erhöht, jedoch wurde auch die Vorschubgeschwindigkeit verdoppelt.

4.1.4 Fokus

Die Lage des Fokus ist im Hinblick auf die Oxidation und die Verdampfung des Aluminiums an der Oberfläche von besonderer Bedeutung. Die Fokuslage sollte bevorzugt in der Mitte der zu verschweißenden Proben liegen. Die nachfolgenden Proben wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s und 20 mm/s bei einer Schutzgaszuführung von 19 l/Minute miteinander verschweißt.

Die Fokuslage bei Probe 43 in Abbildung 4.7 wurde mit 1 mm unterhalb der Oberfläche gewählt und liegt somit 0,5 mm oberhalb der Mittelebene. Die Leistung belief sich hierbei bei 800 W, mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s. Diese Schweißnaht zeigt eine starke Verbrennung von Magnesium an der Oberfläche mit großen Auswürfen von Aluminium.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.7: Probe 43 Aluminium-Aluminium, Leistung: 800 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokuslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

Probe 44, welche in Abbildung 4.5 dargestellt, wurde mit einer Fokuslage in der Mittelebene verschweißt, mit einer Leistung von 1000 W. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde hierfür mit 20 mm/s gewählt. Diese Schweißnaht zeigt eine deutliche optische Verbesserung der Schweißnaht im Hinblick auf die Verbrennung von Magnesium an der Oberfläche, welche bei Probe 43 (Abbildung 4.7) stärker ausgeprägt ist.

4.1.5 Schutzgaszuführung

Bei einer flachen Schutzgaszuführung von etwa 25 Grad erscheint die Schweißnaht optisch homogener als bei einer steileren Zuführung. Es ergeben sich dabei auch weniger Spritzer während des Schweißvorgangs. Jedoch kann es am Ende der Schweißnaht bei einer sehr flachen Schutzgaszuführung zu einer ausgeprägten Mulde kommen. Der Schutzgasstrom lag bei diesen Versuchen mit der gedachten Verlängerung auf dem Schnittpunkt mit dem Fokuspunkt mit einer relativ kurzen freien Strömung. Die Versuche zeigten einen optimalen Schutzgaszustrom von 10 l/Minute bei einer flachen Zuführung.

Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen den ungefähren Winkel der Schutzgaszuführung, welche durch eine Kupferlanze realisiert wurde. Dabei zeigte sich eine optimale Schutzgaszuführung bei einem Winkel von ungefähr 25 Grad. Die Verwendung von Helium anstatt von Argon lieferte keine nennenswerten Verbesserung der Schweißnaht im Hinblick auf Oxidation und Stabilität des Schweißprozesses.

4.1.6 Schweißunterlage

Als Unterlage für die ersten Versuche diente eine Stahlunterlage. Bei den restlichen Versuchen wurde eine Aluminiumunterlage verwendet. Bei einigen Schweißversuchen wurde eine Teflon Unterlage herangezogen, um die Wärmeabfuhr nach unten über die Probenaufnahme zu unterbinden. Die Motivation für das Verwenden einer Teflonunterlage war eine Stabilisierung des Schweißprozesses. Wie bereits erwähnt wurde, ergibt sich durch eine höhere Temperatur der Proben auch ein höherer Absorptionsgrad der Laserstrahlung[39], dies führt in weiterer Folge zu einer Verminderung der benötigten Laserleistung. Eine Verwendung von Teflon als Schweißunterlage erwies sich jedoch als nicht geeignet, da sich die Wärmeverteilung über die Schweißnahtlänge inhomogener ausprägte.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

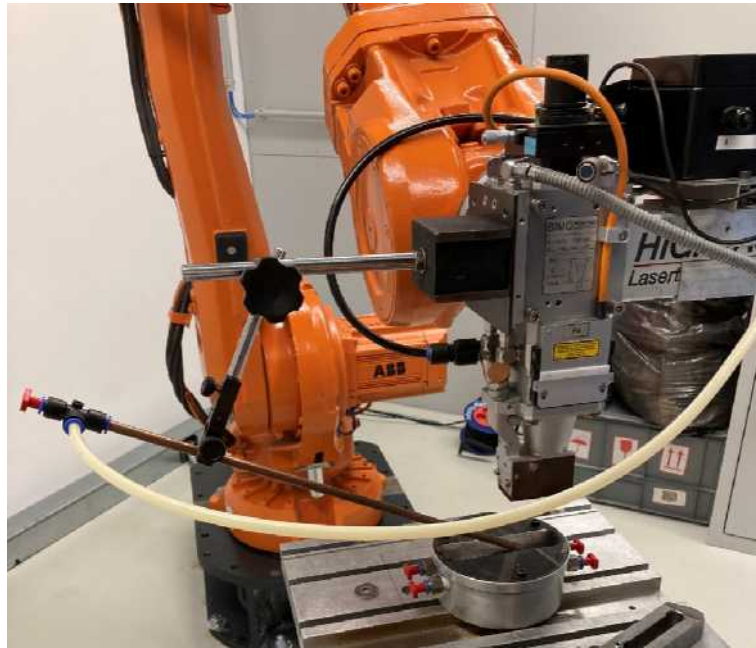


Abbildung 4.8: Schutzgaszuführung Großaufnahme



Abbildung 4.9: Schutzgaszuführung Nahaufnahme

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

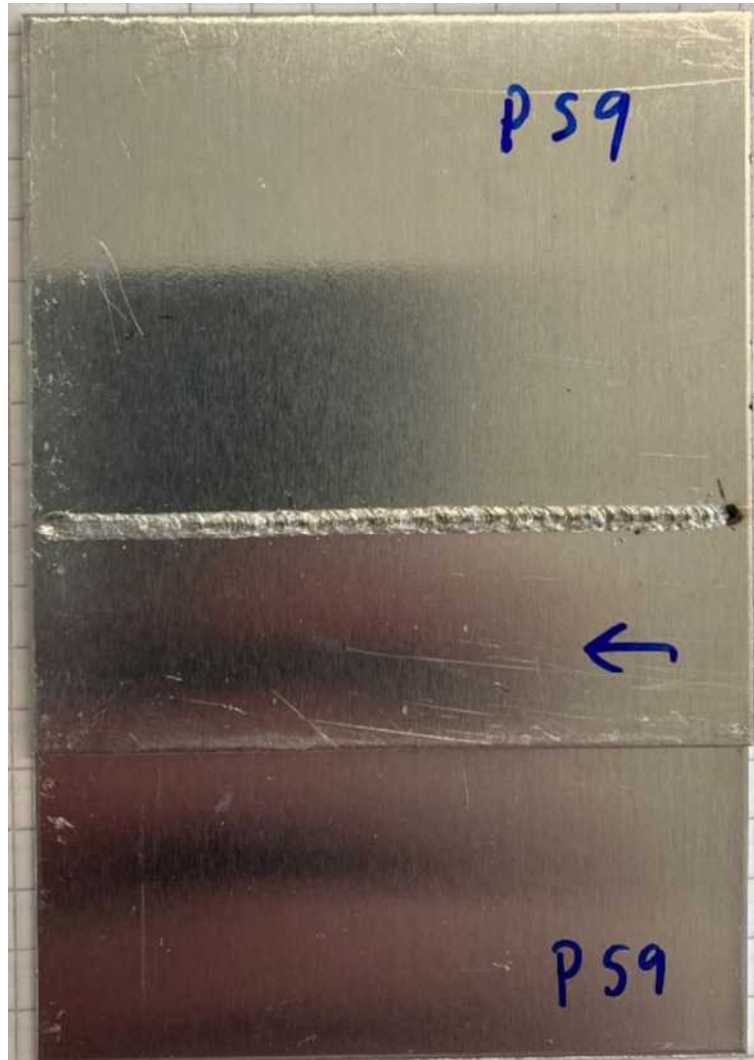


Abbildung 4.10: Schweißnahtoberseite der Probe 59, welche auf einer Aluminiumunterlage geschweißt wurde, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

Bei Probe 59, welche in Abbildung 4.10 abgebildet ist wurde keine Teflon Unterlage bei einer Einspannung aus Aluminium verwendet. Die Schweißnaht zeigt eine konstante Schweißnahtbreite auf, mit einem deutlichem Anfang der Lasereinstrahlung.



Abbildung 4.11: Schweißnahtoberseite der Probe 60, welche auf einer Teflonunterlage geschweißt wurde, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokuslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 4.11 zeigt die Probe 60 bei der eine Teflon Unterlage mit einer Einspannung aus Aluminium verwendet wurde. Diese Schweißnaht zeigt ebenfalls einen konstanten Verlauf der Schweißnahtbreite.

Eine Teflon Unterlage führt vor allem zur Verbesserung am Anfang der Schweißnaht. Der Einstich des Lasers ist mit einer Teflon Unterlage weniger bis kaum ausgeprägt im

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

Vergleich zu Versuchen bei denen keine Teflon Unterlage verwendet wurde.



Abbildung 4.12: Schweißnahtoberseite der Probe 50, welche auf einer Stahlunterlage geschweißt wurde, Leistung: 900 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 4.13 zeigt Probe 55, welche mittels einer Aluminium-Probenaufnahme verschweißt wurde.

Die beiden dargestellten Proben 50 (*Abbildung 4.12*) und 55 (*Abbildung 4.13*) wurden ansonst mit den gleichen Parametern verschweißt. Die Fokusslage wurde bei beiden Proben in der Mitteleben gewählt, bei einer Leistung von 900 W. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde mit 20 mm/s gewählt, bei einer Schutzgaszuführung von 10 l/Minute. Es wird eindrücklich veranschaulicht welchen Einfluss die thermische Leitfähigkeit der Probenaufnahme auf die Schweißnaht hat. Bei einer guten thermischen Leitfähigkeit wird viel Wärme durch die Probe in die Probenaufnahme abgeführt, dies führt zu einer verstärkten Wärmeausbreitung in der Probe.

4.1.7 Anschleifen der Proben

Durch ein Anschleifen der Kontaktflächen der beiden Aluminiumproben kann eine Verbesserung der Oxidation der Schweißnaht hervorgerufen werden. Durch die Abtragung der oberen Oxidschicht wird beim Schweißprozess eine dünnere Oxidschicht an der Oberfläche gebildet. Außerdem schmilzt die Oxidschicht erst bei höheren Temperaturen[13], ein Abtragen der Oxidschicht führt somit zu einer Stabilisierung des Keyholes während des Schweißvorgangs. Dies ist aufgrund der Tatsache, dass man durch anschleifen der Proben bereits vorab einen wesentlichen Betrag an Sauerstoffatomen aus der Schweißzone beseitigen kann. Die Schweißnaht zeigt viel weniger Verfärbungen an der Oberfläche. Es entstehen bei einer vorhergehenden Abschleifung der Kontaktflächen auch weniger

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.13: Schweißnahtoberseite der Probe 55, welche auf einer Aluminiumunterlage geschweißt wurde, Leistung: 900 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Spritzer an der Probenoberfläche.

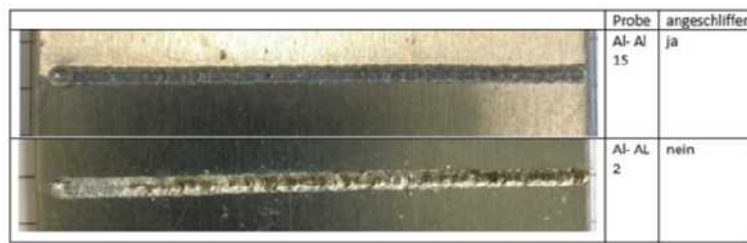


Abbildung 4.14: Al-Al 15 angeschliffen und Al-Al 2 nicht angeschliffen, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 4.14 zeigt die Probe Al-Al 15, welche vor dem Schweißprozess mit Schleifpapier der Körnung 1000 an den Kontaktflächen angeschliffen wurde. Somit wurde der Absorptionsgrad der eingebrachten Laserstrahlung nicht verändert. Dafür wurde eine Leistung von 850 W bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/s und einer Fokusslage in der Mittelebene verwendet. Die Schutzgaszuführung belief sich auf 10 l/Minute.

Im Vergleich dazu ist darunter die Probe Al-Al 2 dargestellt, welche mit gleichen Parametern verschweißt wurde, jedoch wurde hierbei auf eine oberflächliche Abtragung der Oxidschicht mithilfe eines Schleifpapiers mit der Körnung 1000 verzichtet. Allgemein erscheint die Schweißnaht konstanter, mit weniger Spritzern und geringerer Oxidation.

Die Einschweißtiefe sowie die Schweißnahtbreite bleiben bei einer Abschleifung der Oxidschicht in etwa gleich im Vergleich zu den Proben ohne einer Abschleifung der Oxidschicht.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

4.1.8 Chargen des Materials

Die einzelnen Chargen der Aluminiumproben können zu Problemen beim Schweißvorgang führen und somit eine Adaptierung der Parameter erzwingen. Bei dieser Versuchsreihe wurden Produktionsreste verwendet, welche aus verschiedenen Chargen stammten. Dabei kam es teilweise zu Problemen beim Schweißvorgang. Daher ist es ratsam eine größere Menge aus einer Charge anzuschaffen, um Probleme vorzubeugen.

4.2 Schweißung einer Aluminium-Kupfer Verbindung

Dieser Abschnitt soll der raschen und effizienten Einstellung der verschiedenen Parameter bei einer Schweißverbindung von Aluminium-Kupfer mittels eines Faserlasers dienen. Die wichtigsten Parameter sind hierbei die Leistung, die Vorschubgeschwindigkeit, die Fokusslage sowie die Schutzgaszuführung. Leistung, Vorschubgeschwindigkeit sowie Fokusslage stellen hierbei die drei Hauptparameter dar. Die Probenabmessungen betragen: 58 mm x 20 mm x 1,5 mm. Bei den verwendeten Materialien handelt es sich hierbei um AlMg3 und Cu-ETP/CW004A.

Eine wichtige Kenngröße hierfür ist die Streckenenergie, welche mittels Leistung und Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst werden kann.

4.2.1 Leistung

Die Leistung spielt bei der Schweißung eine zentrale Rolle. Mit zunehmender Leistung steigt die Einschweißtiefe und die Schweißnahtbreite. In der nachfolgenden Tabelle 4.2 wurden die Proben mit einer Fokusslage in der Mittelebene verschweißt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei beiden Proben 10 mm/s, die Schutzgaszuführung wurde mit 19 l/Minute gewählt.

Tabelle 4.2: Resultierende Einschweißstiefen und Schweißnahtbreiten bei unterschiedlichen Laserleistungen

Probe	Leistung	Einschweißtiefe	Schweißnahtbreite
21	1300 W	0,68 mm	2,56 mm
27	1500 W	1,12 mm	2,78 mm

In Abbildung 4.15 wird der Einfluss der eingebrachten Laserleistung veranschaulicht. Dabei zeigt sich bei einer Steigerung der Laserleistung eine höhere Einschweißtiefe. Weiters zeigt diese Abbildung eine Aufschmelzung des Kupfers nur im Bereich des Keyholes, wohingegen der Aluminiumwerkstoff wesentlich breiter aufgeschmolzen wird.

4.2.2 Vorschubgeschwindigkeit

Bei einer Schweißung von Aluminium-Kupfer sollte auf eine geringe Vorschubgeschwindigkeit geachtet werden, da hier eine hohe Streckenenergie benötigt wird. Das allgemeine

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.15: Querschliffe der Probe 21 und der Probe 27, Leistung: 1300 W/ 1500 W, Vorschub: 00 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

Erscheinungsbild der Schweißnaht wird durch eine geringe Vorschubgeschwindigkeit verbessert. Außerdem sollte die Porenbildung bei einer geringen Vorschubgeschwindigkeit verbessert werden, da die Poren mehr Zeit zum Aufsteigen haben. Die Schweißnaht wird durch die erhöhte Energieeinbringung etwas breiter, dies lässt sich jedoch nur schwer verhindern, da man dies aufgrund einer akzeptablen Einschweißtiefe in Kauf nehmen muss.

Die Proben 21 und 24 wurden mit einer gleichen Leistung von 1300W geschweißt, die Schutzgaszufuhr betrug dabei 19 l/Minute. Der Fokus wurde auf die Mittelebene der beiden Proben gelegt.



Abbildung 4.16: Probe 24 Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

Probe 24 (Abbildung 4.16) wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/s verschweißt, wohingegen Probe 21 (Abbildung 4.17) mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s verschweißt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass Probe 21 ein wesentlich breiteres Schweißbad im Aluminiumbereich aufweist, dies ist aufgrund der weit höheren eingebrachten Streckenenergie. Ein breites Schmelzbad im Aluminiumbereich ist zwar aufgrund einiger Nachteile (*Härteabfall*, *Magnesiumschwund*, ..) nicht erwünscht, jedoch ist dieses kaum zu vermeiden, da Kupfer einen deutlich höheren Schmelzpunkt aufweist und man für eine qualitativ hochwertige Verbindung eine bestimmte Mindesteinschweißtiefe benötigt. Die geometrischen Unterschiede dieser beiden Schweißnähte

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.17: Probe 21 Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

wird in Abbildung 4.18 nochmal verdeutlicht.

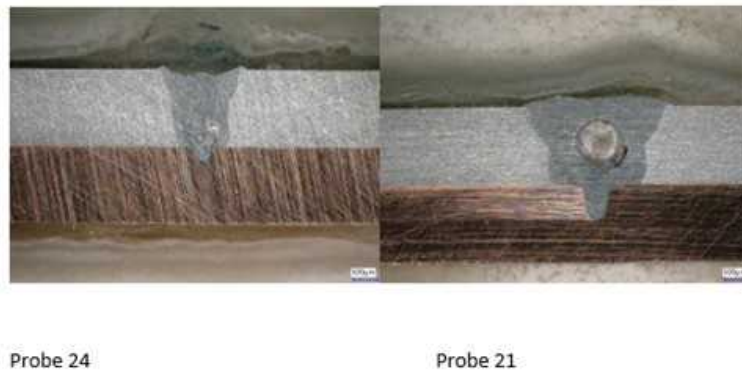


Abbildung 4.18: Querschliffe der Probe 24 und der Probe 21, Leistung: 1300 W, Vorschub: 10 mm/s/ 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

4.2.3 Fokus

Bei dieser Versuchsreihe wurde als Schutzgas Argon gewählt. Der Fokus sollte auf der Mittelebene der zu verschweißenden Bauteile liegen, oder zumindest in der Nähe dieser. Bei einer zu tiefen Fokusslage kann es zu Problemen beim Einkoppeln des Lasers kommen, da hierbei die Leistungsdichte zu niedrig ausfallen kann. Weiters kann es bei Aluminiumlegierungen mit Magnesium zur Verbrennung von Magnesium kommen wenn die Fokusslage deutlich im Aluminiumgebiet liegt. Dies wird durch eine sehr hohe Leistung im Aluminiumbereich hervorgerufen. Somit ist die Wahl der Fokusslage um die Mittelebene anzustreben.

Die nachfolgenden Proben wurden mit einer Leistung von 1300 W verschweißt, mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s und einer Schutzgaszufuhr von 19 l/Minute.

Die dargestellten Abbildungen 4.20 und 4.21 zeigen, dass eine Wahl der Fokusslage in der Nähe der Mittelebene eine qualitativ hochwertige Schweißnaht ergibt. Dies ist auch auf den kegelförmigen Laserstrahl zurückzuführen, welcher in der Fokusebene die höchste

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.19: Fokuslage liegt 1mm oberhalb der Mittelebene Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokuslage: 1 oberhalb der Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm



Abbildung 4.20: Fokuslage liegt in der Mittelebene Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokuslage: Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm



Abbildung 4.21: Fokuslage liegt 0,5mm unterhalb der Mittelebene Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokuslage: 0,5 unterhalb der Mitte, Schutzgas: 19 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

Leistung entlang des Laserstrahls in das Material einbringt. Durch die notwendige hohe Leistung bei dieser Verbindung kommt es bei einer Fokusslage im Aluminiumbereich zu einer verstärkten Verbrennung von Magnesium, welches sich in der Aluminiumlegierung befindet. Daher sollte der Fokuspunkt in die Mittelebene der Verbindung gelegt werden, um auch eine hohe Leistung in den Bereich des Kupfers einbringen zu können. Die Schweißnaht in Abbildung 4.19 weist eine starke Verbrennung von Magnesium auf und zeigt, dass die größte Leistung des Laserstrahls im Bereich des Aluminiums eingebracht wird.

4.2.4 Schutzgaszuführung

Bei einer flachen Schutzgaszuführung von etwa 25 Grad wie in Abbildung 4.8, erscheint die Schweißnaht optisch besser als bei einer steileren Zuführung. Es ergeben sich dabei auch weniger Spritzer während des Schweißvorgangs. Jedoch kann es am Ende der Schweißnaht bei einer sehr flachen Schutzgaszuführung zu einer ausgeprägten Mulde kommen. Die Menge der Schutzgaszuführung spielt ebenso eine wichtige Rolle beim Schweißprozess. So konnten bei einer sehr geringen Schutzgaszuführung von 5 l/Minute Risse am Ende der Schweißnaht festgestellt werden. Eine sehr hohe Schutzgaszuführung von über 20 l/Minute kann aufgrund der Viskositätseigenschaften von Aluminium zu „Verwehungen“ in der Schweißnaht führen.

Der Schutzgasstrom wurde bei diesen Versuchen ungefähr auf den Fokuspunkt gelenkt, mit einer kurzen freien Strömung.

Die Abbildung 4.9 zeigt den ungefähren Winkel von 25 Grad der Schutzgaszuführung bei einer flachen Zuführung.

4.2.5 Schweißunterlage

Bei manchen Schweißversuchen wurde eine Teflon Unterlage verwendet, um eine homogenere Schweißnaht gewährleisten zu können. Bei den restlichen Versuchen wurde entweder eine Stahlunterlage für die Vorversuche und eine Aluminiumunterlage für die ausgewerteten Proben während des Schweißprozesses verwendet. Somit konnte die Auswirkung der abgeführten Wärme während des Schweißprozesses berücksichtigt werden. Dabei wurden anhand dieser drei Möglichkeiten als Schweißunterlage die Fälle einer sehr guten Wärmeabfuhr (*Aluminium*), einer guten Wärmeabfuhr (*Stahl*) und einer nahezu Isolation (*Teflon*) der Proben mittels der Probeneinspannung realisiert.

Bei Verwendung einer Teflon Unterlage wie in Abbildung 4.23 gezeigt, führt diese zu einer homogenen Schweißnaht im mittleren Bereich der Schweißnaht, bezogen auf die Schweißnahtbreite über der Länge. Die Schweißnaht kann sich schneller einstellen als bei Versuchen bei denen keine Teflon Unterlage (*Abbildung 4.22*) verwendet wurde. Das Ende der Schweißnaht wird aufgrund der höheren Wärmeentwicklung in Bezug auf die Schweißnahtbreite stärker ausgeprägt. Am Schlussstück der Schweißnaht wird das größere Schmelzbad aufgrund der höheren Temperatur durch Ausbildung eines größeren Kraters sichtbar. Ohne Teflon Unterlage bildet sich die größte Schweißnahtbreite zirka in der Probenmitte, mit einer Teflon Unterlage verlagert sich die größte

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

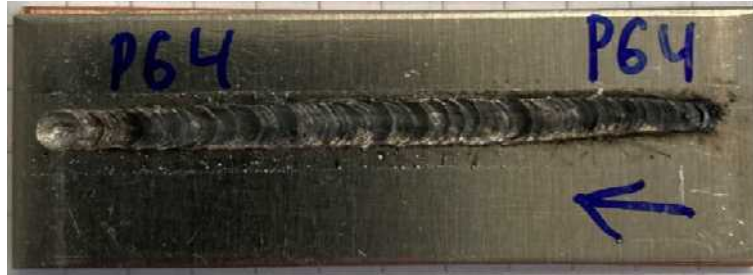


Abbildung 4.22: Probe 64 Aluminium-Kupfer auf Stahlunterlage verschweißt, Leistung: 1200 W, Vorschub: 15 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

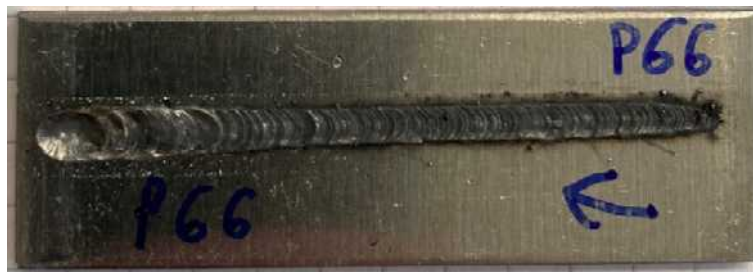


Abbildung 4.23: Probe 66 Aluminium-Kupfer auf Teflonunterlage in einer Stahleinspannung verschweißt, Leistung: 1200 W, Vorschub: 15 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

Schweißnahtbreite an das Ende der Schweißnaht. Vor allem bei der Aluminium-Kupfer Verbindung wird durch die hohe Leistung bei einer Isolation mithilfe einer Teflonunterlage die Wärmeabfuhr in die seitlichen Bereiche der Proben deutlich sichtbar. Dies gibt jedoch auch den intermetallischen Phasen einen größeren Zeitraum für das Wachstum. Der Vergleich zeigte somit, dass es bei einer Isolation der Wärme in die Probeneinspannung bei einer längeren Schweißstrecke zu einer Überhitzung der Proben führen kann, welche sich in einer zunehmenden Schweißnahtbreite und somit auch in einer zunehmenden Wärmeeinflusszone zeigt. Somit sollte eine nicht notwendige Verbreiterung der Schweißnaht vermeiden werden. Diese Versuche wurden mit dem Ziel, eine homogene Schweißnaht im Hinblick auf die Schweißnahtbreite als auch auf die Einschweißtiefe zu erzeugen durchgeführt, ebenso war eine Stabilisierung des Schweißprozesses eine Motivation für die Variation der Schweißunterlage.

4.2.6 Porenbildung

Die Porenbildung wurde durch die computertomographischen Untersuchungen und den lichtmikroskopischen Untersuchungen mittels eines Querschliffs der Schweißnaht betrachtet. Dabei zeigte sich, dass große Poren vermehrt im oberen Bereich der Schweißnaht auftreten, wohingegen kleinere Poren sich vermehrt im unteren Bereich der Schweißnaht befinden.

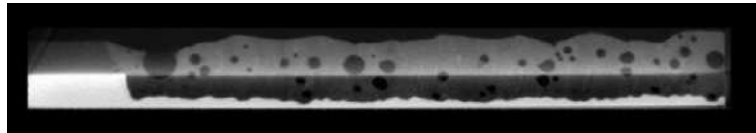


Abbildung 4.24: CT Aufnahme Längsschliff Probe 26 Aluminium-Kupfer, Leistung: 1500 W, Fokus 0,5 mm im Aluminiumbereich, Schutzgas: 19 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s

Die Probe 26 in Abbildung 4.24 zeigt das Ende der Schweißnaht, der rechte Teil der Probe wurde für einen Querschliff herangezogen. Dabei kann eine hohe Porendichte entlang der Schweißnaht beobachtet werden, die Poren sind entlang der Schweißnaht in etwa gleich verteilt. Die größeren Poren befinden sich gehäuft im oberen Bereich der Schweißnaht.

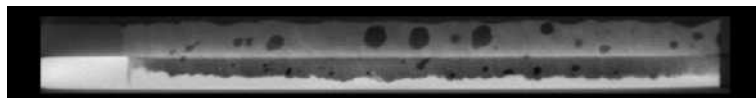


Abbildung 4.25: CT Aufnahme Längsschliff Probe 27 Aluminium-Kupfer, Leistung: 1500 W, Fokus auf Mittelebene, Schutzgas: 19 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s

Die Abbildung 4.25 zeigt den Anfang der Schweißnaht von Probe 27, der rechte Teil der Probe wurde für einen Querschliff herangezogen. Hierbei kann man sehr deutlich

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

den Beginn der Schweißnaht erkennen. Auch hier ist die Porendichte in etwa konstant verteilt und die größeren Poren befinden sich wieder im oberen Bereich der Schweißnaht.

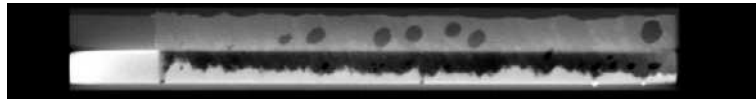


Abbildung 4.26: CT Aufnahme Längsschliff Probe 28 Aluminium-Kupfer, Leistung: 1500 W, Fokus 0,5 mm im Kupferbereich, Schutzgas: 19 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s

In Abbildung 4.26 wird eine CT Aufnahme von Probe 28 dargestellt, der rechte Teil der Probe wurde für einen Querschliff herangezogen. Auch hier zeigt sich eine konstante Porenverteilung und eine Anhäufung der größeren Poren im oberen Bereich. Außerdem ist hier die Variation der Einschweißtiefe deutlich zu erkennen, welche durch ein instabiles Keyhole verursacht wird.

Der Anfang und das Ende der Schweißnaht zeigen eine erhöhte Einschweißtiefe auf. Diese kommt dadurch zustande, dass der verwendete Roboter beschleunigen oder abbremsen muss und der Laser im Grunde augenblicklich eingeschaltet wird und somit eine kurze Haltedauer erzeugt wird.

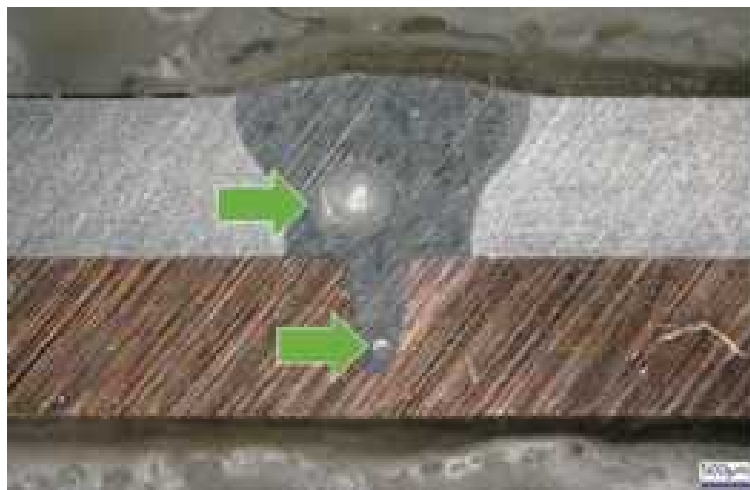


Abbildung 4.27: Probe 27 Querschliff Poren Aluminium-Kupfer, Leistung: 1500 W, Vorschub: 15 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm

Bei Probe 27 in Abbildung 4.27 kann man deutlich eine kleine Pore im Bereich der Schweißnahtwurzel erkennen sowie eine große Pore im oberen Bereich der Schweißnaht.

Probe 33 in Abbildung 4.28 verdeutlicht nochmals den Effekt der Porenbildung bei einem Kollaps des Key Holes. Hier ist auch eine Wölbung der Schweißnaht nach unten zu sehen, welche durch den hohen Schutzgasstrom von 30 l/Minute verursacht wurde.

Abbildung 4.29 zeigt eine längliche Pore, welche hier auf beiden Seiten auftritt. Die

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.28: Probe 33 Querschliff Poren Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Vorschub: 10 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 30 l/Minute, Blechstärke: 1,5 mm



Abbildung 4.29: Probe 93 mit länglicher Pore, Leistung: 1200 W, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

Probe wurde näher untersucht und es wurde festgestellt, dass die Pore fast durchgängig über die gesamte Schweißnahtlänge auftritt. Der Versuch wurde zweimal mit den selben Parametern wiederholt und die Pore konnte zumindest immer auf einer Seite reproduziert werden.



Abbildung 4.30: Probe 93 Nahtoberseite, Leistung: 1200 W, Vorschub: 5 mm/s, Fokussierung: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Nahtoberseite von Probe 93 (*Abbildung 4.30*) zeigt eine deutliche Verbreiterung der Schweißnaht im Vergleich zu den anderen durchgeführten Versuchen. Die Parameter beliefen sich dabei auf eine Leistung von 1200 W, eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/s, eine Schutzgaszuführung von Argon mit 10 l/Minute sowie einer Fokussierung auf die Zwischenebene der beiden Bleche. Für diesen Versuch wurden die 60 mm x 58,3 mm x 1 mm Bleche verwendet.

4.2.7 Aluminiumaustritt

Ein Austritt von Aluminium an der Rückseite sollte stets vermieden werden, da das Aluminium im flüssigen Zustand eine geringe Viskosität aufweist und in weiterer Folge zu einem Einfall der Schweißnaht führt.



Abbildung 4.31: Probe 35 Aluminiumaustritt Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Fokus auf Mittelebene, Schutzgas: 7 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s, Blechstärke: 1,5 mm

Der Aluminiumaustritt bei Probe 35 in *Abbildung 4.31* verdeutlicht die geringe Viskosität von Aluminium im flüssigen Zustand. Dieser ist wie in der *Abbildung* zu sehen erst am Ende der Schweißnaht aufgetreten, in diesem Bereich herrscht während des Schweißprozesses eine hohe Temperatur, dies führt zu einem durchdringen des Aluminiums durch den Kupferwerkstoff.

In der *Abbildung 4.32* sieht man deutlich den Einfall der Schweißnaht bei einem Austritt des Aluminiums durch die Unterseite.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

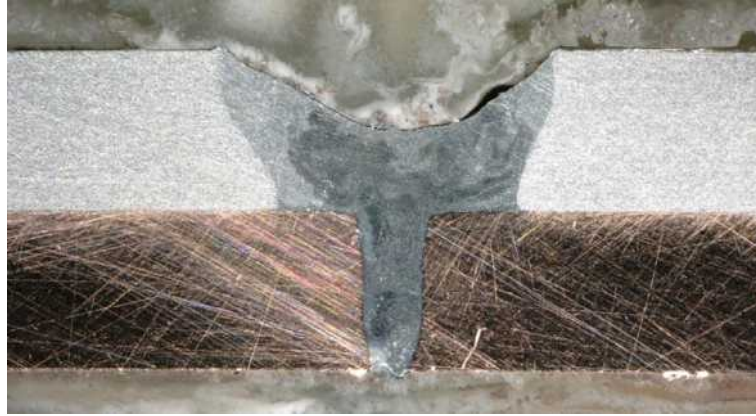


Abbildung 4.32: Probe 35 Querschliff Aluminiumaustritt Aluminium-Kupfer, Leistung: 1300 W, Fokus auf Mittelebene, Schutzgas: 7 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s, Blechstärke: 1,5 mm

4.2.8 Verwendung einer Leistungsrampe

Eine Verwendung einer Leistungsrampe bei einer Aluminium-Kupfer Schweißung wird als sinnvoll erachtet, vor allem wenn die Proben eine etwas längere Schweißnaht aufweisen sollen. Die Verwendung einer Rampe bei der Leistung führt zu einer gleichmäßigeren Schweißnaht, eine immer breiter werdende Schweißnaht mit fortschreitender Schweißnahtlänge wird somit verhindert. Das Ende der Schweißnaht wird hierbei auch wieder breiter, dies liegt daran, dass am Ende die Wärme nicht mehr so stark in das Material abfließen kann und es somit zu einer Aufstauung der Wärme kommt. Die Einschweißtiefe bleibt bei Verwendung einer Leistungsrampe in etwa konstant, wenn das äußere Erscheinungsbild in etwa gleichbleibt.



Abbildung 4.33: Probe 83 Nahtoberseite Aluminium-Kupfer, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Fokus auf Mittelebene, Schutzgas: 15 l/Minute, Vorschub: 5 mm/s, Blechstärke: 1 mm

Die hier gezeigte Abbildung 4.33 veranschaulicht die Probe 83, welche mit einer abnehmenden Leistung von 15 Prozent über die Schweißnahtlänge verschweißt wurde. Die Leistung am Anfang betrug 1000 W, somit ergibt sich eine Leistung am Schweißnahtende von 850 W. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 5 mm/s, bei einer Fokusslage in der Mitte der beiden Proben. Die Schutzgaszuführung wurde mit 15 l/Minute bei einer Verwendung von Argon gewählt.

Die Abbildung 4.34 veranschaulicht Probe 83 gegen Ende der Schweißnaht. Dabei sind

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht



Abbildung 4.34: Probe 83 Querschliff Aluminium-Kupfer-1, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Fokus auf Mittelebene, Schutzgas: 15 l/Minute, Vorschub: 5 mm/s, Blechstärke: 1 mm

vermehrt Poren im oberen Bereich der Schweißnaht sichtbar, welche einen kleinen bis mittleren Durchmesser aufweisen. Zu erkennen ist ebenfalls ein Verbinden der kleinen Poren zu größeren Poren. Die Anordnung und das Verbinden der Poren kann auf die höhere Temperatur gegen Ende der Schweißnaht zurückgeführt werden, da die Poren in diesem Bereich eine längere Zeit für den vertikalen Aufstieg im Schmelzbad haben als am Anfang der Schweißnaht. Es sind auch kleinere Poren im unteren Bereich der Schweißnaht sichtbar, welche auf ein Kollabieren des Keyholes schließen lassen.

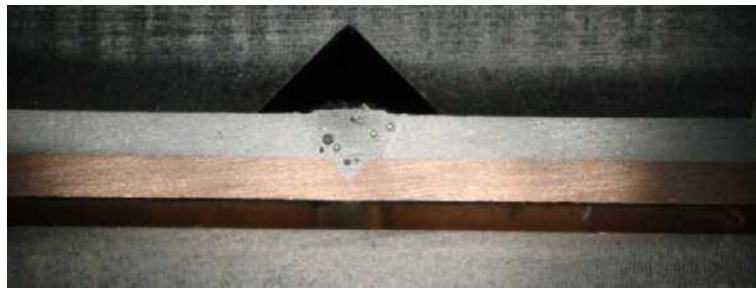


Abbildung 4.35: Probe 83 Querschliff Aluminium-Kupfer-2, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Fokus auf Mittelebene, Schutzgas: 15 l/Minute, Vorschub: 5 mm/s, Blechstärke: 1 mm

In Abbildung 4.35 ist die Probe 83 in etwa der Mitte der Schweißnaht dargestellt. Hier sind einige kleine bis mittlere Poren sichtbar, welche sich hauptsächlich im oberen Bereich der Schweißnaht befinden. Es sind jedoch auch kleine Poren im unteren Bereich der Schweißnaht zu erkennen. Im mittleren Bereich der Schweißnaht kann ein Verbinden der Poren nicht erkannt werden. Die Einschweißtiefe ist im Vergleich zum Ende der Schweißnaht geringer, dies ist auch ohne eine genauere Vermessung der Schweißnaht zu erkennen. Die Anzahl der Poren erscheint im Vergleich zu 4.34 geringer, dies ist jedoch nur zufälliger Natur, da ein Querschliff nur wenig Aussagekraft zur Porenanzahl besitzt.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

4.2.9 Beginn und Ende der Schweißnaht

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden der Roboter und der Laser so programmiert, dass sich der Laser an einem gewissen Punkt einschaltet und darauf beschleunigt der Roboter auf die gewählte Verfahrensgeschwindigkeit. Am Ende der Schweißnaht bremst der Roboter bis zum Stillstand ab und erst danach wird der Laserstrahl ausgeschaltet.

Durch diese Gegebenheiten kommt es zu einer verstärkten Ausprägung der Einschweißtiefe am Anfang und am Ende der Schweißnaht. Am Anfang muss sich die Schweißnaht erst stabilisieren, dies ist in der nachfolgenden Abbildung 4.36 gut erkennbar. Die Stabilisierungsphase kann ungefähr mit der zwei bis dreifachen Blechstärke abgeschätzt werden.

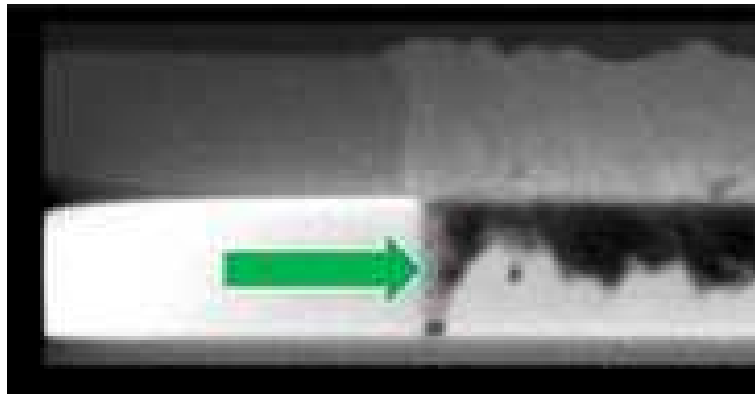


Abbildung 4.36: Anfang einer Schweißnaht Aluminium-Kupfer, Leistung: 1500 W, Fokus: 0,5 mm im Kupferbereich, Schutzgas: 19 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s

Die Abbildung 4.36 zeigt den Anfang einer Schweißnaht, dabei kann man erkennen, dass der Laserstrahl bis an die untere Oberfläche des unteren Kupferbelchs gelangt. Dies entsteht durch das Einschalten der Laserstrahlung, auf die der Beschleunigungsvorgang des Roboters folgt. Eine gewisse Leistung am Beginn der Schweißnaht ist jedoch notwendig, damit der Laser einkoppeln kann.

In Abbildung 4.37 wird ein Ende einer Schweißnaht veranschaulicht, bei welcher man eine erhöhte Einschweißtiefe erkennen kann. Diese tritt aufgrund des Abbremsprozesses des Roboters auf, bei welchem die Leistung nicht angepasst wurde. Dieser Effekt lässt sich jedoch mittels einer Leistungsrampe am Ende der Schweißnaht reduzieren.

4.2.10 Chargen

Der Einfluss der unterschiedlichen Chargen wurde bereits bei den Aluminium-Aluminium Verbindungen behandelt.

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

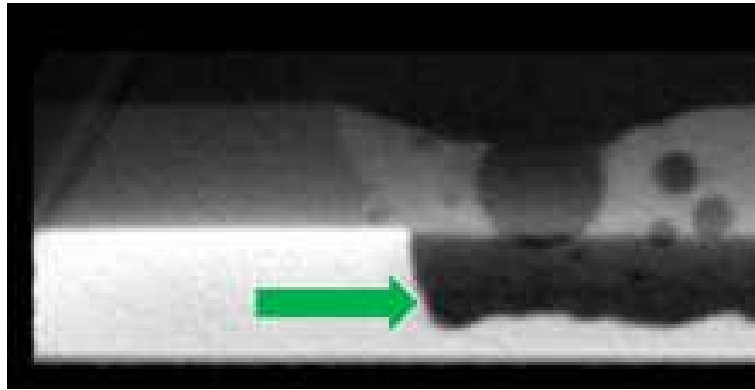


Abbildung 4.37: Ende einer Schweißnaht Aluminium-Kupfer Probe 26, Leistung: 1500 W, Fokus: 0,5 mm im Aluminiumbereich, Schutzgas: 19 l/Minute, Vorschub: 10 mm/s

4.3 Erkenntnisse aus den Vorversuchen

Da für beide Materialpaarungen, für welche Vorversuche durchgeführt wurden, Aluminium immer an der Oberseite positioniert wurde, ergeben sich einige Überschneidungen dieser beiden Konfigurationen hinsichtlich der geeigneten Parameter. Als erstes ist hier die Schutzgaszuführung zu nennen, diese sollte unter einem Winkel von ungefähr 25 Grad zugeführt werden. Bei einer steilen Schutzgaszuführung kann es zu „Verwehungen“ des Aluminiums kommen, da dieses eine geringe Viskosität im flüssigen Zustand aufweist. Weiters zeigte sich, dass für beide Materialpaarungen Argon als Schutzgas ausreichend ist und ein Einsatz von Helium zu keiner nennenswerten Verbesserung der Schweißnaht, beziehungsweise des Schweißprozesses geführt hat. Die Fokusslage stellte sich bei beiden Anordnungen in der Mittelebene der zu verschweißenden Bleche als optimal heraus, vor allem bei einer Aluminium-Kupfer Anordnung, bei welcher eine hohe Leistung in das Kupferblech eingebracht werden muss. Bei einer Fokusslage auf der Oberfläche des oberen Blechs kommt es zur Verbrennung von Magnesium und zur teilweisen Verdampfung des Grundmaterials. Die Laserleistung des Laserstrahls wird bei einer Aluminium-Kupfer Anordnung deutlich höher gelegt, da Kupfer einen höheren Schmelzbereich als Aluminium aufweist. Außerdem benötigt man eine gewisse Mindestleistung, um die Ausbildung eines stabilen Keyholes gewährleisten zu können. Bei der Aluminium-Kupfer Anordnung stellte sich eine Leistungsrampe als notwendig heraus, da die hohe thermische Leitfähigkeit von Kupfer zu einer Verbreiterung der Schweißnaht führte. Die Vorschubgeschwindigkeit kann bei einer Aluminium-Aluminium Verbindung deutlich höher gewählt werden als bei einer Aluminium-Kupfer Verbindung. Dies ist auf die bei Aluminium-Aluminium Verbindungen niedrigere Streckenenergie zurückzuführen. Die Vorschubgeschwindigkeit kann dabei mit einer Steigerung der eingebrachten Laserleistung erhöht werden. Der geringe Vorschub für die Aluminium-Kupfer Anordnung wurde weiters aufgrund der Überlegung gewählt, dass die auftretenden Poren mehr Zeit zum Aufsteigen in der Schweißnaht haben und sich somit die Porendichte verringert, dies

4 Vorversuche für die Findung geeigneter Parameter zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht

konnte teilweise erreicht werden. Eine thermische Isolation der Proben an der Unterseite zeigte für beide Materialanordnungen keine ausschlaggebenden Verbesserungen.

4.4 Schweißung einer Kupfer-Kupfer Verbindung

Die Proben für die Kupfer-Kupfer Schweißversuche wurden bei der Firma TRUMPF in Ditzingen (Deutschland) miteinander verschweißt. Dabei wurden drei verschiedene Parametersettings angewendet. Somit wurden für die Kupfer-Kupfer Schweißungen keine Vorversuche durchgeführt.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Dieser Teil der Arbeit bearbeitet die Ergebnisse der durchgeführten Versuche anhand von 1 mm dicken verschweißten Blechen mit den aus den Vorversuchen gewonnenen Parametern.

5.1 Messung des elektrischen Widerstands

Der elektrische Widerstand kann eine wesentliche Anforderung an eine Schweißverbindung darstellen, dies gilt besonders für den Einsatz als Verbindung bei elektrischen Komponenten.

Der elektrische Widerstand wurde an 15 Aluminium-Aluminium Proben, 15 Aluminium-Kupfer Proben, 11 Kupfer-Kupfer Proben mit den Parametern T1, 2 Kupfer-Kupfer Proben mit den Parametern T2, 2 Kupfer-Kupfer Proben mit den Parametern T2 und 4 Kupfer-Kupfer Proben mit den Parametern T4 bestimmt.

Für die Messung des elektrischen Widerstands wurde speziell für die verwendete Probengeometrie eine Aufnahme aus Kunststoff angefertigt, siehe Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2. Für die Durchführung der Messung wurden die Proben mit einem Steuerstrom von 10 A beaufschlagt. Die Messung des elektrischen Widerstands erfolgte links und rechts der Schweißnaht an der Vorder- und Rückseite der verschweißten Überlappverbindung. Die Messpunkte befanden sich jeweils um 3 mm versetzt zur länglichen Mittellinie der Schweißnaht somit ergibt sich ein Abstand von 6 mm in der Breite und 2 mm in der Höhe. Die Verbindung zwischen den beiden Messpunkten wird mit einem Abstand von 6,3 mm angegeben.

5.1.1 Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung

Der Mittelwert des elektrischen Widerstands der gemessenen Proben aus Tabelle 5.1 beläuft sich auf $3,3 \mu\Omega$. Die empirische Standardabweichung wird mit $0,3 \mu\Omega$ angegeben. Dieser Mittelwert stellt einen relativ hohen Wert für die untersuchten Materialpaarungen dar. Dies kann auf die Porosität und die große Anzahl an Poren zurückgeführt werden, welche bei den computertomographischen und lichtmikroskopischen Untersuchungen behandelt werden.

5.1.2 Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung

Bei den Aluminium-Kupfer Schweißungen aus Tabelle 5.2 wird der Mittelwert des elektrischen Widerstands mit $2,0 \mu\Omega$ angegeben. Die empirische Standardabweichung ergibt sich zu $0,4 \mu\Omega$. Hierbei wird der elektrische Widerstand maßgebend von der Bildung von intermetallischen Phasen beeinflusst. Je dicker sich diese ausbilden, desto höher wird der

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

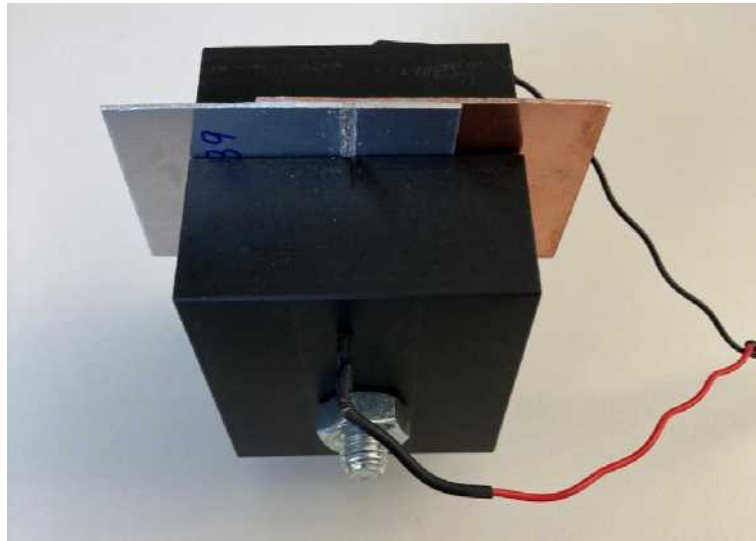


Abbildung 5.1: Probenaufnahme für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit

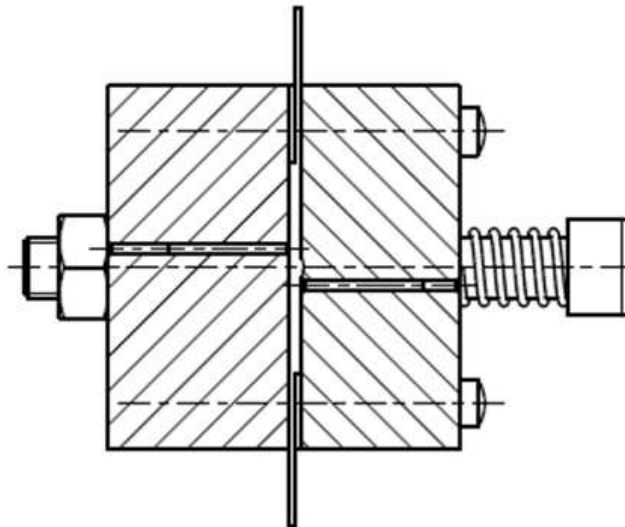


Abbildung 5.2: Schnittdarstellung der Probenaufnahme für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Tabelle 5.1: Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung

Probe	Widerstand [$\mu\Omega$]
Al-Al 64	3,6
Al-Al 65	3,7
Al-Al 66	3,7
Al-Al 58	3,2
Al-Al 46	3,2
Al-Al 45	3,3
Al-Al 43	3,6
Al-Al 47	3,4
Al-Al 42	3,2
Al-Al 44	3,4
Al-Al 57	3,1
Al-Al 4	3,4
Al-Al 61	3,3
Al-Al 62	3,1
Al-Al 63	2,3

Tabelle 5.2: Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung

Probe	Widerstand [$\mu\Omega$]
Al-Cu 51	2,5
Al-Cu 52	2,1
Al-Cu 40	1,9
Al-Cu 18	2,0
Al-Cu 19	1,3
Al-Cu 26	1,1
Al-Cu 29	2,1
Al-Cu 23	2,0
Al-Cu 39	2,2
Al-Cu 31	2,2
Al-Cu 30	1,6
Al-Cu 36	1,7
Al-Cu 37	1,6
Al-Cu 34	1,9
Al-Cu 35	2,3
Al-Cu 38	2,0

elektrische Widerstand, da mehr Elektronen für die ionischen und kovalenten Bindungen benötigt werden. Die in großer Anzahl auftretenden Poren haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den elektrischen Widerstand. Die intermetallischen Phasen, wie auch das Auftreten von Poren in den Proben wird in den computertomographischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen behandelt.

5.1.3 Elektrischer Widerstand einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung

Tabelle 5.3: Elektrischer Widerstand einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung

Probe	Widerstand [$\mu\Omega$]
Cu-Cu T1	0,3
Cu-Cu T1	0,2
Cu-Cu T1	0,3
Cu-Cu T1	0,7
Cu-Cu T1	0,2
Cu-Cu T1	0,4
Cu-Cu T1	1,1
Cu-Cu T1	0,6
Cu-Cu T1	0,9
Cu-Cu T1	0,8
Cu-Cu T1	1,0
Cu-Cu T2	nicht messbar
Cu-Cu T2	nicht messbar
Cu-Cu T3	0,1
Cu-Cu T3	0,1
Cu-Cu T4	0,2
Cu-Cu T4	0,5
Cu-Cu T4	0,4
Cu-Cu T4	0,4

Die Proben mit den Parametern T1 aus Tabelle 5.3 ergeben einen Mittelwert des elektrischen Widerstands von $0,6 \mu\Omega$ und eine empirische Standardabweichung von $0,3 \mu\Omega$. Die Proben mit den Parametern von T2 konnten mit dem verwendeten Messgerät nicht gemessen werden, da der elektrische Widerstand zu gering ausfiel. Die Proben mit den Parametern T3 weisen einen Mittelwert von $0,1 \mu\Omega$ auf, wobei die empirische Standardabweichung hier nicht angegeben werden kann. Die verschweißten Proben mit der Parameterkonfiguration T4 ergeben einen Mittelwert von $0,4 \mu\Omega$ und eine empirische Standardabweichung von $0,1 \mu\Omega$. Die Kupfer-Kupfer Proben erreichten den geringsten Wert für den elektrischen Widerstand. Dies ist aufgrund der hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit und der kaum auftretenden Poren in der Schweißnaht zurückzuführen.

Die kaum vorhandenen Poren werden in den computertomographischen Analysen von Kupfer-Kupfer Schweißproben behandelt.

5.2 Computertomographische Untersuchungen der Schweißnähte

Dieser Abschnitt befasst sich mit der computertomographischen Untersuchung der Schweißnähte im Hinblick auf die Porenverteilung sowie die Porendichte innerhalb der Schweißnaht. Dabei können die Proben auf ihre Porosität untersucht werden ohne sie dabei mechanisch zu bearbeiten. Dies erlaubt einen detaillierten Einblick auf die inneren Verhältnisse bezüglich der Lage der Poren und deren quantitativen sowie qualitativen Vorkommnisse. Am Anfang und am Ende der erzeugten Schweißnaht kann man meist eine Vertiefung erkennen. Diese entsteht aufgrund des Beschleunigungs- und Abbremsprozesses des Laserkopfs.

Die Proben wurden ungefähr in der Mitte geteilt, da eine Untersuchung über die gesamte Schweißnahtlänge aufgrund der geometrischen Eigenschaften nicht möglich war.

5.2.1 Computertomographische Analyse von Aluminium-Aluminium Schweißproben

Bei den Aluminium-Aluminium Schweißverbindungen kann man aufgrund des gleichen Materials keine Einschweißtiefe erkennen. Jedoch sind die Poren und deren Lage gut sichtbar.

Nachfolgend wird in Abbildung 5.3 ein Längsschliff mittels einer computertomographischen Untersuchung dargestellt. Man kann hier gut die Größe sowie die Verteilung der Poren erkennen. Dabei befinden sich die meisten Poren in etwa in der Zwischenebene der beiden verschweißten Aluminiumbleche. Diese treten vor allem durch die Verdampfung von Magnesium und durch ein kollabieren des Keyholes auf.

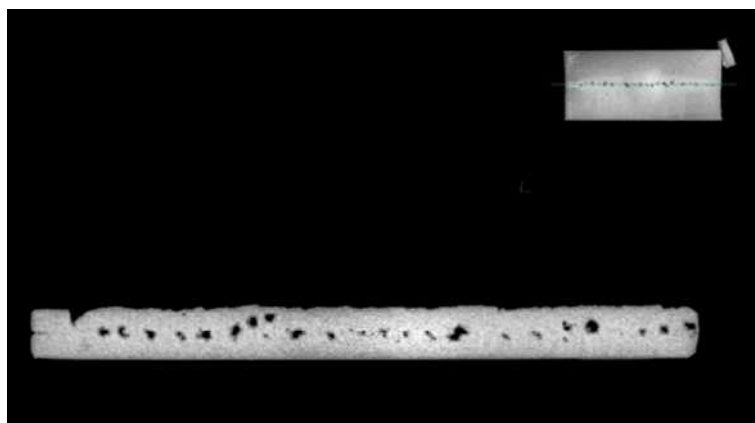


Abbildung 5.3: Al-Al 56 Anfang Längsschliff, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 5.4 zeigt die Oberfläche der Aluminium-Aluminium Schweißnaht. Mittels der computertomographischen Untersuchung können die beim Schweißvorgang ent-

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

standenen Auswürfe aus dem Grundmaterial im Bereich der Schweißnaht gut sichtbar gemacht werden. Diese sind als Punkte links und rechts der Schweißnaht erkennbar. In beiden Abbildungen der Al-Al 56 Anfang Probe kann der Einkoppelvorgang gut veranschaulicht werden. Im Querschliff sowie an der Oberfläche der Schweißnaht erkennt man am Beginn den Einkoppelvorgang, welcher nach einer bestimmten Zeit in einen stabileren Schweißprozess übergeht.



Abbildung 5.4: Al-Al 56 Anfang Oberfläche, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Nachfolgend wird der Probenteil mit dem Ende der Schweißnaht anhand von Abbildung 5.5 vorgestellt. Hier ergibt sich eine sehr ähnliche Verteilung im Hinblick auf die Anzahl und die Lage der Poren, wie beim Anfang der Schweißnaht. Somit kann auf eine etwa gleiche Verteilung der Poren in der Schweißnaht geschlossen werden.

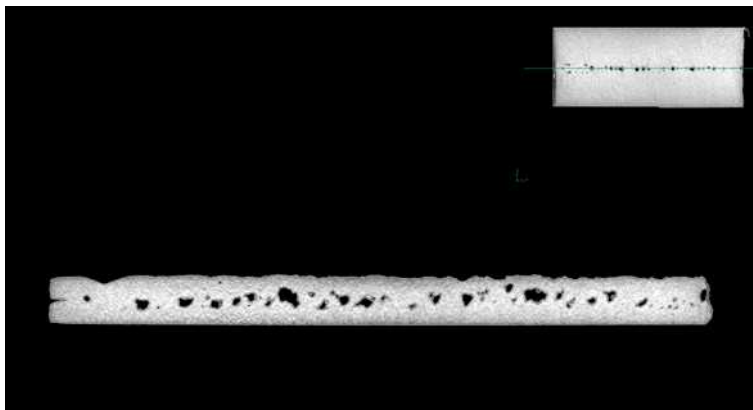


Abbildung 5.5: Al-Al 56 Ende Längsschliff, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Am Ende der Schweißnaht kann man in Abbildung 5.6 die sich bildende Grube bei der Beendigung des Schweißprozesses erkennen. Diese entsteht durch den Abbremsvorgang des Roboters bei gleichbleibender Laserleistung.

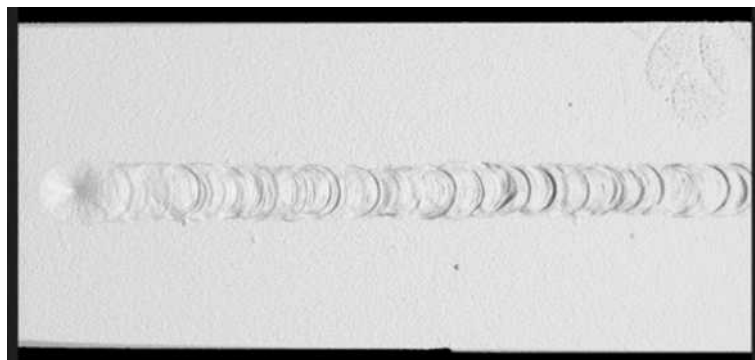


Abbildung 5.6: Al-Al 56 Ende Oberfläche, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5.2.2 Computertomographische Analyse von Aluminium-Kupfer Schweißproben

Bei den Aluminium-Kupfer Schweißproben kann man aufgrund der unterschiedlichen Dichte von Aluminium und Kupfer die Einschweißtiefe sehr gut darstellen. Dies erlaubt eine qualitative Einschätzung der Schweißnaht. Dabei kann auch auf die Stabilität des bereitgestellten Laserstrahls rückgeschlossen werden. Die Abbildung 5.7 zeigt einen Längsschliff, welcher mittels einer computertomographischen Analyse generiert wurde. Dabei ist die variierende Einschweißtiefe in das Kupfermaterial zu erkennen. Diese Schwankung ergibt sich durch einen teilweise instabilen Schweißprozess.

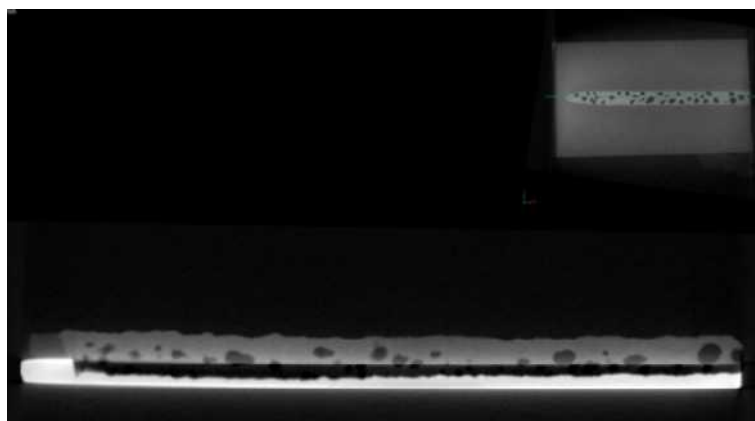


Abbildung 5.7: Al-Cu 46 Anfang Längsschliff, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

In der Abbildung 5.7 kann man sehr gut die Geometrie der Schweißnaht im Kupferbereich erkennen. Diese gute Sichtbarkeit der Geometrie der Schweißnaht im Kupferbereich kann aufgrund der stark unterschiedlichen Dichte der beiden Materialien dargestellt werden. Der restliche Teil der Probe 46 wird in Abbildung 5.9 veranschaulicht. Hier zeigt sich

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

ebenfalls eine Fluktuation in der Einschweißtiefe, mit einer höheren Einschweißtiefe am Ende der Schweißnaht, welche durch den Abbremsprozess des Roboters hervorgerufen wurde.

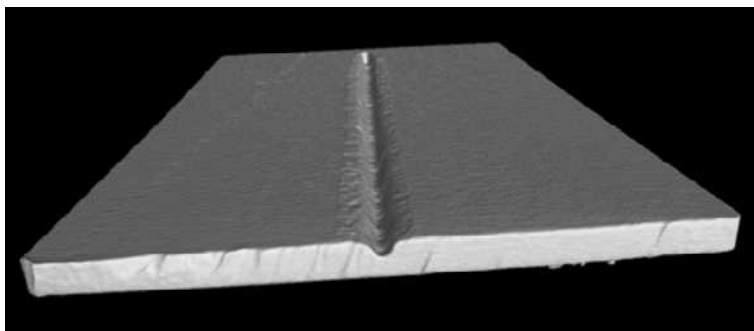


Abbildung 5.8: Al-Cu 46 Anfang Einschweißtiefe, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

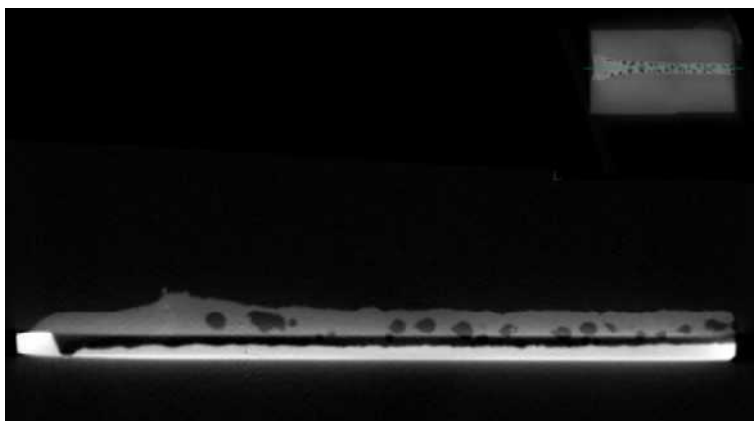


Abbildung 5.9: Al-Cu 46 Ende Längsschliff, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 5.10 zeigt die Geometrie der Schweißnahtwurzel im Kupferbereich. Dabei ergibt sich eine in etwa konstant bleibende Breite beim Übergang zum Aluminiumbereich, jedoch variiert die Einschweißtiefe, wie in Abbildung 5.9 gezeigt.

5.2.3 Computertomographische Analyse von Kupfer-Kupfer Schweißproben

Die computertomographischen Untersuchungen der Kupfer-Kupfer Proben zeigten kaum Poren in der Schweißnaht und die Einschweißtiefe kann aufgrund der von beiden Schweißpartnern gleichen Materials hier nicht dargestellt werden. Die geringe Anzahl an Po-

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

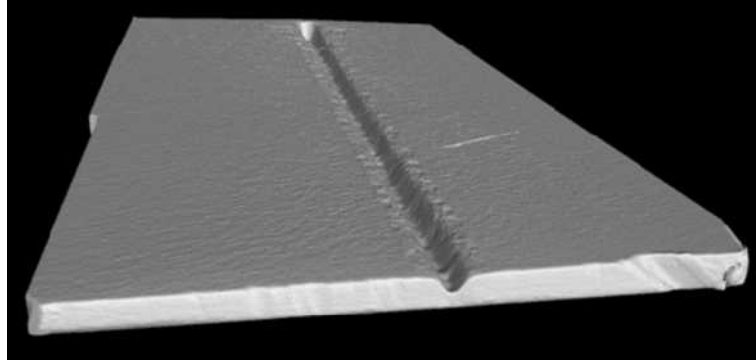


Abbildung 5.10: Al-Cu 46 Ende Einschweißtiefe, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

ren ist auch auf die Verwendung einer Scanneroptik während des Schweißprozesses zurückzuführen.

In Abbildung 5.11 ist die Mittelebene mit Blick auf das untere Kupferblech dargestellt. Dabei zeigen sich wenige Poren mit kleinem Durchmesser.

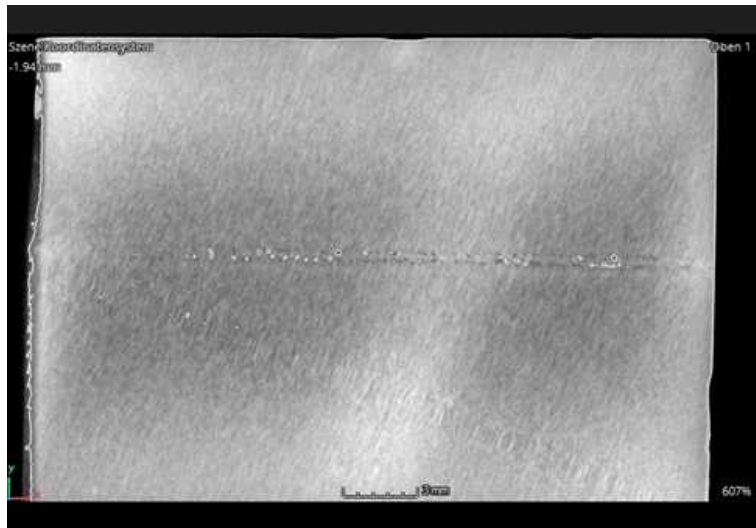


Abbildung 5.11: Cu-Cu T1 Mittelebene, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Die vertikale Verteilung der auftretenden Poren in der Schweißnaht wird in Abbildung 5.12 mittels eines computertomographisch generierten Längsschliff dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Poren ausschließlich in der Mittelebene der beiden Proben auftreten und einen kleinen Durchmesser aufweisen. Die Lage der Poren deutet auf Kontaktfehler während des Schweißprozesses zwischen den beiden Blechen hin.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche



Abbildung 5.12: Cu-Cu T1 Längsschliff, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 5.13 verdeutlicht nochmals die Lage der betrachteten Ebenen in der Schweißnaht.

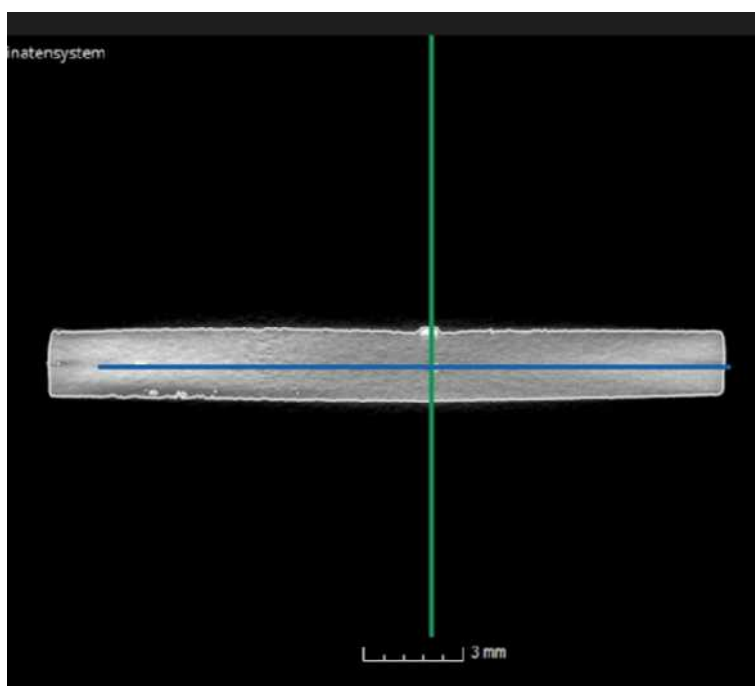


Abbildung 5.13: Cu-Cu T1 Lage, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

5.3 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Für die Untersuchungen der Schweißnahtgeometrie unter dem Lichtmikroskop wurden jeweils 15 Proben von der Konfiguration Aluminium-Aluminium und jeweils 15 Proben von der Konfiguration Aluminium-Kupfer herangezogen. Für die Schweißverbindung Kupfer-Kupfer wurden 11 Proben mit den T1 Parametern, 2 mit den T2 Parametern und 2 mit den T4 Parametern untersucht. Für jede Probe wurden 2 Schliffe angefer-

tigt, welche einmal in der Mitte und einmal gegen Ende der Schweißnaht liegen. Die Lage der hier betrachteten Querschliffe wird in Abbildung 5.14 verdeutlicht, dabei wird auch auf die Blickrichtung hingedeutet. Dadurch kann auch zum Teil die Veränderung der geometrischen Eigenschaften der Schweißnaht über die Schweißnahtlänge betrachtet werden. Dabei wurden die auftretenden Poren in zwei Kategorien unterteilt: in große Poren (*Durchmesser* $> 0,5\text{ mm}$) und kleine Poren (*Durchmesser* $< 0,5\text{ mm}$). Zur Beleuchtung der Probe wurde ein Aufsichtverfahren angewendet.

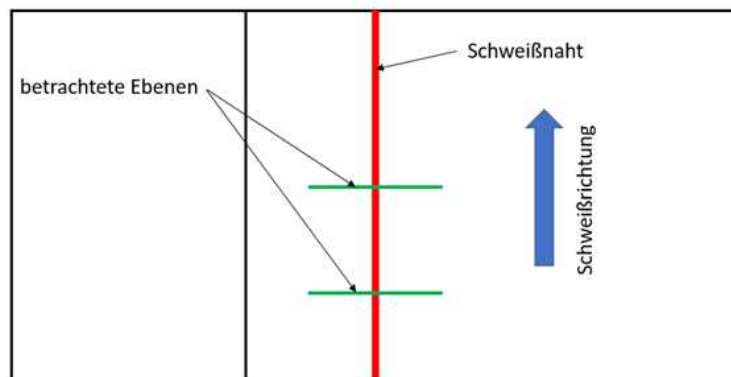


Abbildung 5.14: Betrachtungsebenen der Querschliffe für lichtmikroskopische Untersuchungen

5.3.1 Lichtmikroskopische Untersuchung von Aluminium-Aluminium Schweißverbindung

Hier werden nun die Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung der erzeugten Aluminium-Aluminium Schweißverbindung vorgestellt. Dabei wurden die Proben eingebettet und mittels einer Ätzung nach Kellar ($5,0\text{ g NaF}$, 20 ml HCl , 10 ml HNO_3) präpariert.

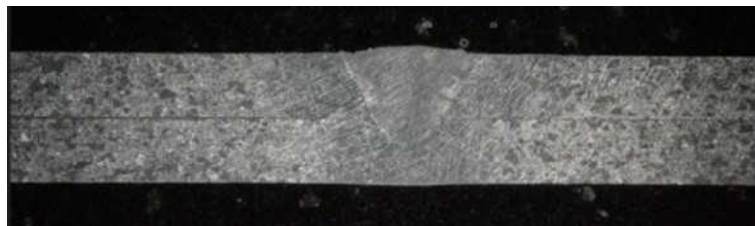


Abbildung 5.15: Querschliff Probe Al-Al 32 Ende, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Probe von Abbildung 5.15 zeigt keinerlei Poren in der Querschnittsfläche. Jedoch kann man bei dieser Abbildung die kegelige Form der Schweißnaht gut erkennen.

Die Abbildung 5.16 zeigt eine vergleichsweise kleine Pore im mittleren Bereich der

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche



Abbildung 5.16: Querschliff Probe Al-Al 35 Ende, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Schweißnaht. Kleinere Poren haben ihren Ursprung sehr oft im Material selbst und können kaum vermieden werden.



Abbildung 5.17: Querschliff Probe Al-Al 36 Ende, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die vergleichsweise größeren Poren kommen oft aufgrund einer Kollabierung des Keyholes zustande. Die hier gezeigte Pore in Abbildung 5.17 befindet sich ebenfalls im mittleren Bereich der Schweißnaht.

Schweißnahtbreite

Somit ergibt sich aus Tabelle 5.4 ein Mittelwert der Schweißnahtbreite von 1,98 mm in der Mitte und ein Mittelwert von 2,00 mm am Ende der Schweißnaht. Der Mittelwert aller gemessenen Schweißnahtbreiten beläuft sich auf 1,99 mm.

Die empirische Standardabweichung aus Tabelle 5.4 der in der Mitte gemessenen Werte wird mit 0,07 mm angegeben, wohingegen sich diese am Ende der Schweißnaht auf 0,09 mm beläuft. Somit ergibt sich eine Standardabweichung bei aller gemessenen Schweißnahtbreiten von 0,08 mm.

Damit zeigt sich eine kaum schwankende Schweißnahtbreite, welche auf eine stabile Energiezufuhr und Energieabfuhr über die Probeneinspannung in das Material hindeutet.

Einschweißtiefe

Der Mittelwert der Einschweißtiefe in der Mitte der Schweißnaht wird aus Tabelle 5.5 mit 0,45 mm angegeben, der am Ende der Schweißnaht beläuft sich auf 0,42 mm. Daraus resultiert ein Mittelwert von 0,43 mm aller gemessenen Einschweißtiefen.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Tabelle 5.4: Schweißnahtbreite Aluminium-Aluminium

Mitte [mm]	Ende [mm]
1,95	1,87
1,99	2,04
1,94	1,98
1,90	1,94
2,08	1,93
2,11	2,16
2,11	1,91
1,93	2,06
1,95	2,12
1,94	2,07
1,92	1,99
1,97	1,99
2,08	2,11
1,94	1,99
1,94	1,83

Tabelle 5.5: Einschweißtiefe Aluminium-Aluminium

Mitte [mm]	Ende [mm]
0,36	0,38
0,54	0,48
0,37	0,45
0,40	0,48
0,41	0,34
0,47	0,42
0,53	0,34
0,35	0,43
0,50	0,45
0,41	0,32
0,46	0,52
0,43	0,42
0,43	0,44
0,60	0,52
0,41	0,45

Die empirische Standardabweichung der Einschweißtiefe kann aus Tabelle 5.5 in der Mitte mit 0,07 mm beziffert werden, wobei die empirische Standardabweichung am Ende

der Schweißnaht mit 0,06 mm angegeben wird. Die empirische Standardabweichung von allen gemessenen Einschweißstiefen berechnet sich auf 0,07 mm.

Auch bei der Einschweißtiefe zeigt sich ein stabiler Schweißprozess durch die kaum schwankende Einschweißtiefe. Auch die reproduzierbarkeit der Schweißnaht kann durch die geringe empirische Standardabweichung der Schweißnahtbreite und der Einschweißtiefe bestätigt werden.

5.3.2 Lichtmikroskopische Untersuchung von Aluminium-Kupfer Schweißverbindung

Die Aluminium-Kupfer Proben wurden meistens nicht geätzt, da die Form der Schweißnaht auch mit polierter Oberfläche sehr gut erkennbar ist. Dies ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Materialien und der starken Durchmischung der Elemente innerhalb der Schweißnaht.

Die Abbildung 5.18 zeigt einen Querschliff in welchem keine Pore zu sehen ist, dies sagt jedoch kaum etwas über die Porendichte in der Schweißnaht aus. Die Schweißnahtbreite als auch die Einschweißtiefe sind bei dieser Materialkombination sehr gut zu erkennen.

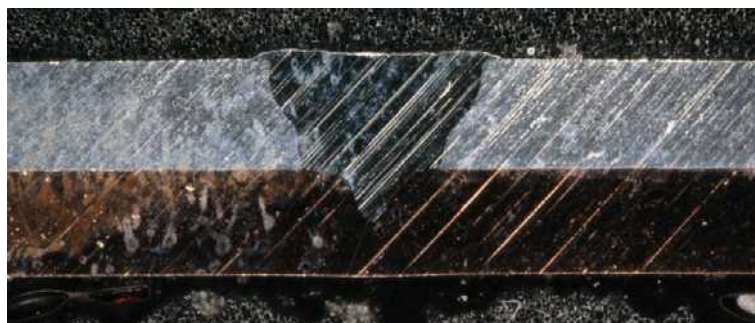


Abbildung 5.18: Querschliff Probe Al-Cu 3 Ende, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

In Abbildung 5.19 wird ein Querschliff gezeigt in dem einige kleine Poren im Bereich der Mittelebene auftreten, diese wurden vermutlich durch die Verdampfung von Magnesium hervorgerufen.

In Abbildung 5.20 wird eine große Pore gezeigt, welche vermutlich durch ein kollabieren des Keyholes zustande gekommen ist.

Schweißnahtbreite

Hier ergibt sich ein Mittelwert der Schweißnahtbreite aus Tabelle 5.6 von 2,24 mm in der Mitte und ein Mittelwert von 2,28 mm am Ende der Schweißnaht. Der Mittelwert aller gemessenen Schweißnahtbreiten beläuft sich auf 2,26 mm.

Die empirische Standardabweichung der Schweißnahtbreiten kann aus Tabelle 5.6 in der Mitte mit 0,12 mm beziffert werden, wobei die empirische Standardabweichung am

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche



Abbildung 5.19: Querschliff Probe Al-Cu 12 Ende, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

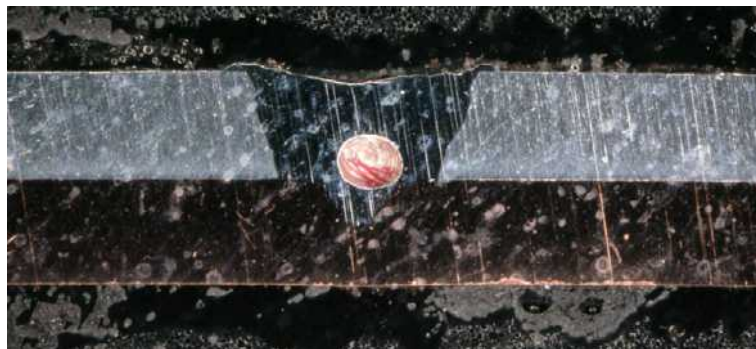


Abbildung 5.20: Querschliff Probe Al-Cu 7 Ende, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Tabelle 5.6: Schweißnahtbreite Aluminium-Kupfer

Mitte [mm]	Ende [mm]
2,28	2,35
2,38	2,55
2,22	2,08
2,07	2,53
2,17	2,01
2,26	2,33
2,21	2,24
2,22	2,17
2,28	2,08
2,42	2,28
2,11	2,25
2,19	2,38
2,41	2,50
2,09	2,28
2,30	2,16

Ende der Schweißnaht mit 0,17 mm angegeben wird. Die empirische Standardabweichung von allen gemessenen Schweißnahtbreiten berechnet sich auf 0,14 mm.

Die empirische Standardabweichung der Schweißnahtbreite wird bei einer Aluminium-Kupfer Verbindung deutlich höher angegeben als bei einer Aluminium-Aluminium Verbindung. Dies deutet auf eine nicht gleichmäßige Einbringung über den Laserstrahl und Abfuhr über die Probenaufnahme der Energie in und aus dem Material hin.

Einschweißtiefe

Der Mittelwert der Einschweißtiefe in der Mitte der Schweißnaht wird aus Tabelle 5.7 mit 0,47 mm angegeben, der am Ende der Schweißnaht beläuft sich auf 0,45 mm. Daraus resultiert ein Mittelwert von 0,46 mm aller gemessenen Einschweißtiefen.

Die empirische Standardabweichung der in der Mitte gemessenen Werte aus Tabelle 5.7 wird mit 0,07 mm angegeben, wohingegen sich diese am Ende der Schweißnaht auf 0,09 mm beläuft. Somit ergibt sich eine Standardabweichung bei der gesamt gemessenen Einschweißtiefen von 0,08 mm.

Eine Einschweißtiefe aus Tabelle 5.7 am Ende einer Schweißnaht wurde mit 0,00 mm angegeben. Hier konnte keine Einschweißtiefe festgestellt werden und der Wert wurde für die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung nicht herangezogen.

Die empirische Standardabweichung der Einschweißtiefe zeigt einen geringen Wert, dies deutet auf einen stabilen Schweißprozess hin, welcher gut reproduziert werden kann.

Tabelle 5.7: Einschweißtiefe Aluminium-Kupfer

Mitte [mm]	Ende [mm]
0,43	0,48
0,48	0,51
0,41	0,51
0,45	0,38
0,42	0,41
0,47	0,43
0,54	0,49
0,50	0,40
0,46	0,42
0,45	0,44
0,49	0,00
0,47	0,46
0,46	0,49
0,50	0,48
0,45	0,45

5.3.3 Lichtmikroskopische Untersuchung von Kupfer-Kupfer Schweißverbindung

Die Kupfer-Kupfer Proben wurden für die lichtmikroskopische Untersuchung mit Salpetersäure geätzt, da ansonsten die Veränderungen im Material durch den Schweißprozess nicht sichtbar wären. Da mehrere Parameterkombinationen untersucht wurden, ergibt sich für die Kupfer-Kupfer Proben ein geringerer Stichprobenumfang für die jeweiligen Kombinationen der Parameter. Dies führt zu höheren Unsicherheiten in den Messergebnissen.

In Abbildung 5.21 wird ein Querschliff einer Kupfer-Kupfer Probe mit der Parameterkombination T1 veranschaulicht. Dabei erkennt man eine Pore in der Trennebene der beiden Bleche. Weiters ist anzumerken, dass sich die Schweißnahtbreite kaum über die vertikale Tiefe in das Material verändert.

Die Darstellung in Abbildung 5.22 zeigt den hinteren Teil einer Schweißnaht mit der Parameterkombination von T1. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Geometrie der Schweißnaht über die Länge nicht wesentlich verändert.

Nachfolgend wird in Abbildung 5.23 ein angefertigter Querschliff mit den Parametern aus T4 gezeigt. Diese wurden mit einem breiteren Laserlichtkabel miteinander verschweißt als die Proben mit den Parametern aus T1, somit ergibt sich auch eine wesentlich breitere Schweißnaht. Abbildung 5.24 veranschaulicht, dass sich die Geometrie auch hier nicht wesentlich über die Länge der Schweißnaht verändert.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche



Abbildung 5.21: T1 Mitte, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm



Abbildung 5.22: T1 Ende, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm



Abbildung 5.23: T4 Mitte, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 150 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

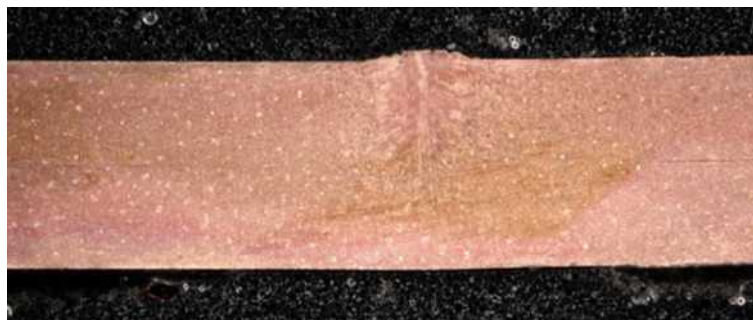


Abbildung 5.24: T4 Ende, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 150 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Tabelle 5.8: Schweißnahtbreite Kupfer-Kupfer T1

Mitte [mm]	Ende [mm]
0,59	0,60
0,56	0,59
0,70	0,59
0,60	0,60
0,59	0,58

Schweißnahtbreite T1

Der empirische Mittelwert der Schweißnahtbreite aus Tabelle 5.8 in der Mitte der Schweißnaht von T1 wird mit 0,61 mm und der Mittelwert am Ende der Schweißnaht wird mit 0,59 mm angegeben. Somit ergibt sich ein gesamter Mittelwert von 0,60 mm.

Die empirische Standardabweichung in der Mitte der Schweißnaht aus Tabelle 5.8 ergibt sich zu 0,05 mm, wohingegen die empirische Standardabweichung am Ende der Schweißnaht mit 0,01 mm angegeben wird. Die gesamte empirische Standardabweichung aller gemessenen Schweißnahtbreiten wird mit 0,04 mm berechnet.

Die sehr geringe empirische Standardabweichung der Schweißnahtbreite zeigt, dass durch die Fokusslage auf die Oberfläche des oberen Blechs sich eine konstante Einbringung der Energie durch den Laserstrahl ergibt.

Einschweißtiefe T1

Der Mittelwert der Einschweißtiefe in der Mitte der Schweißnaht aus Tabelle 5.9 beläuft sich auf 0,54 mm, der Mittelwert am Ende der Schweißnaht wird mit 0,54 mm angegeben. Dadurch ergibt sich ein Gesamtmittelwert von 0,54 mm.

Mit 0,09 mm wird die empirische Standardabweichung aus Tabelle 5.9 in der Mitte der Schweißnaht angegeben, am Ende der Schweißnaht beträgt diese 0,02 mm. Die em-

Tabelle 5.9: Einschweißtiefe Kupfer-Kupfer T1

Mitte [mm]	Ende [mm]
0,40	0,55
0,50	0,51
0,58	0,54
0,61	0,53
0,63	0,55

empirische Standardabweichung aller gemessenen Einschweißtiefen ergibt einen Wert von 0,06 mm.

Die empirische Standardabweichung zeigt einen geringen Wert auf. Dies kann auf ein stabiles Keyhole während des Schweißprozesses hindeuten. Jedoch wurden für die Kupfer-Kupfer Proben wenige Proben zur Untersuchung der Schweißnahtbreite und der Einschweißtiefe herangezogen.

Schweißnahtbreite T4

Tabelle 5.10: Schweißnahtbreite Kupfer-Kupfer T4

Mitte [mm]	Ende [mm]
1,21	1,08
1,08	1,04

Der Mittelwert der Schweißnahtbreite in der Mitte aus Tabelle 5.10 berechnet sich zu 1,15 mm, am Ende der Schweißnaht beträgt dieser 1,06 mm. Somit kann ein Mittelwert aller Schweißnahtbreiten von 1,11 mm angegeben werden.

Die empirischen Standardabweichungen aus Tabelle 5.10 berechnen sich für die Mitte mit 0,09 mm, für das Ende mit 0,08 mm und für die Gesamtheit mit 0,08 mm.

Hier zeigt sich eine deutlich größere Schweißnahtbreite als in Tabelle 5.8 mit den Parametern von T1. Dies ist auf das deutlich dickere Laserlichtkabel, welches bei den Versuchen von T4 verwendet wurde zurückzuführen.

Einschweißtiefe T4

Mit 0,36 mm kann der Mittelwert aus Tabelle 5.11 in der Mitte der Schweißnaht angegeben werden, am Ende kann dieser mit 0,29 mm berechnet werden und der Mittelwert aller gemessenen Einschweißtiefen wird mit 0,33 mm berechnet.

Für die Werte in der Mitte der Schweißnaht aus Tabelle 5.11 wird die empirische Standardabweichung mit 0,10 mm, am Ende mit 0,03 mm und für die gesamten Werte

Tabelle 5.11: Einschweißtiefe Kupfer-Kupfer T4

Mitte [mm]	Ende [mm]
0,43	0,27
0,29	0,31

mit 0,07 mm angegeben.

Die Einschweißtiefe ist hier mit den Parametern aus T4 deutlich geringer als in Tabelle 5.9 mit der Parameterkombination aus T1. Dies ist aufgrund der breiteren Einbringung der gleichen Laserleistung. Es wird hierbei ein breiterer Bereich aufgeschmolzen als in den Versuchen mit den Parametern aus T1, somit ergibt sich auch eine geringere Einschweißtiefe.

5.4 Zugversuche

Im Rahmen der Untersuchungen wurden auch Zugversuche durchgeführt um die mechanische Belastbarkeit näher zu betrachten. Um eine Referenzgröße zu erhalten wurden die Rohmaterialien ebenfalls untersucht. Die betrachteten Proben wurden mittels einer Bandsäge auf ungefähr 45 mm Breite abgeschnitten und darauf mithilfe einer Feile auf ein ungefähres Maß von 45 mm gebracht. Die Proben wurden anschließend mit einer Schiebelehre vermessen um die auftretenden technischen Spannungen bestimmen zu können. Die Fläche für die Bestimmung der Spannungen wurde auf die tatsächliche Breite der Proben sowie auf eine Höhe von 1 mm bezogen. Somit ergibt sich die Spannung in Abhängigkeit von der gemessenen Kraft in Längsrichtung der Proben. Die Proben für die Zugversuche des Rohmaterials wurden auf eine Breite von 45 mm gefräst. Dabei wurden die Proben in Mitte mittels einer Rundung verjüngt. Somit kann ein reißen der Proben im Bereich der Einspannung vermieden werden. Die Proben wurden mit einer Vorspannkraft von 10 N belastet.

5.4.1 Zugversuche Rohmaterial Aluminium

Da Aluminium ein kubisch flächenzentriertes Gitter aufweist ergibt sich bei einem Zugversuch keine ausgeprägte Streckgrenze. Insgesamt wurden sieben Proben des Rohmaterials mittels Zugversuchs geprüft.

In Abbildung 5.25 wird ein typisches Ergebnis für einen Zugversuch des Rohmaterials Aluminium veranschaulicht. Dabei kann ein duktileres Verhalten des Werkstoffs festgestellt werden.

Die gewonnenen Messergebnisse aus Tabelle 5.12 liefern einen Mittelwert von $183,58 \text{ N/mm}^2$, bei einer empirischen Standardabweichung von $0,92 \text{ N/mm}^2$.

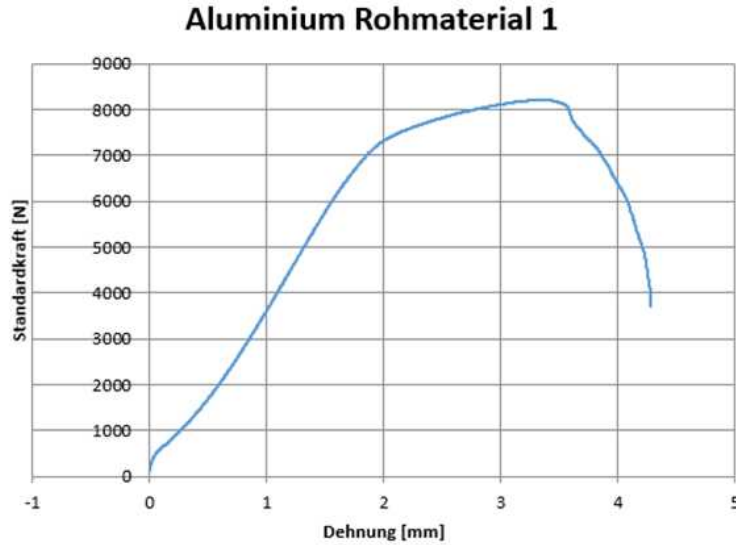


Abbildung 5.25: Aluminium Rohmaterial 1

Tabelle 5.12: Zugversuch des Rohmaterials Aluminium

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
Al 1	8206,44	45,00	182,37
Al 2	8266,58	45,00	183,70
Al 3	8279,46	45,00	183,99
Al 4	8258,16	45,00	183,51
Al 5	8211,61	45,00	182,48
Al 6	8325,60	45,00	185,01
Al 7	8279,10	45,00	183,98

5.4.2 Zugversuche Rohmaterial Kupfer

Da Kupfer ebenfalls ein kubisch flächenzentriertes Gitter aufweist, ergibt sich bei einem Zugversuch keine ausgeprägte Streckgrenze. Insgesamt wurden sieben Proben des Rohmaterials mittels Zugversuchs geprüft.

In Abbildung 5.26 wird ein typisches Ergebnis für einen Zugversuch des Rohmaterials Kupfer veranschaulicht. Dabei kann ein duktileres Verhalten des Werkstoffs festgestellt werden.

Der Mittelwert der Kupfer Zugversuche aus Tabelle 5.13 beträgt 255,91 N/mm², wohingegen die empirische Standardabweichung mit 0,54 N/mm² angegeben wird.

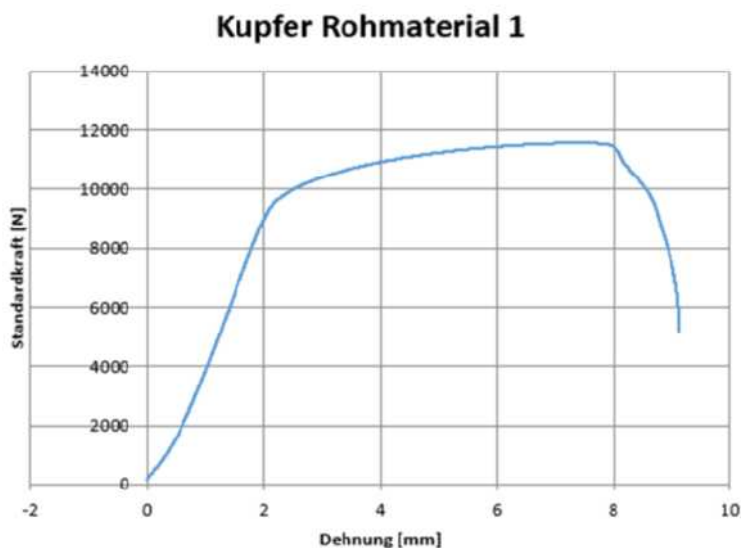


Abbildung 5.26: Kupfer Rohmaterial 1

Tabelle 5.13: Zugversuch des Rohmaterials Kupfer

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
Cu 1	11568,73	45,00	257,08
Cu 2	11517,24	45,00	255,94
Cu 3	11512,21	45,00	255,83
Cu 4	11506,80	45,00	255,71
Cu 5	11509,22	45,00	255,76
Cu 6	11496,77	45,00	255,48
Cu 7	11501,38	45,00	255,59

5.4.3 Zugversuche der Schweißverbindung Aluminium-Aluminium

Die Materialpaarung Aluminium-Aluminium ist durchgehend in der Mittelebene der Verbindung während des Zugversuchs getrennt worden. Dabei kann man in der Trennebene eine duktile Verformung der Schweißnaht erkennen. Für diese Materialpaarung wurden 20 Zugversuche ohne anschleifen der Kontaktflächen und 2 mit anschleifen der Kontaktflächen durchgeführt.

Die hier in Abbildung 5.27 gezeigte Probe veranschaulicht die Trennebene einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung. Die Verformung in der Schweißnaht tritt durch die Scherbelastung während des Zugversuchs auf. Dabei ist ein duktiler Verhalten im Bereich der Schweißnaht zu beobachten, welches auf die herabgesetzte Härte durch ein Lösungsglühen während des Schweißprozesses zurückzuführen ist.

Bei den beiden angeschliffenen Proben in Abbildung 5.28 konnte keine wesentliche

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

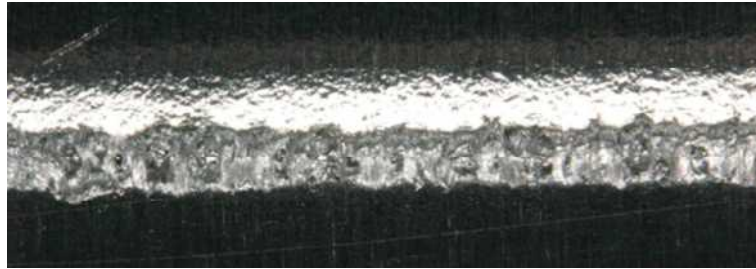


Abbildung 5.27: Al-Al 40 Bruchfläche Vorderseite Zugversuch, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

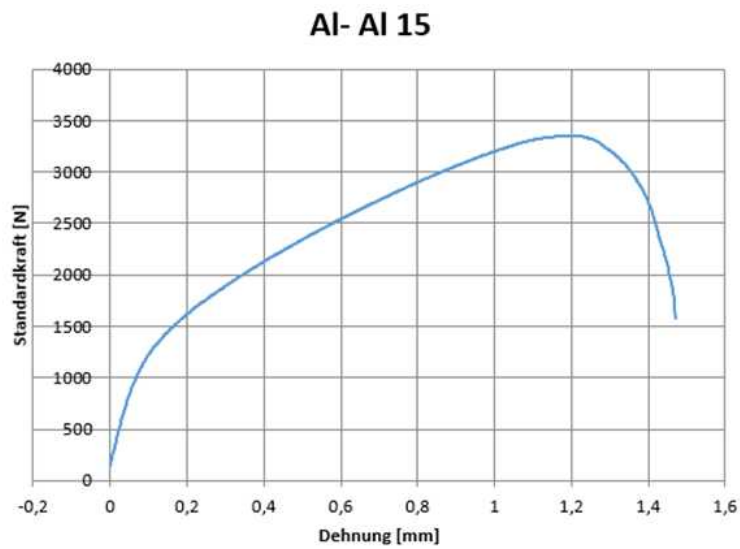


Abbildung 5.28: Al-Al 15 angeschliffen Zugversuch, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Verbesserung im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Jedoch wurden hierfür nur 2 Proben mit angeschliffenen Kontaktflächen untersucht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein reinigen der Oberflächen mit Ethanol eine ausreichende Vorgehensweise für das Entfernen von Verunreinigungen auf den Proben im Hinblick auf die mechanische Festigkeit darstellt.

Tabelle 5.14: Zugversuch der Parameterkonfiguration Aluminium-Aluminium (angeschliffen)

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
Al-Al 15	3352,00	45,07	74,37
Al-Al 17	3627,86	45,05	80,53

Die gemessenen Werte aus Tabelle 5.14 ergeben einen Mittelwert von 77,45 N/mm² mit einer empirischen Standardabweichung von 4,36 N/mm². Somit ergibt sich ein sehr ähnlicher Mittelwert wie in Tabelle 5.15 für nicht angeschliffene Proben angegeben wurde.

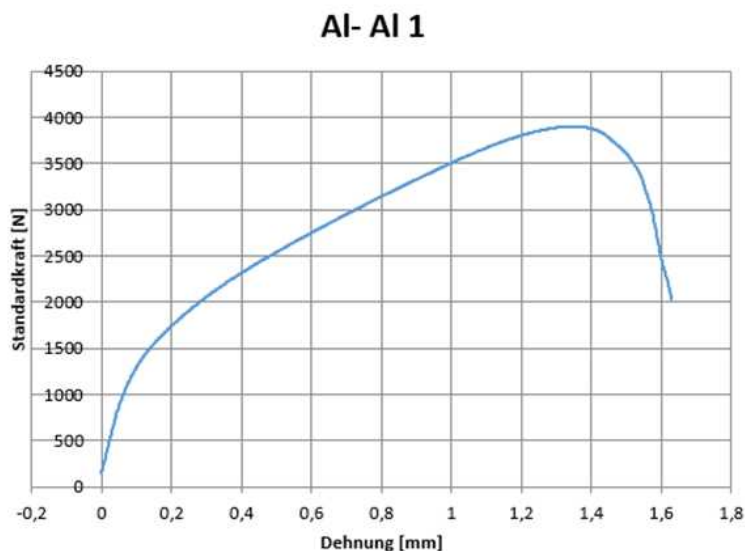


Abbildung 5.29: Al-Al 1 Zugversuch, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die nicht angeschliffenen Proben, wie in Abbildung 5.29, zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf der Dehnung in Abhängigkeit zur angelegten Kraft im Vergleich zu den angeschliffenen Proben. Bei beiden Varianten kann auf ein duktilen Verhalten geschlossen werden.

Bei der Probe Al-Al 4 aus Abbildung 5.30 wurde eine andere Skala für die Dehnung als bei den beiden vorhergehenden Proben verwendet.

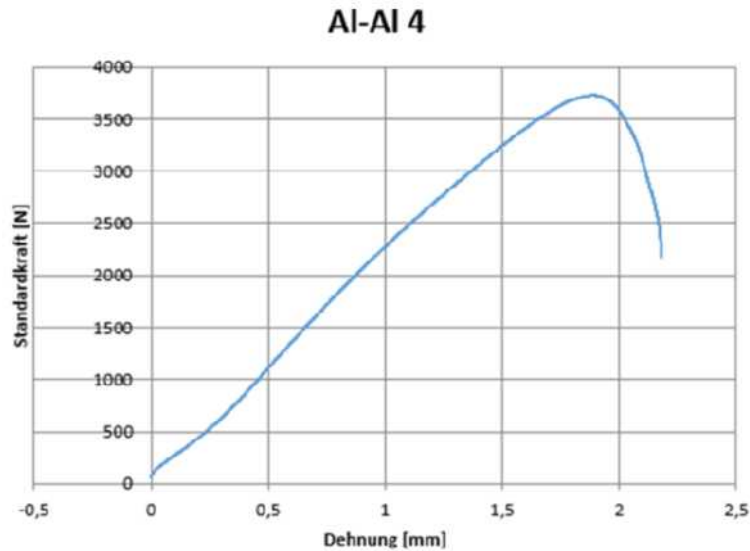


Abbildung 5.30: Al-Al 4 Zugversuch, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Schweißungen der Aluminium-Aluminium Proben aus Tabelle 5.15 erreichten beim Zugversuch einen mittleren Wert der Zugfestigkeit von $78,85 \text{ N/mm}^2$ und eine empirische Standardabweichung von $3,95 \text{ N/mm}^2$. Der Mittelwert für die Zugfestigkeit der verschweißten Aluminium-Aluminium Proben unterscheidet sich sehr deutlich vom Rohmaterial. Dies ist zu einem großen Teil auf die vermehrt auftretenden Poren und die herabgesetzte Härte im Bereich der Schweißnaht zurückzuführen.

5.4.4 Zugversuche der Schweißverbindung Aluminium-Kupfer

Die Proben der Aluminium-Kupfer Schweißverbindungen versagten beim Zugversuch überwiegend im Aluminiumbereich neben der Schweißnaht sowie an der Schweißnahtwurzel.



Abbildung 5.31: Al-Cu 28 Bruchfläche Aluminiumbereich neben der Schweißnaht, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Hier in Abbildung 5.31 erkennt man eine sehr spröde Bruchfläche, welche sich während

Tabelle 5.15: Zugversuch der Parameterkonfiguration Aluminium-Aluminium

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
Al-Al 1	3902,35	45,12	86,49
Al-Al 2	3866,83	45,75	84,52
Al-Al 41	3552,93	45,09	78,80
Al-Al 11	3864,85	45,19	85,52
Al-AL 40	3589,67	45,16	79,49
Al-Al 63	3420,73	45,06	75,92
Al-Al 62	3435,00	45,05	76,25
Al-Al 61	3389,80	45,14	75,10
Al-Al 4	3727,86	45,08	82,69
Al-Al 57	3295,31	45,13	73,02
Al-Al 44	3650,79	45,10	80,95
Al-Al 42	3505,01	45,03	77,84
Al-Al 47	3453,80	45,08	76,61
Al-Al 43	3677,33	45,08	81,57
Al-Al 45	3684,81	45,15	81,61
Al-Al 46	3476,98	45,21	76,91
Al-Al 58	3377,20	45,11	74,87
Al-Al 66	3585,54	44,80	80,03
Al-Al 65	3375,69	45,15	74,77
Al-Al 64	3338,42	45,07	74,07

des Zugversuchs nur minimal verformt. Weiters werden hier auch die makroskopischen Poren sichtbar, welche die Festigkeit durch eine Verringerung des Querschnitts negativ beeinflussen.

Diese Art des Versagens, wie in Abbildung 5.32, der Schweißnaht findet um die Schweißnahtwurzel statt, dabei löst sich die Schweißnahtwurzel aus dem Kupferbereich heraus. In diesem Bereich bilden sich auch vermehrt intermetallische Phasen, welche die Verformung behindern und somit zu einem Versagen der Schweißnaht in diesem Bereich führen.

Die Dehnung der Proben, wie in Abbildung 5.33, fällt bei Aluminium-Kupfer Proben wesentlich geringer aus als bei Aluminium-Aluminium Proben. Die Schweißnaht beginnt bei der maximalen Belastung zu reißen und erfährt darauf noch einige Belastungsspitzen.

Die Festigkeit der Schweißverbindung, wie in Abbildung 5.34 dargestellt, ist im Vergleich zu den beiden Rohmaterialien deutlich vermindert. Dies ist insbesondere auf die makroskopischen Poren sowie auf die Bildung von intermetallischen Phasen zurückzuführen.

Die Aluminium-Kupfer Schweißverbindungen aus Tabelle 5.16 kamen auf eine mittlere Zugfestigkeit von 33,51 N/mm², bei einer empirischen Standardabweichung von 4,40 N/mm². Der Mittelwert der Zugfestigkeit für diese Verbindung liegt weit unter den erreichten Werten beider Rohmaterialien. Dies ist vor allem auf die Bildung der

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

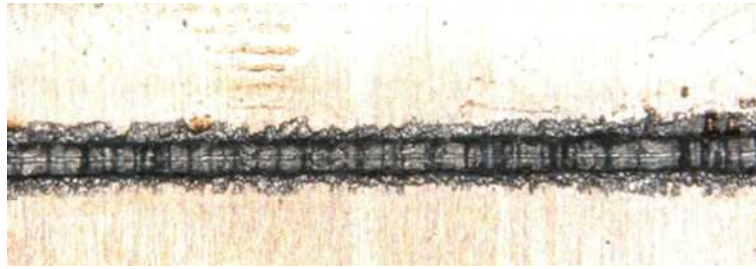


Abbildung 5.32: Al-Cu 20 Bruchfläche Schweißnahtwurzel Kupferbereich, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

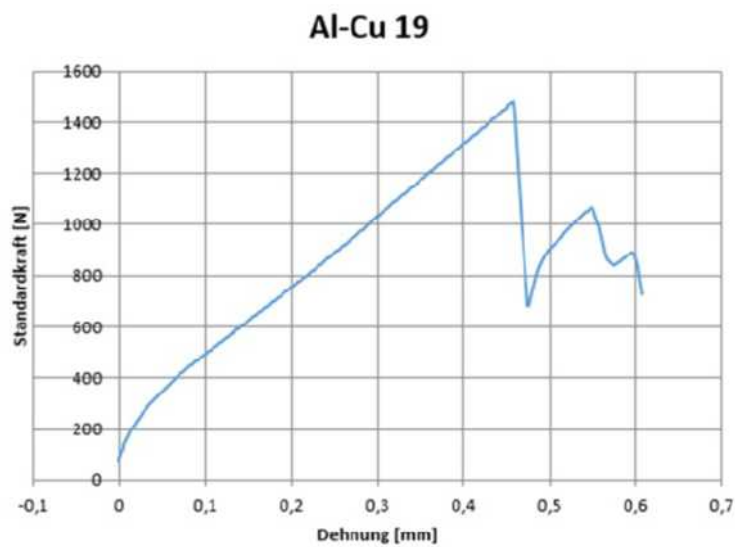


Abbildung 5.33: Al-Cu 19 Zugversuch, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

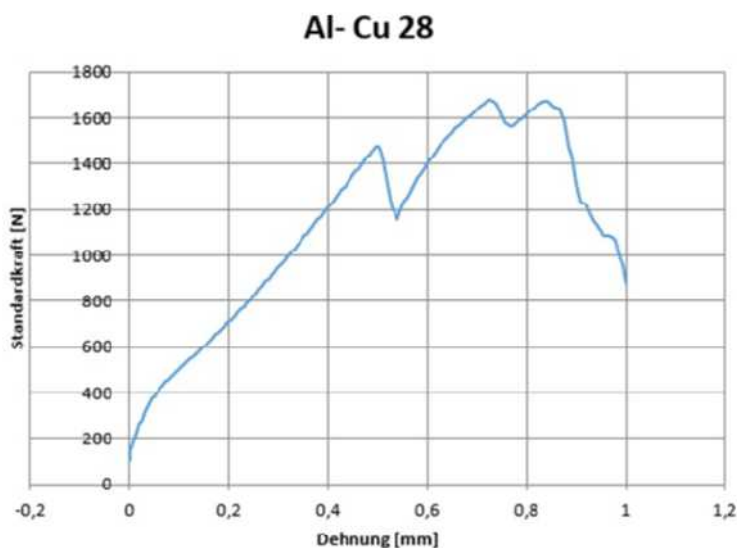


Abbildung 5.34: Al-Cu 28 Zugversuch, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas: 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

intermetallischen Phasen und die hohe Porendichte zurückzuführen.

5.4.5 Zugversuche der Schweißverbindung Kupfer-Kupfer

Bei den Kupfer-Kupfer Schweißversuchen wurden 4 verschiedene Schweißnähte angefertigt, wobei 2 Konstellationen sich nur in der Anordnung der Bleche unterscheiden (um 90 Grad verdreht, sodass die Zugrichtung sich in Walzrichtung befindet).



Abbildung 5.35: T 1 Bruchfläche Vorderseite Zugversuch, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Die Proben mit den Parametern T1 versagten, wie in Abbildung 5.35 gezeigt, durchgehend in der Trennebene der beiden Bleche. Hier wird die Vorderseite einer Schweißnaht dargestellt, welche in der Mittelebene der beiden Bleche versagte. Man erkennt deutlich die Verformung in der Schweißnaht, dies deutet auf ein duktileres Verhalten hin.

Tabelle 5.16: Zugversuch der Parameterkonfiguration Aluminium-Kupfer

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
Al-Cu 17	1862,89	45,66	40,80
Al-Cu 28	1679,96	45,63	36,82
Al-Cu 22	1809,31	45,75	39,55
Al-Cu 20	1057,53	45,43	23,28
Al-Cu 27	1570,53	45,51	34,51
Al-Cu 38	1707,78	45,24	37,75
Al-Cu 35	1520,72	45,35	33,53
Al-Cu 34	1371,00	45,26	30,29
Al-Cu 37	1513,04	45,37	33,35
Al-Cu 36	1449,39	45,23	32,04
Al-Cu 30	1801,25	45,16	39,89
Al-Cu 31	1571,22	45,25	34,72
Al-Cu 39	1654,43	45,18	36,62
Al-Cu 29	1274,26	44,25	28,80
Al-Cu 26	1212,73	45,01	26,94
Al-Cu 19	1482,44	45,14	32,84
Al-Cu 18	1530,97	45,28	33,81
Al-Cu 40	1411,47	45,27	31,18
Al-Cu 52	1392,88	45,18	30,83
Al-Cu 51	1473,47	45,21	32,59

In Abbildung 5.36 wird ein Zugversuch der Parameterkombination T1 veranschaulicht. Dabei ist klar das duktile Verhalten der Schweißverbindung erkennbar.

Tabelle 5.17: Zugversuch der Parameterkonfiguration T1

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
T1 ₁	4189,79	45,12	92,85
T1 ₂	4250,47	45,66	93,09
T1 ₃	3705,99	45,43	81,58
T1 ₄	4057,81	45,28	89,62
T1 ₅	4532,82	45,70	99,19
T1 ₆	4214,93	45,34	92,96

Die Kupfer-Kupfer Schweißverbindungen mit den Parametern T1 erreichten eine mittlere Zugfestigkeit aus Tabelle 5.17 von 91,55 N/mm² mit einer empirischen Standardabweichung von 5,79 N/mm².

Die Kupfer-Kupfer Schweißverbindungen erreichten, bezogen auf das Grundmaterial, die höchsten Werte. Dies ist aufgrund der geringen Porendichte in der Schweißnaht.

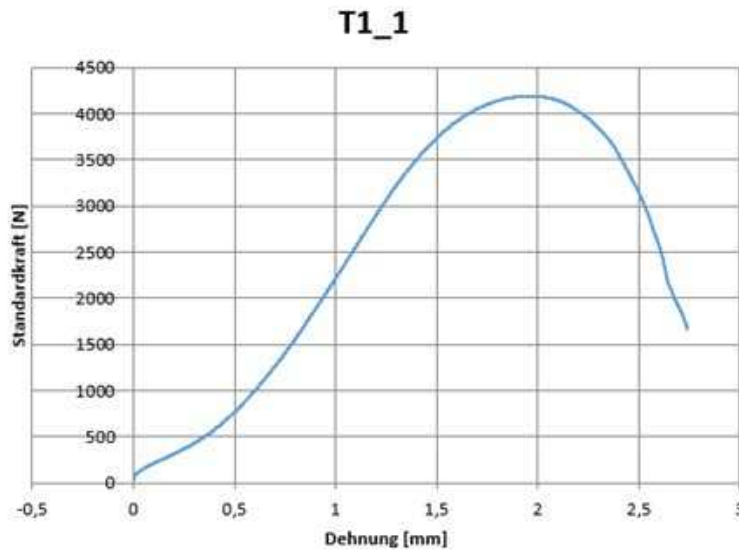


Abbildung 5.36: T1₁Zugversuch, Leistung : 5000 W (60 % in Kern, 40 % in)15%, Vorschub : 250 mm/s, Fokusslage : Oberfläche, Schutzgas : Druckluft, Blechstärke : 1 mm

Tabelle 5.18: Zugversuch der Parameterkonfiguration T3

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
T3 ₉	4558,65	45,24	100,77
T3 ₁₀	4533,09	45,20	100,29

Die Parameter T3, welche sich von T1 nur durch die Ausrichtung der Bleche unterscheiden, erreichte einen Mittelwert der Zugfestigkeit aus Tabelle 5.18 von 100, 53 N/mm² bei einer empirischen Standardabweichung von 0,34 N/mm². Hier wurde die empirische Varianz um eine Zehnerpotenz niedriger berechnet als die Werte für die Zugversuche von T1 und T2. Dies sollte zufälliger Natur sein, da für drei Parameterkombinationen der Kupfer-Kupfer Schweißverbindung nur eine sehr kleine Stichprobenmenge geprüft wurde. Somit liegen auch die Werte von Tabelle 5.20 der Parameterkombination T4 sehr nahe beieinander, wodurch sich ebenfalls eine geringe empirische Standardabweichung ergibt.

Die Abbildung 5.37 zeigt die Bruchfläche einer Probe mit der Parameterkombination von T2. Diese liegt im oberen Blech seitlich der Schweißnaht. Die Proben mit der Parameterkonfiguration von T2 versagten somit nicht in der Mittelebene der Schweißverbindung. Dies ist aufgrund der deutlich größeren Wärmeeinflusszone im Vergleich zu den Parametern von T1. Es kommt zu einem Härteabfall im Bereich der Schweißnaht während des Schweißprozesses und somit zu einer Dehnungsbehinderung seitlich der Schweißnaht beim Zugversuch.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

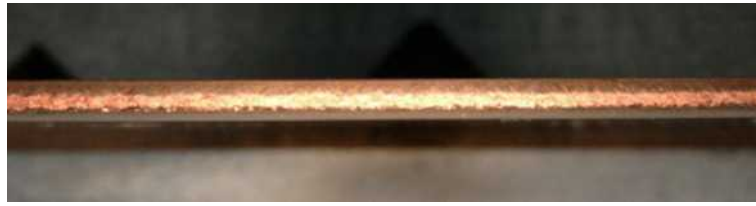


Abbildung 5.37: T 2 Oberseite Bruchfläche Zugversuch, Leistung: 3000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15%, Vorschub: 50 mm/s Wobbeln, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

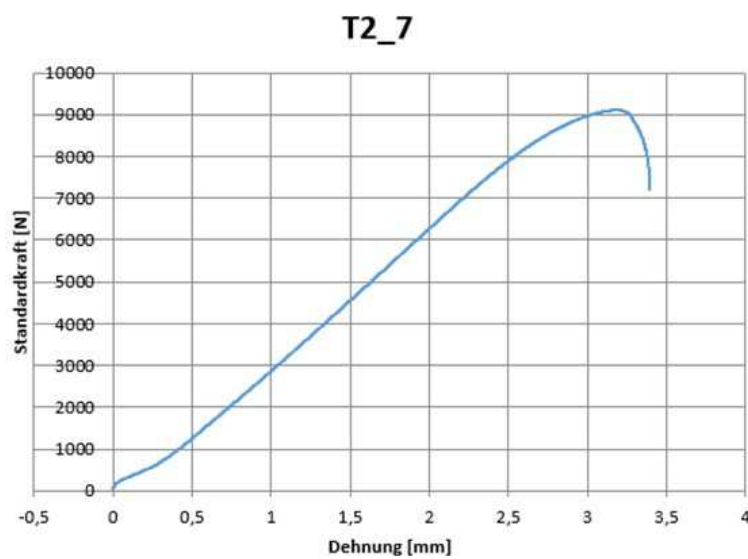


Abbildung 5.38: T2₇Zugversuch, Leistung : 3000 W (60 % in Kern, 40 % in Ring) 15%, Vorschub : 50 mm/s Wobbeln, Fokusslage : Oberfläche, Schutzgas : Druckluft, Blechstärke : 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Abbildung 5.38 zeigt ein ebenfalls duktilen Verhalten der Schweißnaht. Hier wird auch die hohe Zugfestigkeit der Verbindung mit dieser Parameterkonfiguration deutlich.

Tabelle 5.19: Zugversuch der Parameterkonfiguration T2

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
T2 ₇	9109,14	45,67	199,46
T1 ₈	8989,79	45,65	196,93

Parameter T2, welche das Wobbeln beinhalten, kamen mit den Werten aus Tabelle 5.19 auf eine mittlere Zugfestigkeit von 198,20 N/mm² mit einer empirischen Standardabweichung von 1,79 N/mm². Diese Proben erreichten die höchsten Zugfestigkeiten aller untersuchten Materialpaarungen und Parameterkombinationen. Die hohen Werte konnten aufgrund der breiten Verbindung, welche mittels Wobbeln hergestellt wurde, erreicht werden. Dadurch verringert sich auch die Scherbelastung in der Schweißnaht und diese versagte somit seitlich der Schweißnaht im oberen Blech.



Abbildung 5.39: T 4 Vorderseite Bruchfläche Zugversuch, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 150 mm/s, Fokuslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Ein Versagen der Schweißnaht in der Mittelebene der beiden Bleche erkennt man auch bei der Parameterkonfiguration von T4. Auch hier tritt eine Verformung in der Schweißnaht auf, welche auf ein duktilen Verhalten schließen lässt.

Die Kupfer-Kupfer Schweißverbindung zeigt durchgehend ein duktilen Verhalten, dies ist auch bei der Parameterkonfiguration T4 der Fall. Ein typisches Ergebnis eines Zugversuchs mit den Parametern aus T4 ist in Abbildung 5.40 dargestellt.

Tabelle 5.20: Zugversuch der Parameterkonfiguration T4

Probe	Maximalkraft [N]	Fläche [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
T4 ₁₁	5559,78	45,50	122,19
T4 ₁₂	5607,49	45,58	123,03

Bei den Proben von T4 aus Tabelle 5.20 wurde ein Mittelwert von 122,61 N/mm² mit einer empirischen Standardabweichung von 0,59 N/mm² errechnet. Auch für die Parameterkonfiguration T4 ergibt sich ein hoher Mittelwert für die Zugfestigkeit. Dies

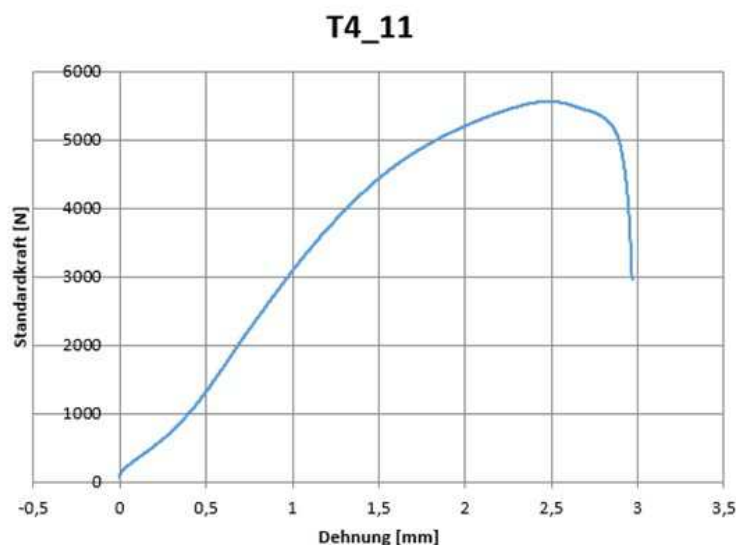


Abbildung 5.40: T4₁ Zugversuch, Leistung : 5000 W (60 % in Kern, 40 % in Ring) 15%, Vorschub : 150 mm/s, Fokusslage : Oberfläche, Schutzgas : Druckluft, Blechstärke : 1 mm

ist auf das dickere Laserlichtkabel und die daraus resultierende breitere Verbindung zurückzuführen.

5.5 Untersuchung mittels Rasterelektronenmikroskops

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden bei USTEM durchgeführt. Die Proben wurden zur Vorbereitung auf ein kleines Maß geschnitten, geschliffen und anschließend poliert. Für die Aluminium-Kupfer Proben wurde zusätzlich eine EDX-Analyse zur Bestimmung der vorkommenden Elemente und deren Konzentration durchgeführt.

5.5.1 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Aluminium-Aluminium Schweißungen

Eine schematische Darstellung einer Aluminium-Aluminium Schweißnaht ist in Abbildung 5.41 dargestellt. Die Schweißnaht zeigt dabei eine ähnliche Form wie eine quadratische Funktion. Diese Form ergibt sich aus den gleichen Schweißpartnern mit dem gleichen Schmelzbereich.

Bei den Aluminium-Aluminium Proben zeigte sich eine starke Porosität im Bereich der Schweißnaht, diese tritt verstärkt im oberen Bereich der Schweißnaht auf.

In Abbildung 5.42 erkennt man viele sehr kleine Poren, welche sich im oberen Bereich der Schweißnaht befinden. Diese Porosität stammt vermutlich aufgrund der regen Durchmischung während des Schweißprozesses und dem gelösten Wasserstoff in der Aluminiumlegierung. Diese starke Porosität befindet sich hauptsächlich im oberen Bereich

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

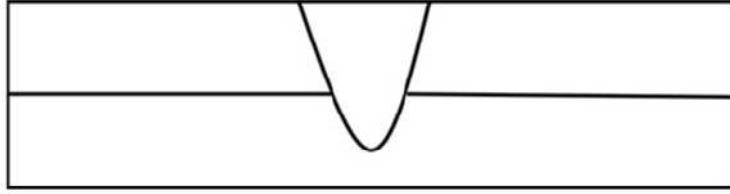


Abbildung 5.41: Skizze einer Aluminium-Aluminium Schweißnaht

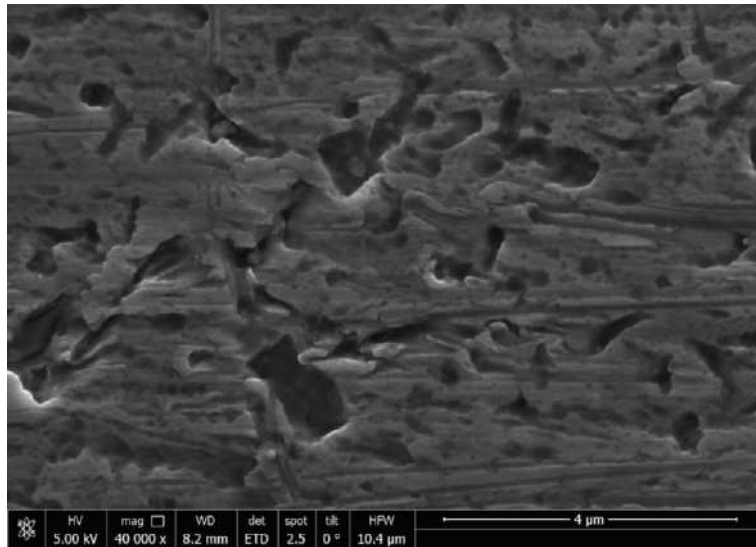
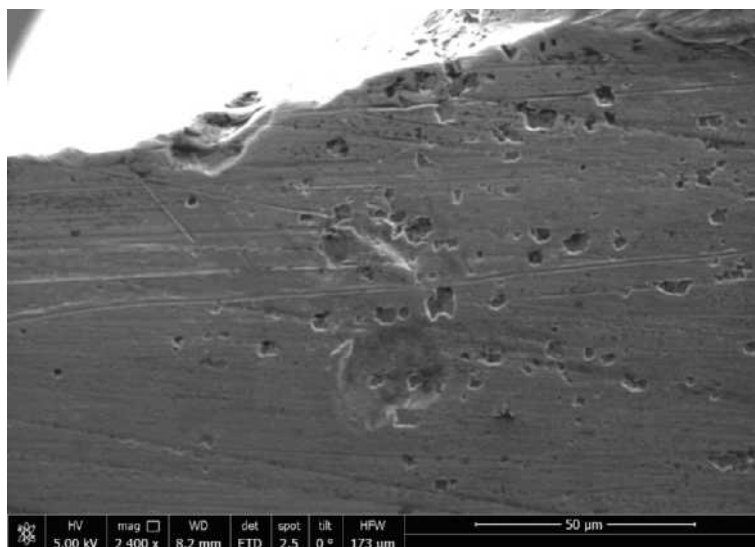


Abbildung 5.42: Oberer Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 40000 facher Vergrößerung, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

der Schweißnaht, direkt unter der Oberfläche der Schweißnaht.



Abbildungung 5.43: Ganz oben einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 2400 facher Vergrößerung, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Abbildung 5.43 zeigt den linken oberen Bereich der Schweißnaht, dabei können sehr kleine als auch mittlere Poren veranschaulicht werden. Die starke Porosität in diesem Bereich kann man erst bei einer höheren Vergrößerung, wie in Abbildung 5.42 dargestellt, erkennen.

Die Abbildung 5.44 zeigt den mittleren Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung. Man kann deutlich die kleinen wie auch die mittleren Poren erkennen. Diese Aufnahme zeigt die Fläche, welche sich ungefähr in der Mittelebene der beiden Bleche befindet. In diesem Bereich ist die Porosität nicht so stark ausgeprägt wie im oberen Bereich der Schweißnaht.

Im unteren Bereich der Schweißnaht, wie in Abbildung 5.45 gezeigt, befinden sich hauptsächlich Poren mittlerer Größe, dies könnte aufgrund der geringeren Dynamik im Schweißbad im unteren Bereich der Schweißnaht während des Schweißvorgangs auftreten.

Die Abbildung 5.46 zeigt die Lage einer großen Pore innerhalb der Schweißnaht, dies soll als Angabe für die Lage in Abbildung 5.47 dienen.

Die Darstellung der Pore in Abbildung 5.47 zeigt, dass die Oberfläche der Pore nicht vollständig glatt ist und Vertiefungen aufweist.

5.5.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Aluminium-Kupfer Schweißungen

Bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung von Aluminium-Kupfer können diese in der Grafik leicht durch ihr Erscheinungsbild voneinander unterschieden werden.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

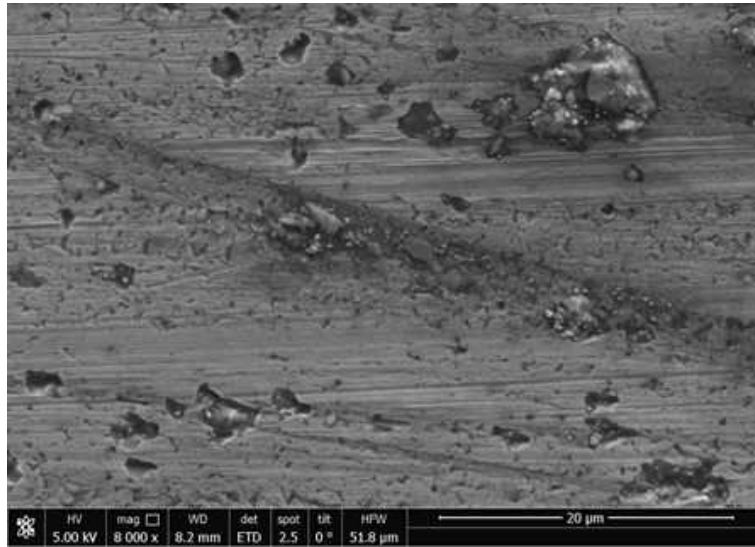


Abbildung 5.44: Mittlerer Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 8000 facher Vergrößerung, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

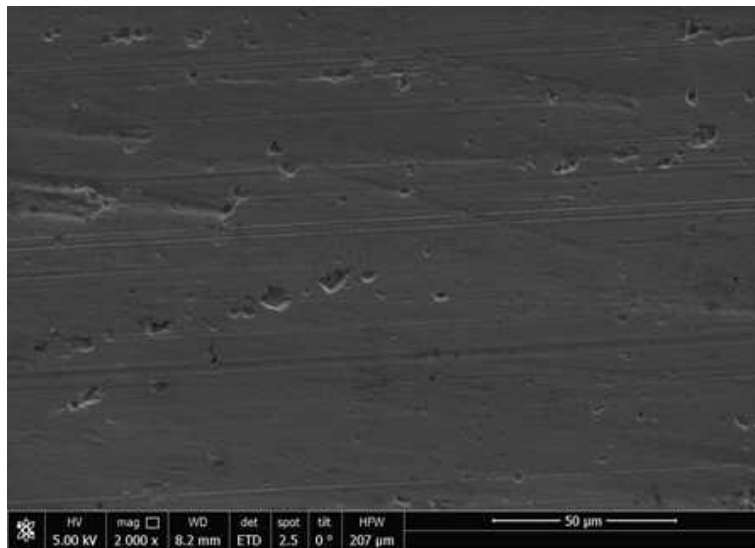


Abbildung 5.45: Unterer Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 2000 facher Vergrößerung, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

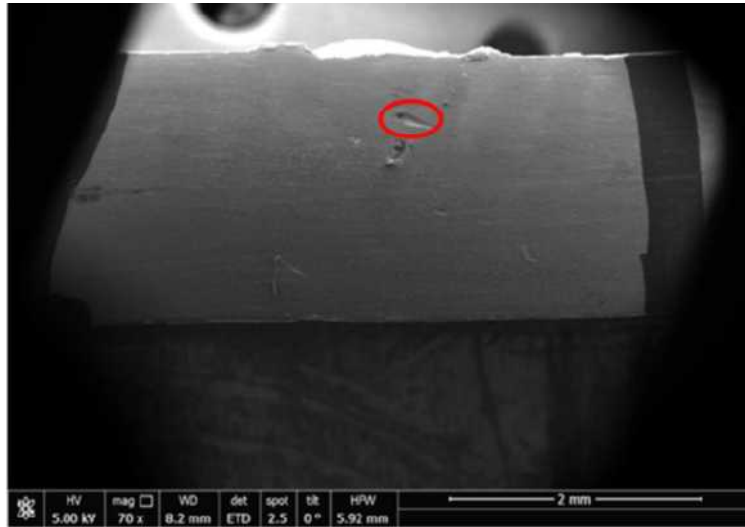


Abbildung 5.46: Gesamte Schweißnaht einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 70 facher Vergrößerung, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

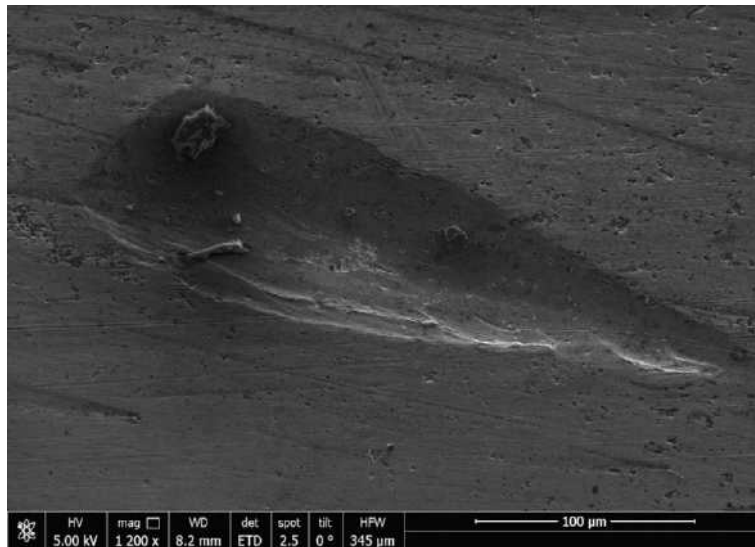


Abbildung 5.47: Große Pore einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 1200 facher Vergrößerung, Leistung: 850 W, Vorschub: 20 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 10 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Ordnungszahlen der zu untersuchenden Materialien. Das Material mit der höheren Ordnungszahl, in diesem Fall Kupfer, „reflektiert“ mehr Elektronen und erscheint somit in der Abbildung etwas heller als das Aluminium.

In der Abbildung 5.48 wird eine Skizze einer Aluminium-Kupfer Schweißnaht gezeigt. Dabei ist zu beachten, dass der aufgeschmolzene Bereich im Aluminiumblech wesentlich größer ist als im Kupferblech. Dieser Umstand entsteht aufgrund des unterschiedlichen Schmelzbereichs der beiden Materialien. Die Durchmischung von Aluminium und Kupfer erfolgt im gesamten Schweißnahtbereich und es werden intermetallische Phasen ausgebildet.

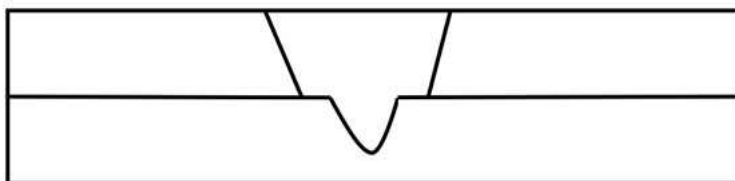


Abbildung 5.48: Skizze einer Aluminium-Kupfer Schweißnaht

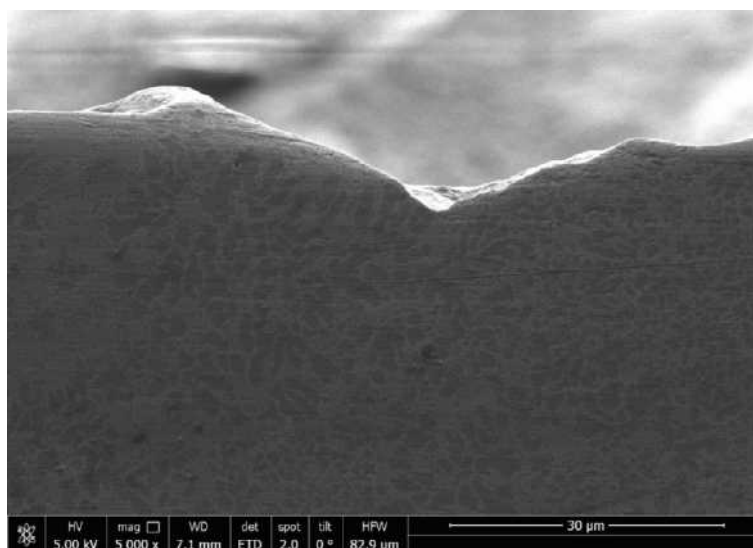


Abbildung 5.49: Oberer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

In Abbildung 5.49 kann man sehr gut die rege Durchmischung der beiden Materialien erkennen. Dies deutet auf ein turbulentes Schweißbad hin, da das Kupfer bis in den obersten Bereich der Schweißnaht vordringen kann. Dies kann man aufgrund der unterschiedlichen Ordnungszahlen der beiden Materialien gut erkennen. Der mittlere Bereich

von Abbildung 5.49 wird in Abbildung 5.51 nochmal mit 10000 facher Vergrößerung dargestellt.

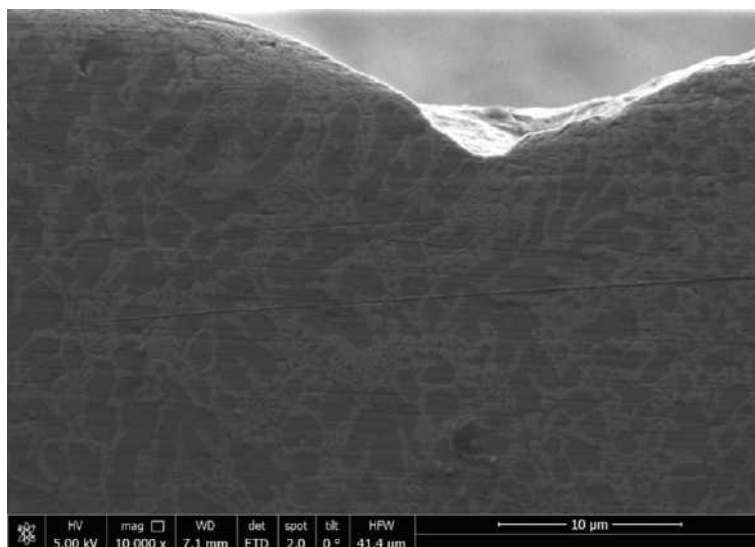


Abbildung 5.50: Oberer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 10000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Aufnahme 5.51 wurde im oberen Bereich der Schweißnaht aufgenommen (*Höhe des Aluminiumblechs*), dabei wird der mittlere Bereich dargestellt. Dieser zeigt eine etwas feinere Verteilung der auftretenden Phasen als im obersten Bereich der Schweißnaht. Die Abbildung 5.52 zeigt den gleichen Bereich wie in Abbildung 5.51 zu sehen ist, jedoch mit einer 20000 fachen Vergrößerung. Hierbei wird die feine und ziemlich gleichmäßige Verteilung der Phasen sichtbar.

In Abbildung 5.53 ist der Übergang des aufgeschmolzenen Aluminiums, welches sich mit Kupfer vermischt hat, zum Grundmaterial Aluminium dargestellt. In der unteren Hälfte der Abbildung ist das Grundmaterial Kupfer zu erkennen, welches heller erscheint. Die Abbildung 5.54 zeigt den selben Bereich mit 10000 facher Vergrößerung. Hier zeigt sich der Übergang der Aluminium-Kupfer Verbindung zum Grundmaterial Aluminium noch deutlicher. Es wird gezeigt, dass es in diesem Bereich keine scharfe Abgrenzung zum Grundmaterial gibt.

Nachfolgend wird in Abbildung 5.55 der untere Bereich der Schweißnaht (*Höhe des Kupferblechs*) auf der linken Seite dargestellt. Im Bereich des Kupferblechs findet man eine schärfere Abgrenzung der Schweißverbindung zum Grundmaterial Kupfer als das im Aluminiumbereich der Fall ist. Die Abbildung 5.56 zeigt den selben Bereich mit einer 16000 fachen Vergrößerung. Hier ist ein Phasensaum an der Grenzfläche zu erkennen. In diesem Bereich bilden sich vermehrt die intermetallischen Phasen, welche die elektrischen, als auch die mechanischen Eigenschaften maßgebend bestimmen.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

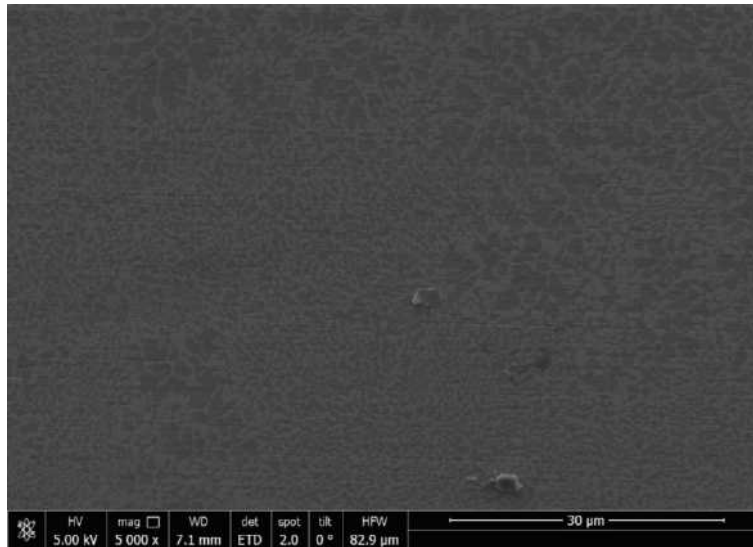


Abbildung 5.51: Oberer mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 10000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

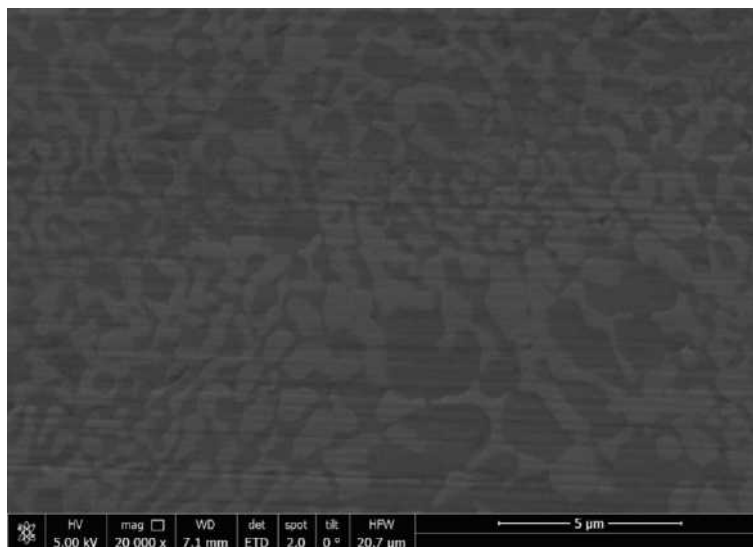


Abbildung 5.52: Oberer mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 20000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

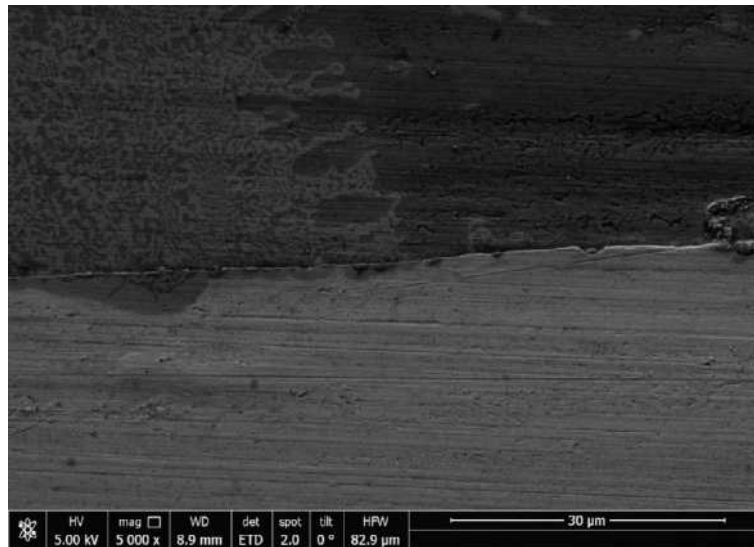


Abbildung 5.53: Rechte Grenzfläche einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

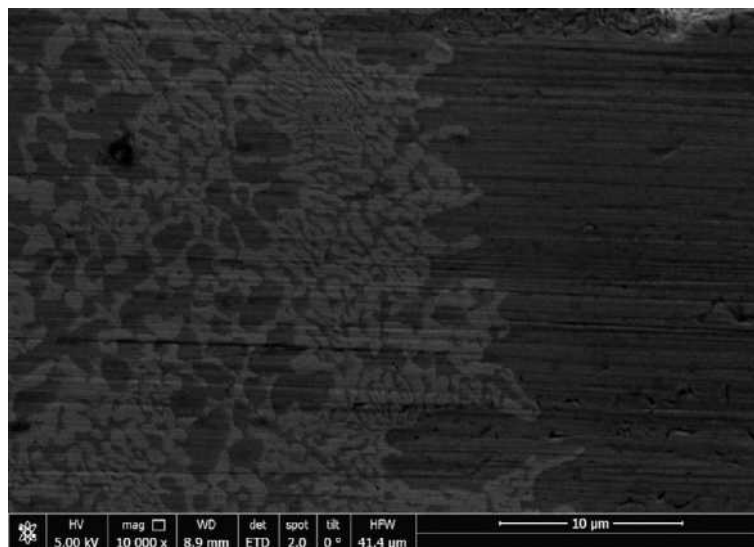


Abbildung 5.54: Rechte obere Seite einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 10000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

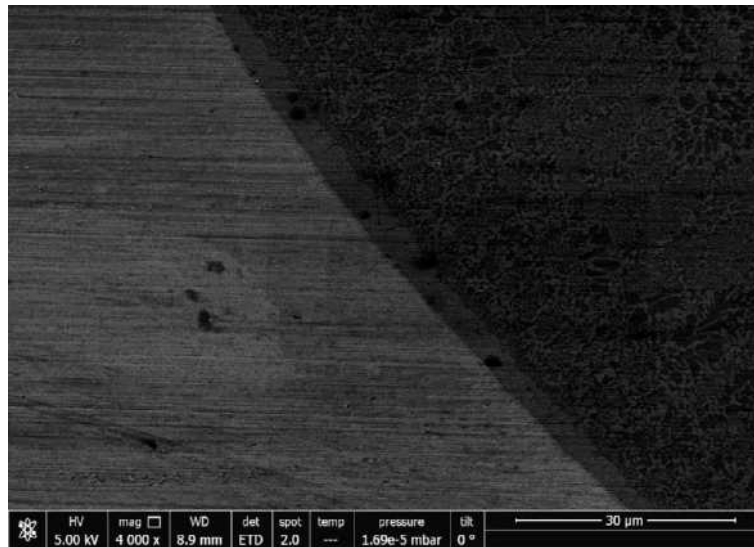


Abbildung 5.55: Linke untere Seite einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 4000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

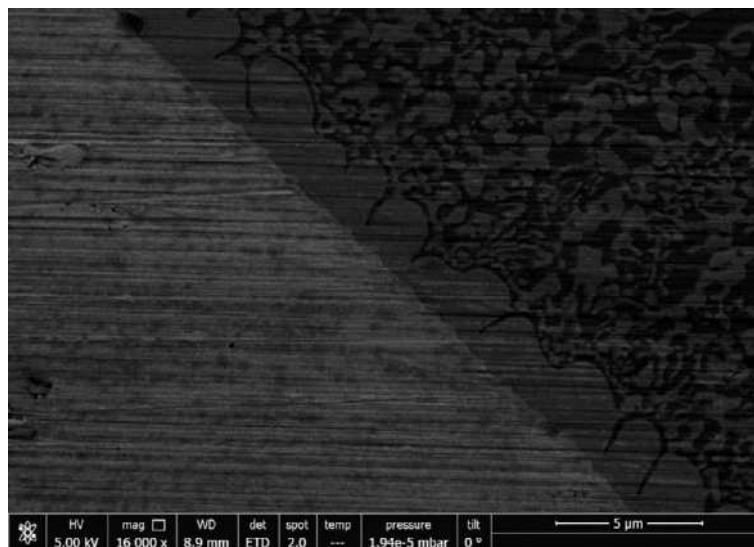


Abbildung 5.56: Linke untere Seite einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 16000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Der unterste Bereich der Schweißnaht wird in Abbildung 5.57 veranschaulicht. Dabei ist zu erkennen, dass auch hier eine klare Abgrenzung zum Grundmaterial Kupfer auftritt. Auch der sich bildende Phasensaum bleibt entlang der Grenzfläche in seiner Breite in etwa konstant.

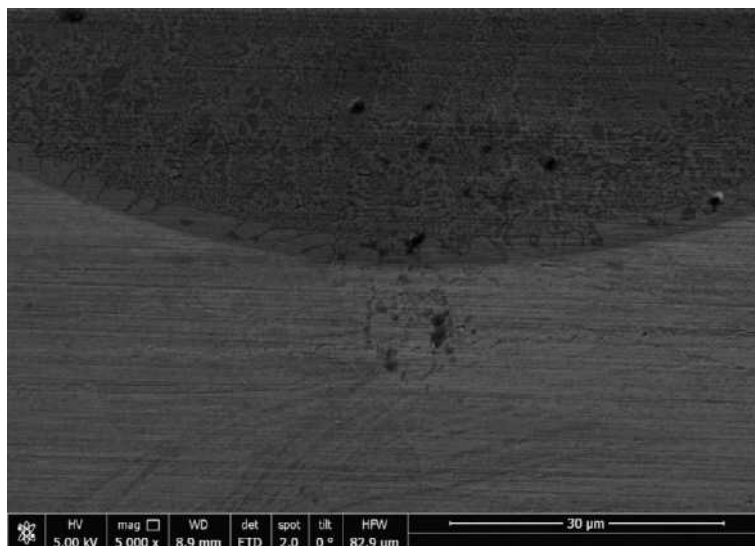


Abbildung 5.57: Unterster mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Die Durchmischung der beiden Materialien zeigt sich auch, wie in Abbildung 5.58 im mittleren Bereich der Schweißnaht auf der Höhe des Kupferblechs zu sehen ist. Dies zeigt, dass die Durchmischung von Aluminium und Kupfer in allen Bereichen der Schweißnaht stattfindet.

Weiters wird in Abbildung 5.59 eine große Pore auf der Höhe des Aluminiumblechs dargestellt. Man erkennt hierbei eine nicht glatte Oberfläche mit einigen Vertiefungen.

EDX-Analyse einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung

Zur Bestimmung der auftretenden Phasen in den verschiedenen Bereichen der Schweißnaht wurden Elementanalysen in Form einer EDX-Analyse durchgeführt. Zu beachten ist hier, dass die Angaben der Anteile eine hohe Unsicherheit beinhalten. Die auftretenden Phasen werden nachfolgend mit den Angaben aus der Literatur durch die gemessenen Gewichtsprozent der auftretenden Elemente bestimmt.

Die Abbildung 5.60 zeigt den gewählten Bereich für die erste EDX-Analyse. Dabei wurde der linke untere Schweißnahtbereich gewählt. Als Referenzwert wurde der gewählte Bereich 1 in den Kupferwerkstoff gelegt. Der EDX Punkt 1, der EDX Punkt 2 und der gewählte Bereich 2 wurden in den Phasensaum gelegt. Der gewählte Bereich 3, gewählte

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

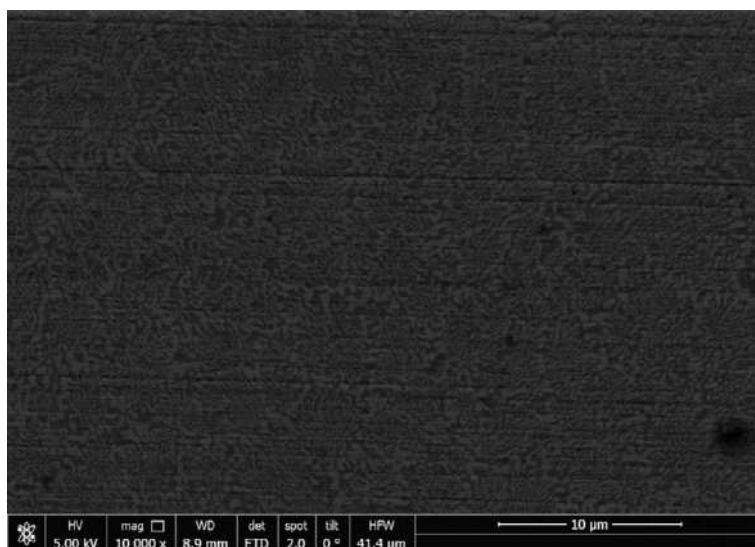


Abbildung 5.58: Unterer mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

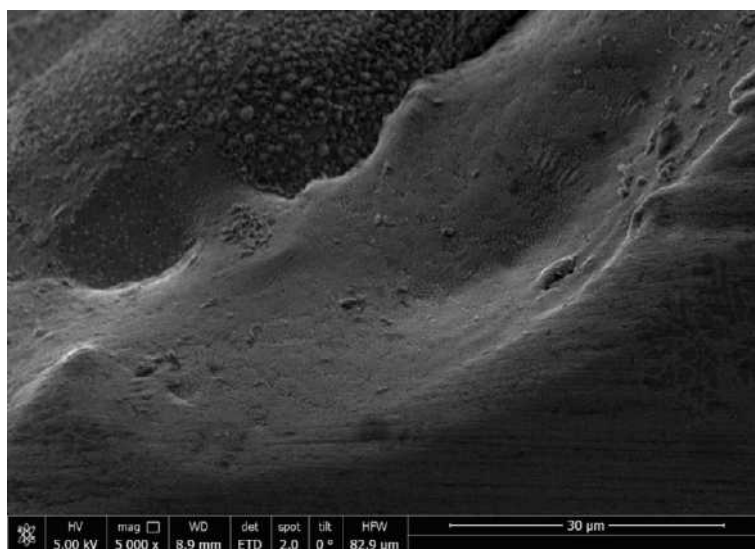


Abbildung 5.59: Große Pore einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

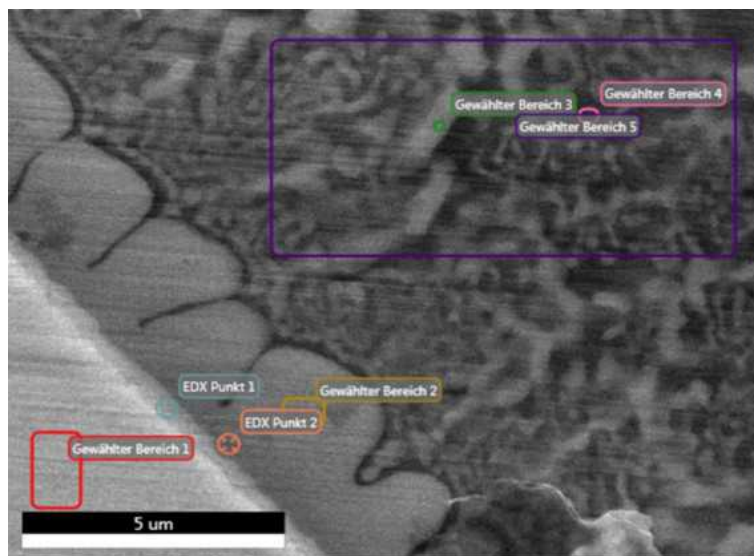


Abbildung 5.60: EDX-Analyse 1, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Bereich 4 und der gewählte Bereich 5 befinden sich nach dem Phasensaum im Schweißbadbereich. Die Abbildung wurde mit einer Vergrößerung von 25.000 aufgenommen.

Tabelle 5.21: Gewählter Bereich 1 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	7,7	29,7
O K	0,9	2,7
Mg K	0,5	0,9
Al K	0,7	1,2
Si K	0	0
Cu K	90,1	65,5

Die Tabelle 5.21 beschreibt das Grundmaterial Kupfer. Diese Analyse dient als Referenzwert für die nachfolgenden Untersuchungen. Im Grundmaterial zeigt sich der Bereich mit den höchsten Konzentrationen an Kohlenstoff, mit 7,7 Gewichtsprozent und Kupfer mit 90,1 Gewichtsprozent.

In Tabelle 5.21 wird der gewählte Bereich 1 aus dem Bereich 1 angeführt. Dabei zeigt sich, dass in diesem Bereich die Verbindung $\eta_2 AlCu$ auftritt. Dies bedeutet, dass eine große Menge an Aluminium die Grenzfläche erreicht. Dies geschieht durch die hohe Dynamik im Schmelzbad.

In Tabelle 5.23 wird der EDX Punkt 2 aus Bereich 1 analysiert. Durch den hohen Anteil von Aluminium wird die Phase $\theta CuAl_2$ vermutet. Dieser Messpunkt weist einen hohen Anteil an Kohlenstoff auf.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Tabelle 5.22: EDX Punkt 1 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	17,1	41
O K	2,6	4,6
Mg K	0,8	0,9
Al K	28,1	30
Si K	0,2	0,2
Cu K	51,3	23,3

Tabelle 5.23: EDX Punkt 2 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	16,0	37,7
O K	2,1	3,8
Mg K	0,5	0,6
Al K	35,9	37,7
Si K	0,1	0,1
Cu K	45,3	20,2

Tabelle 5.24: Gewählter Bereich 2 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	8,0	20,6
O K	2,2	4,2
Mg K	0,9	1,2
Al K	46,4	53,1
Si K	0,3	0,3
Cu K	42,2	20,5

Die Tabelle 5.24 weist ebenfalls einen hohen Aluminiumanteil auf, somit wird hier die Phase $\theta CuAl_2$ vermutet.

Der gewählte Bereich 3 aus Bereich 1 aus Tabelle 5.25 zeigt einen sehr hohen Aluminiumanteil, dies deutet wieder auf die Phase $\theta CuAl_2$ hin. Jedoch befindet sich in diesem Gebiet mehr Aluminium als in der Phase $\theta CuAl_2$. Auffallend ist hierbei auch der hohe Anteil an Kohlenstoff, welcher mit 8,1 Gewichtsprozent angegeben wird.

Auch die Tabelle 5.26 weist einen sehr hohen Aluminiumanteil auf. Hier kann keine Vermutung über die auftretende Phase gestellt werden.

Der gewählte Bereich 5 im Bereich 1 aus Tabelle 5.27 weist einen sehr hohen Anteil an Aluminium auf. Hier kann ebenfalls keine Vermutung zur auftretenden Phase getroffen werden.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Tabelle 5.25: Gewählter Bereich 3 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	8,1	18,8
O K	2,5	4,3
Mg K	1,2	1,4
Al K	61,2	63,3
Si K	0,6	0,6
Cu K	26,5	11,6

Tabelle 5.26: Gewählter Bereich 4 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	6,9	15,5
O K	1,9	3,2
Mg K	0,9	1,0
Al K	72,1	72,3
Si K	0,4	0,4
Cu K	17,8	7,6

Tabelle 5.27: Gewählter Bereich 5 (*Bereich1*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	6,5	15,0
O K	2,2	3,7
Mg K	1,0	1,2
Al K	68,0	70,0
Si K	0,5	0,4
Cu K	21,9	9,6

Die Abbildung 5.61 zeigt den zweiten Bereich, welcher für eine EDX-Analyse herangezogen wurde. Dabei befindet sich dieser Abschnitt im obersten (*Höhe des Aluminiumblechs*) mittleren Bereich der Schweißnaht. Die Abbildung wurde mit einer Vergrößerung von 8000 aufgenommen.

Die Tabelle 5.28 zeigt eine sehr hohe Konzentration an Aluminium. Der Anteil des Kohlenstoffs ist in diesem Bereich geringer als im unteren Bereich der Schweißnaht (*Höhe des Kupferblechs*). Über die auftretende Phase kann keine Aussage getroffen werden.

Im gewählten Bereich 2 aus Bereich 2 zeigt sich aus Tabelle 5.29 eine ähnliche Verteilung der Elemente wie in Tabelle 5.28.

In Abbildung 5.62 wird im Bereich einer makroskopischen Pore eine Elementanalyse

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

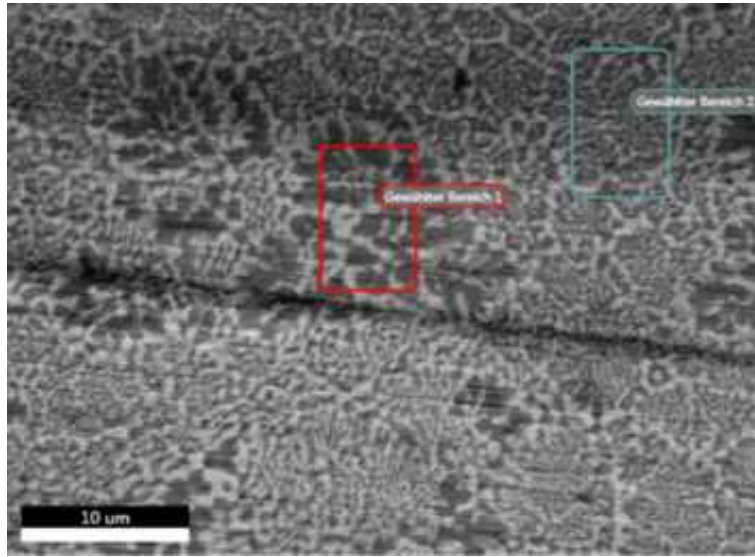


Abbildung 5.61: Bereich 2, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

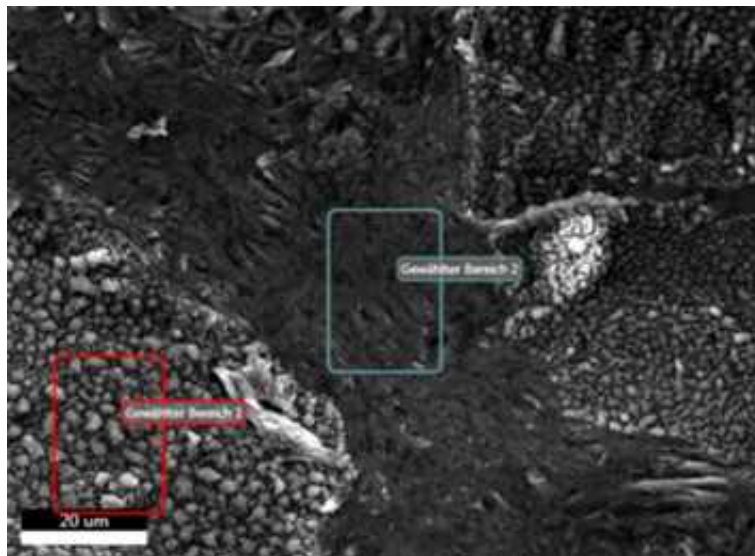


Abbildung 5.62: Bereich 3, Leistung: 1000 W mit Abnahme von 15 %, Vorschub: 5 mm/s, Fokusslage: Mitte, Schutzgas 15 l/Minute, Blechstärke: 1 mm

Tabelle 5.28: Gewählter Bereich 1 (*Bereich2*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	5,5	12,6
O K	2,0	3,4
Mg K	1,3	1,5
Al K	71,2	73,2
Si K	0,8	0,8
Cu K	19,3	8,4

Tabelle 5.29: Gewählter Bereich 2 (*Bereich2*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	6,1	14,3
O K	2,1	3,7
Mg K	1,1	1,3
Al K	68,1	70,5
Si K	0,5	0,5
Cu K	22,0	9,7

mittels EDX durchgeführt. Diese Pore befindet sich in etwa knapp überhalb der Trennebene des Aluminiumblechs und des Kupferblechs. Die Abbildung wurde mit einer Vergrößerung von 3000 aufgenommen.

Tabelle 5.30: Gewählter Bereich 1 (*Bereich3*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	12,0	32,8
O K	4,4	9,1
Mg K	1,3	1,8
Al K	20,0	24,3
Si K	0,1	0,1
Cu K	62,1	32,0

Auffallend ist im gewählten Bereich 1 aus Bereich 3 der hohe Anteil an Kohlenstoff, welcher aus Tabelle 5.30 entnommen werden kann. Dieser hohe Anteil kann mit dem gewählten Bereich 2 aus Bereich 3 mit der Tabelle 5.31 bestätigt werden. Durch den höheren Kupferanteil in beiden Bereichen wird die Phase $\xi_2 Cu_4Al_3$ vermutet. Der Anteil von Magnesium bewegt sich bei den beiden Messungen im unteren Bereich. Dies ist überraschend, da im Bereich der Pore ein hoher Anteil an Magnesium vermutet wurde.

Tabelle 5.31: Gewählter Bereich 2 (*Bereich3*)

Element	Gewicht %	Atom %
C K	13,0	35,9
O K	4,1	8,5
Mg K	0,7	0,9
Al K	16,6	20,3
Si K	0,1	0,1
Cu K	65,4	34,1

5.5.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Kupfer-Kupfer Schweißungen

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der Kupfer-Kupfer Schweißverbindung zeigen kaum Poren im Bereich der Schweißnaht. Dies betrifft auch den oberen Bereich der Schweißnaht, welcher bei den anderen Laserschweißverbindungen stets Poren aufwies.

Die Abbildung 5.63 zeigt eine schematische Darstellung einer Kupfer-Kupfer Schweißnaht.

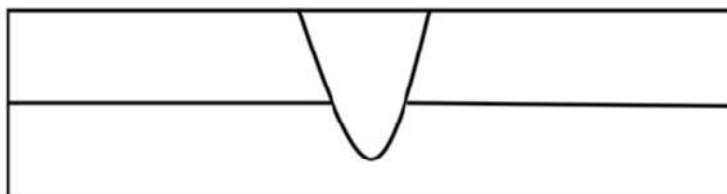


Abbildung 5.63: Skizze einer Kupfer-Kupfer Schweißnaht, Leistung: 5000 W (60% in Kern, 40% in Ring) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Ein typischer Schweißwulst bei den Kupfer-Kupfer Schweißungen mit den Parametern aus T1 wird in Abbildung 5.64 dargestellt. Dabei erkennt man, dass auch im obersten Bereich der Schweißnaht kaum Poren auftreten. Dies zeigt ebenfalls die Abbildung 5.65, welche auf der linken Seite direkt unter dem Schweißwulst aufgenommen wurde.

Die Abbildung 5.66 zeigt ebenfalls kaum Poren und der Werkstoff erscheint homogen, ohne eine nennenswerte Porosität aufzuweisen. Dabei wurde wieder der linke Bereich der Schweißnaht direkt unter dem Schweißwulst gewählt.

Die Abbildung 5.67 zeigt den mittleren Bereich des Schweißwulstes. Diese wurde mit einer 5000 fachen Vergrößerung aufgenommen und weist auch in diesem Bereich kaum Poren oder Porosität auf. Dies wurde mit Abbildung 5.68 und Abbildung 5.69 bekräftigt.

In der Abbildung 5.70 wird der rechte Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißnaht mit den Parametern aus T1 dargestellt, wobei auch hier keine Poren zu erkennen sind.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

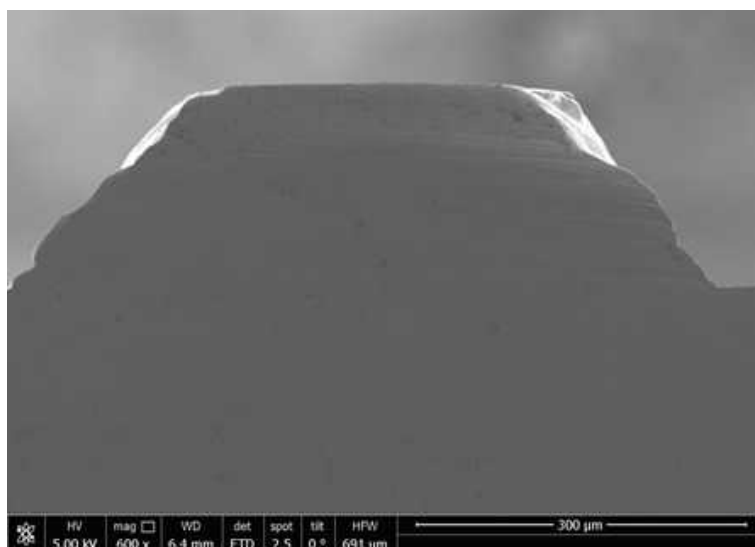


Abbildung 5.64: Oberer mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 600 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokuslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

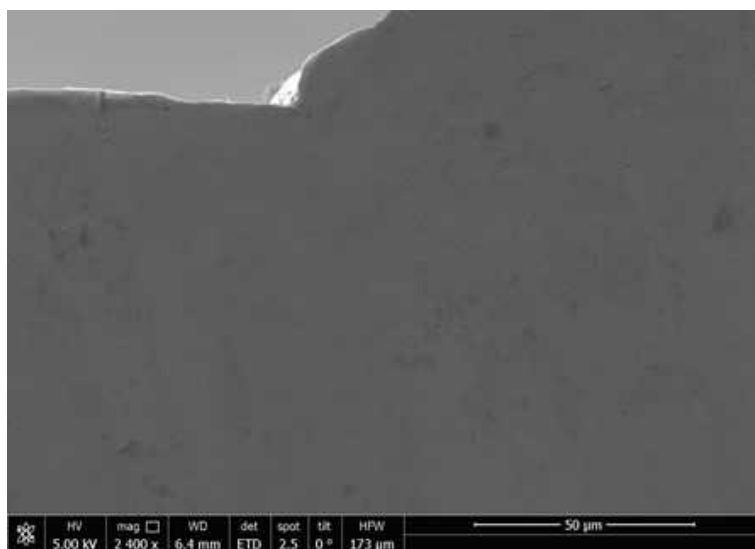


Abbildung 5.65: Oberer linker Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 2400 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokuslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

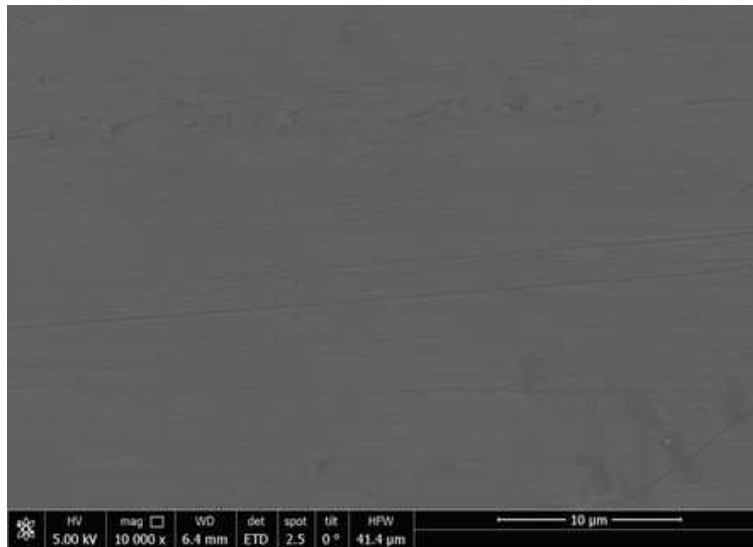


Abbildung 5.66: Oberer linker Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 10000 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokuslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

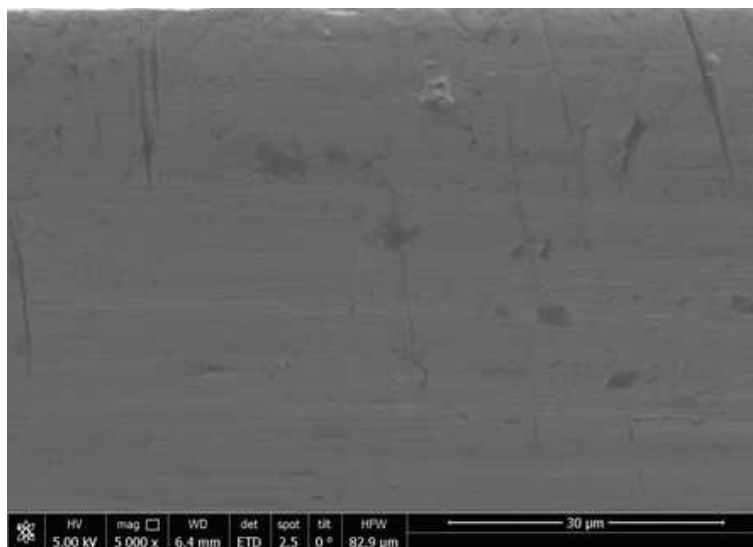


Abbildung 5.67: Schweißwulst mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 5000 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokuslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

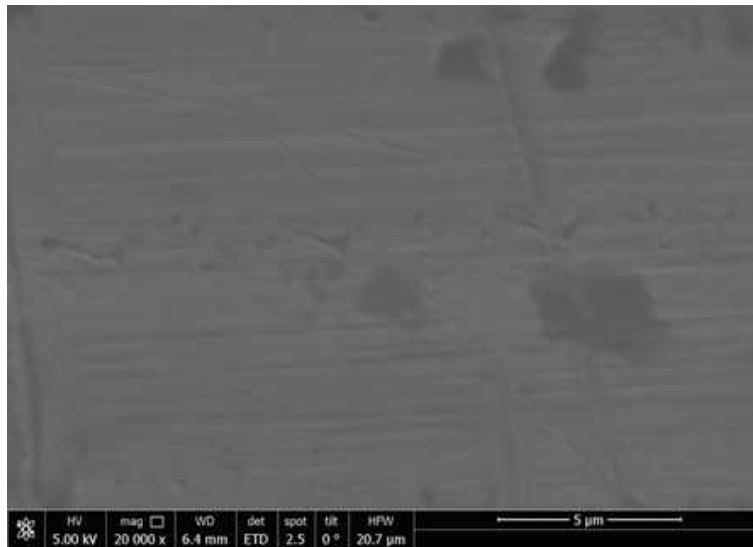


Abbildung 5.68: Schweißwulst mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 20000 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

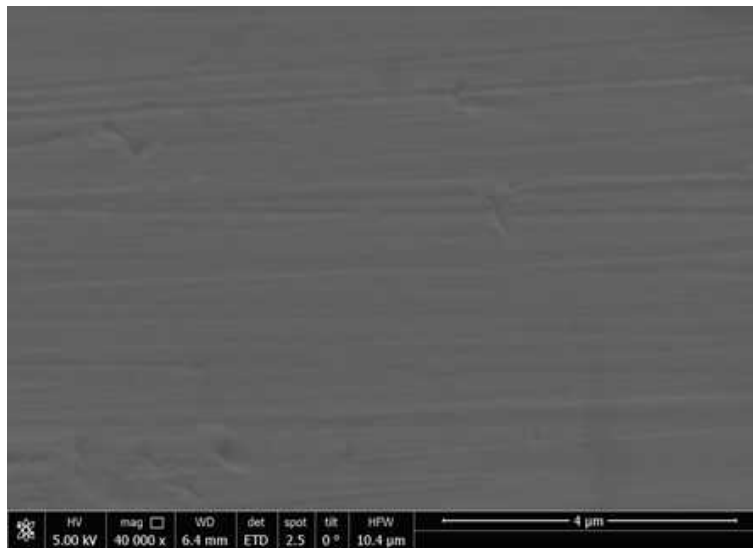


Abbildung 5.69: Schweißwulst mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 40000 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

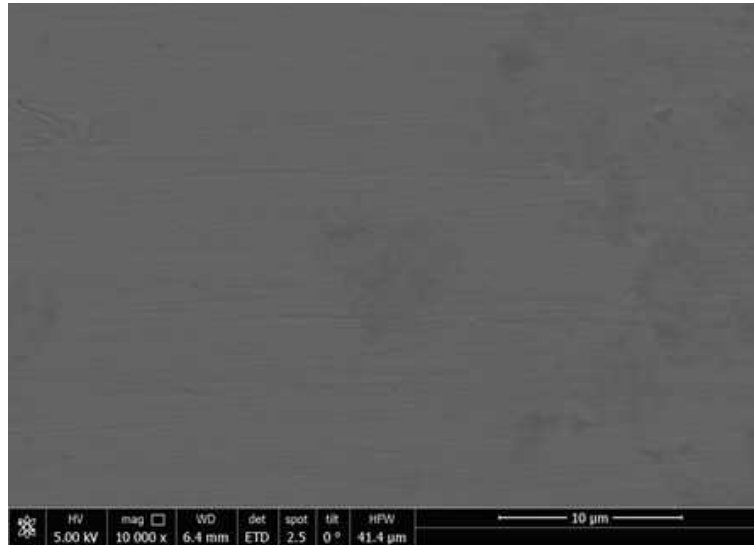


Abbildung 5.70: Schweißwulst rechter Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 10000 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

Der unterste Bereich der Schweißnaht wird in Abbildung 5.71 veranschaulicht. Dieser Bereich ist ebenfalls frei von Poren.

Der mittige Bereich der Schweißnaht, auf Höhe der Mittelebene wird in Abbildung 5.72 veranschaulicht. Wie in den computertomographischen Untersuchungen bereits gezeigt wurde, ist der Bereich der Mittelebene der einzige Bereich in dem Poren aufgetreten sind, bei der Parameterkombination von T1. In dieser Abbildung sind kaum Poren zu erkennen, dies ist aufgrund der in Bezug auf Poren zufällig betrachteten Trennebene.

5 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

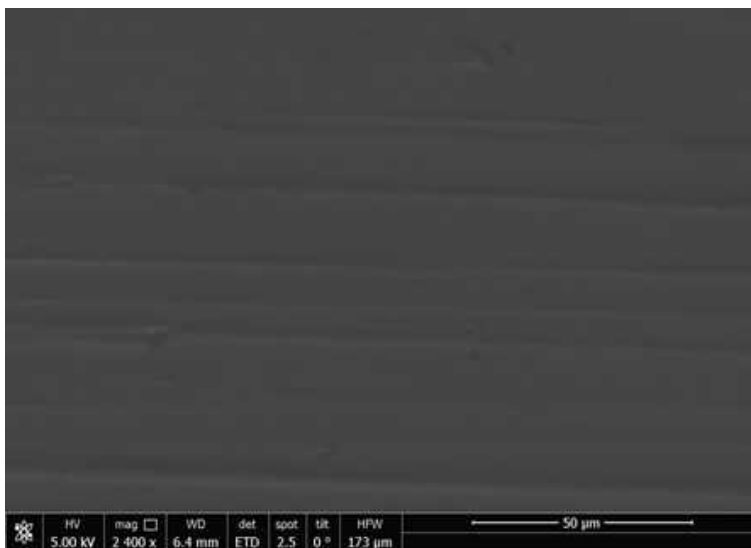


Abbildung 5.71: Unterster mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 2400 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

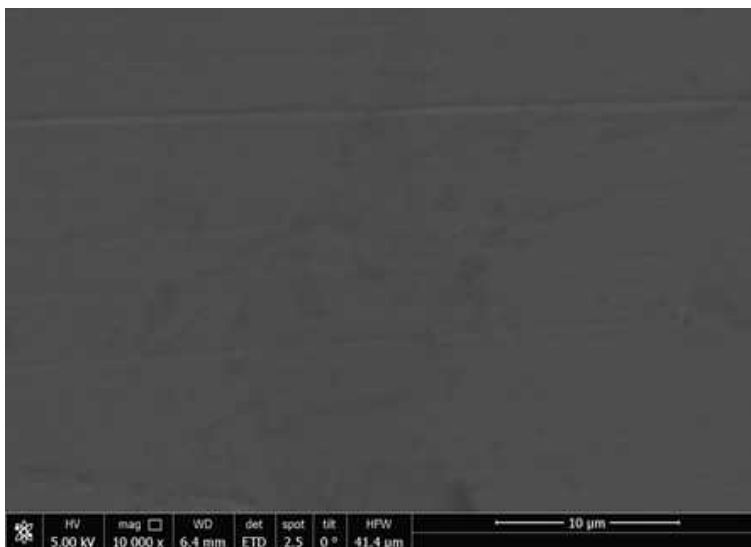


Abbildung 5.72: Mittlerer mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 10000 facher Vergrößerung, Leistung: 5000 W (60% *in Kern*, 40% *in Ring*) 15 %, Vorschub: 250 mm/s, Fokusslage: Oberfläche, Schutzgas: Druckluft, Blechstärke: 1 mm

6 Diskussion

Dieser Abschnitt dient zur kritischen Analyse und Interpretation der durch die durchgeführten Versuche und Analysen gewonnenen Ergebnisse.

Die Vorversuche zeigten, dass die Schutzgaszuführung unter einem Winkel von ungefähr 25 Grad erfolgen sollte, da es sonst bei einem flacheren Winkel zu „Verwehungen“ kommen kann. Ein zu steiler Winkel kann zu Auswürfen des Grundmaterials aus dem Schmelzbad führen. Dieser Umstand ist auf die geringe Viskosität von Aluminium zurückzuführen. Weiters zeigte sich Argon als hinreichende Schutzgasquelle, bezogen auf das Ionisationspotential. Somit ist eine Verwendung von Helium mit einem besseren Ionisationspotential nicht notwendig und es kann die günstigere Variante Argon angewendet werden. Bezüglich der eingebrachten Leistung zeigte sich, dass eine gewisse Mindestleistung notwendig ist um in das Material einzudringen. Dabei stellt der hohe Reflexionsgrad der beiden verwendeten Materialien hohe Anforderungen an die bereitgestellte Laserleistung, da nur ein Teil dieser absorbiert wird. Für die Aluminium-Kupfer Proben erwies sich eine hohe Laserleistung als unabdingbar, da Kupfer einen wesentlich höheren Schmelzpunkt als Aluminium aufweist und auch ein Teil des Kupfers aufgeschmolzen werden muss. Dabei kann die Laserleistung mit der Vorschubgeschwindigkeit variiert werden, um auf eine optimale Streckenenergie zu kommen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fokusslage beim Schweißprozess. Dieser sollte bei Aluminium-Aluminium und Aluminium-Kupfer Verbindungen in der Mittelebene der zu verschweißenden Bleche liegen. Bei der Aluminium-Aluminium Verbindung kann es durch eine zu hoch liegende Fokusslage zu Verbrennungen von Magnesium und zur teilweisen Verdampfung des Grundmaterials kommen. Eine zu tief liegende gewählte Fokusslage kann zu einem instabilen Schweißprozess und somit zu einer totalen Kollabierung des Keyholes und in weiterer Folge zu einem Abbruch des Schweißprozesses führen. Für die Aluminium-Kupfer Verbindung hilft diese Fokusslage für die Aufschmelzung des Kupfers, da somit die höchste Laserleistung an der Oberfläche des Kupferblechs eingebracht wird und dieses somit zum Schmelzen gebracht werden kann. Weiters sollte bei diesen Schweißungen eine Leistungsrampe verwendet werden um eine Überhitzung des Materials und somit eine nicht notwendige Verbreiterung (*stärkere Ausbildung*) der Schweißnaht zu vermeiden. Dabei stellte sich eine Abnahme von 15 % der Laserleistung über eine Länge von 58 mm als optimal heraus. Für die Kupfer-Kupfer Schweißverbindung wurde eine Fokusslage an der Oberfläche gewählt. Somit kann diese mit der maximalen Laserleistung aufgeschmolzen werden und wenn ein Laser mit hoher Strahlqualität verwendet wird, kann in weiterer Folge auch der darunterliegende Bereich aufgeschmolzen werden. Dazu ist jedoch eine hohe Laserleistung vonnöten. Die Abführung der Wärme über die Probenaufnahme zeigte auch einen wesentlichen Einfluss auf die Form der Schweißnaht. Dabei stellte sich eine Schweißunterlage aus Aluminium als beste Lösung heraus. Bei

einer thermischen Isolierung an der Unterseite durch Teflon zeigte sich zwar eine konstante Schweißnaht im mittleren Bereich, jedoch kam es am Ende der Schweißnaht zu einer starken Verbreiterung der Schweißnaht. Dies ist aufgrund der Aufstauung der isothermen Linien, da am Ende der Probe die Wärme nicht mehr so gut abgeleitet werden kann. Dieser Effekt verstärkt sich bei einer Verwendung von Teflon als Schweißunterlage. Zusätzlich haben die intermetallischen Phasen einen größeren Zeitraum für das Wachstum, da eine hohe Temperatur über einen längeren Zeitraum herrscht. Dies ist auf jeden Fall zu vermeiden, da sich dadurch die elektrischen, als auch die mechanischen Eigenschaften verschlechtern. Eine Einspannung aus Stahl führte zu ähnlichen Ergebnissen wie eine Einspannung aus Aluminium, jedoch müssen hier die gewählten Parameter wie Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit angepasst werden, da hier die Wärmeabfuhr etwas geringer ist als bei einer Einspannung aus Aluminium.

Die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit wurden durch die Schweißnaht mittels zwei Kontaktpins mit einem an der Oberseite und einem an der Unterseite durchgeführt. Da die Einschweißtiefe zumindest mit einer geringen empirischen Standardabweichung behaftet ist kann es zu leicht unterschiedlichen Messvoraussetzungen kommen. Diese können auch bei den Aluminium-Kupfer Proben durch das Nichtvorhandensein eines definierten Anschlags während der Messungen auftreten, da dadurch der Strom entweder im Aluminium oder im Kupfer einen weiteren Weg zurücklegt. Bei den gemessenen Kupfer-Kupfer Schweißverbindungen wurde teilweise ein elektrischer Widerstand im Dezimalbereich der Einheit $\mu\Omega$ gemessen, wobei die Auflösung des Messgeräts bei einer Dezimalstelle liegt, somit kann von einer hohen Unsicherheit des Messwerts ausgegangen werden. Bei den Aluminium-Aluminium Proben zeigte sich der höchste elektrische Widerstand. Dies ist zum Teil auf die elektrischen Materialeigenschaften von Aluminium zurückzuführen, da die elektrische Leitfähigkeit dieses Materials geringer ist als bei Kupfer. Weiters kommt der erhöhte elektrische Widerstand durch die hohe Porendichte und die Porosität in der Schweißnaht zustande, welche nur bedingt beeinflussbar ist, da viele Poren durch das im Grundmaterial vorhandene Magnesium verursacht werden. Diese Umstände behindern den elektrischen Fluss in der Schweißnaht. Jedoch könnte die Porosität durch einen zweiten Schweißvorgang zu einem Großteil vermieden werden. Für die Aluminium-Kupfer Proben gilt die Ausbildung der intermetallischen Phasen als einer der Hauptverursacher für die Erhöhung des elektrischen Widerstands. Dieser erhöht sich durch die sich bildenden ionischen und kovalenten Bindungen in der Schweißnaht. Dadurch stehen weniger Elektronen für den Stromtransport zur Verfügung, dies führt zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstands. Weiters ist auch bei den Aluminium-Kupfer Proben die hohe Porendichte eine Behinderung für den Stromfluss durch die Schweißnaht. Bei den Kupfer-Kupfer Proben zeigte sich ein sehr geringer bis kaum messbarer elektrischer Widerstand. Diese Proben zeigten auch die geringste Porendichte aufgrund der Verwendung einer Scanneroptik, welche die Bildung von Poren durch eine Oszillation des Laserstrahls zu einem Großteil vermeidet. Außerdem stellt Kupfer einen sehr guten elektrischen Leiter dar.

Bei den computertomographischen Untersuchungen konnten aufgrund des relativ hohen Aufwands nur wenige Proben untersucht werden. Jedoch konnten die so gewonnenen

Ergebnisse mittels den lichtmikroskopischen Untersuchungen anhand eines Querschliffs bestätigt werden. Auch das Vorhandensein von Magnesium in der Aluminiumlegierung trägt maßgeblich zur Porenbildung bei, welches bei der Materialpaarung Kupfer-Kupfer so gut wie nicht vorhanden ist. Die computertomographischen Untersuchungen zeigen die Dichte sowie auch die Lage der Poren in der Schweißnaht. Diese sind bei den Aluminium-Aluminium und Aluminium-Kupfer Proben in etwa gleich über die Schweißnahtlänge verteilt. Dies deutet auf konstante Bedingungen während des Schweißprozesses hin. Bei den Aluminium-Kupfer Proben kann außerdem die Einschweißtiefe dargestellt werden, da bei dieser Verbindung zwei unterschiedliche Materialien miteinander verschweißt werden, welche in der Auswertung unterschiedlich erscheinen. Hier zeigte sich eine Fluktuation der Einschweißtiefe der Aluminium-Kupfer Proben. Dies könnte zum Teil auf ein instabiles Keyhole während des Schweißprozesses hindeuten. Weiters zeigte sich eine erhöhte Einschweißtiefe am Beginn und am Ende der Schweißnaht, dieser Umstand ist auf den Beschleunigungs- und Abbremsprozess des Roboters bei eingeschaltetem Laser zurückzuführen.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen betrachten stets einen Querschliff der Proben, welche mit einer Trennscheibe geschnitten wurden. Dabei wurden die Proben nicht definiert eingespannt, somit kann es vorkommen, dass die Schnittfläche zur Schweißnaht leicht geneigt ist, dies kann zu leicht verzerrten Ergebnissen bei der Messung der Schweißnahtbreite an der Oberfläche führen. Die Einschweißtiefe kann, die so wie bei den computertomographischen Analysen der Aluminium-Kupfer Proben gut sichtbar ist, variieren und da immer nur die Querschliffe vermessen wurden kann es so zu einer gewissen Unsicherheit bei der Angabe der Einschweißtiefe kommen. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich, dass eine geringe Erhöhung der Laserleistung zu einer deutlichen Steigerung der Einschweißtiefe, beziehungsweise es zu einem Durchschweißen der Proben führte. Dies ist auf die Mehrfachreflexion der Laserstrahlung im Keyhole zurückzuführen. Bei einer Durchschweißung kam es außerdem zu einem vermehrten Aluminiumaustritt bei den Aluminium-Kupfer Proben aus der Schweißnaht, da keine Unterstützung der Schweißnaht an der Unterseite angebracht wurde. Den gleichen Effekt hat eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit, da in beiden Fällen die Streckenenergie erhöht wird. Bei den Aluminium-Kupfer Proben wurde besonders auf eine geringe Vorschubgeschwindigkeit geachtet, um ein teilweises Aufsteigen der Poren in der Schweißnaht zu gewährleisten. Durch dieses Vorgehen kann die Porendichte leicht reduziert werden. Die Schweißnahtbreite zeigte sich bei den Kupfer-Kupfer Proben mit den Parametern T1 am geringsten. Dieses Ergebnis wird aufgrund der hohen eingebrachten Leistung mithilfe einer Scanneroptik und der hohen thermischen Leitfähigkeit von Kupfer vermutet, somit wird nur ein sehr kleiner Bereich durch die auftreffende Laserstrahlung aufgeschmolzen und ein großer Teil der durch den Schweißprozess entstandenen Wärme wird durch das Material abgeführt. Weiters kann durch die hohe Vorschubgeschwindigkeit das aufgeschmolzene Material schnell abkühlen. Bei den Aluminium-Kupfer Proben ergab sich durch die unterschiedlichen Schmelzbereiche der beiden Materialien ein breiteres Schmelzbad im Aluminiumbereich. Dieses lässt sich jedoch kaum vermeiden und ist charakteristisch für diese Verbindung. Dabei wird auch Kupfer durch die hohe Dynamik im Schmelzbad bis

in den obersten Bereich der Schweißnaht transportiert und Aluminium gelangt bis an die Schweißnahtwurzel. Die Aluminium-Aluminium Proben zeigten hingegen eine Form der Schweißnaht von einer quadratischen Funktion mit einer etwas breiteren Schweißnaht. Diese Form deutet darauf hin, dass durch die Dynamik im Schweißbad ein breiterer Bereich im oberen Aluminiumblech aufgeschmolzen wird.

Für eine Vergleichbarkeit wurden für die mechanische Untersuchungen mittels Zugversuch die Rohmaterialien geprüft. Diese wurden mit 1 mm Blechdicke getestet. Die verschweißten Proben hatten ebenfalls eine Blechstärke von 1 mm, wobei diese in einer Überlappanordnung vorlagen. Diese Art der Anordnung beinhaltet ebenfalls eine Scherbelastung und somit einen mehrachsigen Spannungszustand. Dabei erreichten die Aluminium-Aluminium Proben ungefähr 43 % des Rohmaterials Aluminium. Dies kann zum Teil auf die Querschnittsminderung durch Poren zurückgeführt werden. Jedoch zeigten alle Aluminium-Aluminium Proben ein duktileres Verhalten, dies belegten auch die sichtbaren Verformungen der zerstörten Schweißnähte. Die beiden untersuchten Proben, welche an den Kontaktflächen angeschliffen wurden zeigten keine wesentliche Erhöhung der Zugfestigkeit. Somit kann darauf geschlossen werden, dass die Bildung von Poren durch Magnesium einen wesentlich größeren Einfluss auf die Zugfestigkeit ausüben als die Bildung von Aluminiumoxid. Die Aluminium-Kupfer Schweißverbindung erreichten hingegen nur ungefähr 18 % des Grundmaterials Aluminium. Dies ist ebenfalls auf die starke Porenbildung und auf die stark ausgeprägte Bildung von intermetallischen Phasen zurückzuführen, welche eine Verformung durch ihre hohe Härte während des Zugversuchs behindern. Die Aluminium-Kupfer Verbindungen versagten zu einem großen Teil in der Schweißnahtwurzel an der sich ein intermetallischer Phasensaum bildet. Die Kupfer-Kupfer Proben erreichten bei den Zugversuchen eine Zugfestigkeit von ungefähr 36 % des Grundmaterials. Die Parameter T3 hingegen erreichten mit einer unterschiedlichen Ausrichtung der Bleche und ansonsten gleichen Parametern wie T1 39 % des Grundmaterials von Kupfer. Am besten schnitt bei den Zugversuchen die Parameterwahl T2 ab, welche ungefähr 77 % der Zugfestigkeit des Grundmaterials erreichte. Die Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern von T4 erreichten zirka 48 % der Zugfestigkeit des Grundmaterials. Die Kupfer-Kupfer Proben kamen auf hohe Zugfestigkeiten, dies ist vor allem auf die kaum vorhandene Porenbildung zurückzuführen. Hier erreichten die Proben mit den Parametern aus T2 hohe Werte für die Zugfestigkeit. Durch die Verfahrensweise des Wobbelns kann eine breite Verbindung mit einer sehr geringen Anzahl an Poren hergestellt werden. Somit verringert sich auch die Scherbelastung der Schweißnaht, da die Schweißnahtbreite auch im Bereich der Kontaktfläche vergleichsweise groß ist.

Bei den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen konnten, außer bei den Aluminium-Kupfer Proben, die Durchmischung aufgrund der gleichen Materialien im Schmelzbad nicht untersucht werden. Jedoch konnten auch sehr kleine Poren in der Schweißnaht aufgespürt werden. Bei den Aluminium-Aluminium Proben kann wegen der hohen Porosität eine Gasdichtheit nicht gewährleistet werden. Diese Porosität und hohe Porendichte ergibt sich aufgrund des Wasserstoffs und des Magnesiums im Grund-

material. Somit kann diese nur sehr schwer vermieden werden. Abhilfe könnte hierbei ein zweiter Schweißvorgang schaffen, wobei das Material ein zweites Mal aufgeschmolzen wird und somit die Gaseinschlüsse entweichen können. Bei den Aluminium-Kupfer Proben konnte aufgrund der beiden unterschiedlichen Materialien die Durchmischung in der Schweißnaht gut dargestellt werden. Dabei konnte Kupfer sogar in den obersten Bereichen der Schweißnaht festgestellt werden. Die Verbindung von Aluminium-Kupfer zeigt viele intermetallische Phasen in der Schweißnaht. Dabei wurde an der Grenzfläche zu Kupfer die Phase $AlCu$ detektiert. Dies lässt auf einen hohen Aluminiumtransport bis in den Bereich der Schweißnahtwurzel hin schließen. Dies ist aufgrund der hohen Dynamik im Schmelzbad und der geringen Viskosität von Aluminium im flüssigen Zustand. Die Phase $CuAl_2$ wurde neben der Grenzfläche im Aluminium-Kupfer Bereich detektiert. Dies ergibt sich jedoch auch aus der Tatsache, dass während des Schweißprozesses mehr Aluminium als Kupfer aufgeschmolzen wird und somit ein hoher Aluminiumanteil im Schmelzbad vorliegt. Ein höherer Anteil an Kupfer wurde nur im Bereich einer Pore gemessen, dabei wurde die Phase Cu_4Al_3 vermutet. Dieser Umstand könnte auf ein vor sich herschieben von Kupfer an der Erstarrungsfront interpretiert werden. Durch den hohen Anteil an Aluminium werden vermutlich vorwiegend aluminiumreiche Phasen gebildet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In den Vorversuchen (*Parameterfindung Aluminium – Aluminium*, *Parameterfindung Aluminium – Kupfer*) wurde gezeigt, dass die eingebrachte Leistung mit der Einschweißtiefe und mit der Schweißnahtbreite korreliert. Wird die eingebrachte Leistung gesteigert, so erhöht sich infolgedessen die Einschweißtiefe und die Schweißnahtbreite. Die gewählte Vorschubgeschwindigkeit hat ebenso einen großen Einfluss auf die Geometrie der Schweißnaht, da diese neben der eingebrachten Leistung die Streckenenergie charakterisiert. Eine zu hohe Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer unzureichenden Verbindung der Bleche, wohingegen eine zu niedrig gewählte Vorschubgeschwindigkeit zu einer Verdampfung und starken Oxidation des Materials führen kann. Der Laserstrahl sollte auf die Mitteleben der beiden Proben fokussiert werden, da es sonst zu einer starken Verbrennung des Magnesiums in Aluminiumlegierungen oder zu einem instabilen Schweißprozess kommen kann. Die Unterlage der Proben hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Ergebnis des Schweißprozesses, da diese die Abfuhr der Wärme, welche während des Schweißprozesses entsteht, wesentlich mitbestimmt. Dabei ist eine gute Wärmeabfuhr in die Probeneinspannung zu bevorzugen. Bei einer Aluminium-Kupfer Verbindung entsteht somit ebenfalls das Problem, dass die intermetallischen Phasen einen längeren Zeitraum für das Wachstum haben und es dadurch zu einem höheren elektrischen Widerstand und zu einer Abnahme der Zugfestigkeit kommt. Jedoch steigt somit auch die benötigte Leistung, da die Absorption des Materials mit steigender Temperatur zunimmt. Die Zuführung des Schutzgases kann bei einer zu flachen Einstellung und einer sehr hohen Schutzgasmenge zu „Verwehungen“ im Schmelzbad führen. Die Verwendung von Helium als Schutzgas brachte keine signifikanten Verbesserungen der Schweißnaht im Vergleich zur Verwendung von Argon als Schutzgas.

Der elektrische Widerstand wurde mittels zwei Kontaktpins, jeweils an der Ober- und an der Unterseite mit einem horizontalen Abstand von 6 mm durch die Schweißnaht gemessen. Den höchsten elektrischen Widerstand wiesen die Aluminium-Aluminium Schweißproben mit einem Mittelwert von $3,3 \mu\Omega$ auf, gefolgt von den Aluminium-Kupfer Schweißnähten mit einem Mittelwert von $2,03 \mu\Omega$. Die geringsten Werte dieser Messung erreichten die Kupfer-Kupfer Proben, dabei ergab sich bei der T1 Parameterkombination ein Mittelwert von $0,59 \mu\Omega$. Der elektrische Widerstand der T2 Parameterkombination mit Wobbeln konnte nicht gemessen werden, da hierfür die Auflösung des Messgerätes zu gering war. Die Parameterkombination T3, welche sich nur durch die Ausrichtung der Bleche von T1 unterscheidet, erreichte einen Mittelwert des elektrischen Widerstands von $0,1 \mu\Omega$. Bei den Proben mit den Parametern T4 wurde ein Mittelwert von $0,38 \mu\Omega$ gemessen.

Die computertomographischen Untersuchungen zeigten eine hohe Porendichte bei den Aluminium-Aluminium, als auch bei den Aluminium-Kupfer Verbindungen. Dabei traten die Poren in den oberen sowie in den unteren Bereichen der Schweißnaht auf. Die Poren in den unteren Bereichen werden zum Großteil durch ein Kollabieren des Keyholes hervorgerufen. Auch die Größe der Poren variiert bei diesen beiden Materialpaarungen stark. Die Kupfer-Kupfer Schweißverbindungen wiesen hingegen kaum Poren im Bereich der Schweißnaht auf.

Bei den lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden die Einschweißtiefe und die Schweißnahtbreite anhand von Querschliffen vermessen. Diese Messungen wurden bei jeder untersuchten Probe jeweils in der Mitte und gegen Ende der Schweißnaht durchgeführt. Die mittlere Schweißnahtbreite aller gemessenen Werte für die Aluminium-Aluminium Schweißverbindung beläuft sich auf 1,99 mm, wobei der Mittelwert für die Einschweißtiefe aller Werte bei 0,43 mm liegt. Für die Aluminium-Kupfer Materialpaarung wird eine mittlere Schweißnahtbreite von 2,26 mm angegeben, bei einer mittleren Einschweißtiefe von 0,46 mm aller gemessenen Aluminium-Kupfer Proben. Bei den Kupfer-Kupfer Proben wurden nur die Parameterkombinationen T1 und T4 mittels Lichtmikroskop untersucht. Dabei ergab sich bei der Parameterkombination T1 eine mittlere Schweißnahtbreite von 0,60 mm, bei einer mittleren Einschweißtiefe von 0,54 mm. Die Parameterkombination T4 lieferte eine mittlere Schweißnahtbreite von 1,11 mm, mit einer mittleren Einschweißtiefe von 0,33 mm. Die höhere Schweißnahtbreite bei der Parameterkombination T4 ist dabei auf einen größeren Faserdurchmesser des Lichtlaserkabels zurückzuführen.

Die Zugversuche wurden durchgeführt um die Maximalkraft und darausfolgend die Zugfestigkeit, welche auf die tatsächliche Breite bezogen wurde, zu bestimmen. Diese Zugversuche wurden für die beiden Rohmaterialien, als auch für die unterschiedlichen Materialpaarungen durchgeführt, wobei auch an den Kontaktflächen angeschliffene Aluminium-Aluminium Proben getestet wurden. Dabei wurde eine durchschnittliche Zugfestigkeit des Rohmaterials von 183,58 N/mm² bei Aluminium und 255,91 N/mm² bei Kupfer festgestellt. Bei den an den Kontaktflächen angeschliffenen Aluminium-Aluminium Schweißverbindungen wurde bei der Zugfestigkeit ein Mittelwert von 77,45 N/mm² erreicht, wohingegen bei gleicher Materialpaarung ohne mechanischer Bearbeitung der Kontaktflächen ein Mittelwert von 78,85 N/mm² berechnet wurde. Die Aluminium-Kupfer Schweißverbindungen erreichten den niedrigsten Wert der mittleren Zugfestigkeit mit 33,51 N/mm². Die höchsten Werte wurden bei der Materialpaarung Kupfer-Kupfer erreicht, dabei konnte bei der Parameterkombination T1 eine mittlere Zugfestigkeit von 91,55 N/mm² erzielt werden, die Parameterkombination T3, welche sich nur in der Ausrichtung der Bleche von T1 unterscheidet, kommt dabei auf einen Mittelwert von 100,53 N/mm². Die Kombination der Parameter von T2, welche mittels Wobbeln durchgeführt wurde, erreichte den höchsten Mittelwert mit 198,20 N/mm². Mithilfe der Parameterkonfiguration T4 wurde eine mittlere Zugfestigkeit von 122,61 N/mm² erreicht.

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden in Kooperation mit dem TU-Wien Forschungszentrum für Elektronenmikroskopie-USTEM durchgeführt. Dabei zeigte sich bei der Aluminium-Aluminium Schweißverbindung eine hohe Porosität, diese trat verstärkt im oberen Bereich der Schweißnaht auf. Auch größere Poren konnten mittels rasterelektronenmikroskopischer Untersuchung ausfindig gemacht werden. Die Aluminium-Kupfer Proben zeigten hingegen eine geringere Porosität als die Aluminium-Aluminium Proben. Jedoch wurde hier eine starke Durchmischung der Materialpartner im Schmelzbad festgestellt, dabei konnte Kupfer bis in die obersten Bereiche der Schweißnaht mittels EDX-Analyse detektiert werden. Ein Auftreten von intermetallischen Phasen konnte schon im äußersten Randbereich der Schweißnaht nachgewiesen werden. Eine Zuordnung der intermetallischen Phasen mittels Literaturhinweise konnte nur teilweise durchgeführt werden, da die Elementbestimmungen mit zum Teil großen Unsicherheiten behaftet sind. Weiters konnte in den makroskopischen Poren an deren Oberfläche keine überdurchschnittliche Konzentration an Magnesium festgestellt werden. Die Kupfer-Kupfer Materialpaarung zeigte im Vergleich zu den beiden anderen kaum Poren. Es wurden kaum Poren im makroskopischen sowie im mikroskopischen Bereich festgestellt.

7.2 Ausblick

Diese Diplomarbeit hat die unterschiedlichen Charakteristika der verschiedenen, mittels Hochleistungslaser geschweißten Materialpaarungen gezeigt. Im Laufe dieser Arbeit haben sich weitere Vorschläge für weiterführende Arbeiten herauskristallisiert, dies ist aufgrund der Tatsache, dass die Entwicklung der bereitgestellten Maschinen stets voranschreitet und das Anwendungsgebiet von Lasern immer weiter wächst.

Da die Einspannung der Proben einen wesentlichen Beitrag zur Wärmeabfuhr während des Schweißprozesses beitragen, stellt diese einen nicht zu unterschätzenden Parameter für die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht dar. In dieser Arbeit wurden nur im Zuge der Vorversuche zwei verschiedene Einspannungen verwendet, dabei handelte es sich um eine Einspannung aus Stahl und um eine Einspannung aus Aluminium. Dabei zeigten sich bei ansonsten gleicher Parameterwahl, nur aufgrund der thermischen Leitfähigkeit, zwei vollkommen unterschiedliche Schweißnähte.

Weiters wurden in dieser Arbeit keine Versuche mittels Lasers mit einer Laserstrahlung im grünen Wellenlängenbereich durchgeführt. Diese Art von Laser können sowohl zum Tiefenschweißen, als auch zum Wärmeleitungsschweißen eingesetzt werden. Diese beiden Schweißverfahren könnten im Hinblick auf die elektrischen und auch mechanischen Eigenschaften miteinander verglichen werden.

Durch ein Vorwärmen und Halten der Proben auf erhöhter Temperatur während des Schweißvorgangs kann ebenso zu einer Verbesserung und Stabilisierung des Schweißprozesses führen. Diese Thematik wurde in dieser Arbeit nicht behandelt, da die Proben

7 Zusammenfassung und Ausblick

durchgehend bei Raumtemperatur miteinander verschweißt wurden.

Die stetig steigende Leistung der verfügbaren Laser mit den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen eröffnen stets neue Anwendungsgebiete für Hochleistungslaser. Somit können Materialien, Nahtanordnungen und Materialstärken bearbeitet werden, welche zuvor nur mit anderen Schweißverfahren anhand einer aufwendigen Nahtvorbereitung miteinander verschweißt werden konnten.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Absorptionsgrad unterschiedlicher Materialien[22]	12
2.2	Ausscheidungsformen eines übersättigten Mischkristalls[7]	13
2.3	Risshäufigkeit von Aluminiumschweißnähten[9]	14
2.4	Wasserstofflöslichkeit in Aluminium[38]	15
2.5	Unterschied zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen[24] .	15
2.6	Absorption von Kupfer bei Raumtemperatur[15]	18
2.7	Wärmeleitungsschweißnaht in Kupfer mit grünem Laser[14]	18
2.8	a) Nahtoberseite und b) dazugehöriger Längsschliff[14]	19
2.9	Spritzerarmer Tiefschweißprozess von Kupfer mit grünem Laserstrahl[14] .	19
2.10	Einfluss der Kupferoberfläche[14]	20
2.11	Abmessungen der Überlappverbindungen für dünne Bleche[18]	21
2.12	Vorgehensweise beim Wobbeln[18]	22
2.13	Einschweißtiefe mit einer Brennweite von 160 mm[18]	22
2.14	Schweißnahtbreite mit einer Brennweite von 160 mm[18]	23
2.15	Linearer Vorschub, F= 160 mm, Al-Cu[18]	24
2.16	Linearer Vorschub, F= 160 mm, Cu-Al[18]	24
2.17	SEM-EDS Aufnahmen für teilweise Schweißung (Al-Cu), F= 160 mm[18] .	25
2.18	Werkstoffzusammensetzung Zone 1 (Kontaktfläche) Al-Cu, F= 160 mm[18]	26
2.19	Werkstoffzusammensetzung Zone 2 (mittlerer oberer Bereich) Al-Cu, F=	
	160 mm[18]	26
2.20	SEM-EDS Aufnahmen für teilweise Schweißung (Cu-Al), F= 160 mm[18] .	27
2.21	Werkstoffzusammensetzung Zone 1 (Kontaktfläche) Cu-Al, F= 160 mm[18]	27
2.22	Werkstoffzusammensetzung Zone 2 (mittlerer unterer Bereich) Cu-Al, F=	
	160 mm[18]	28
2.23	Schweißnaht mittels Wobbeln[18]	29
2.24	Versuchsaufbau Zugfestigkeit Fortunato und Ascari[18]	30
2.25	Setup für Laserschweißen von Aluminium[2]	32
2.26	Mikroporen in der Querschnittsfläche der Schweißnaht[2]	33
2.27	Ausbildung von Makro-Poren in Abhängigkeit der Defokussierung[2] . . .	34
2.28	Querschliffe einer Schweißnaht mit instabilem Keyhole[2]	34
2.29	EDS-Scan einer Schweißnaht[2]	35
2.30	Magnesiumanteil senkrecht zur Schweißnaht[2]	36
2.31	Vickers Härte senkrecht zur Schweißnaht[2]	36
3.1	Lage der Schweißnaht bei den Vorversuchen	39
3.2	Lage der Schweißnaht bei den ausgewerteten Proben	40
4.1	Schnellübersicht Parameter Aluminium-Aluminium	46
4.2	Probe 59 anhand eines Querschliffes	47

Abbildungsverzeichnis

4.3	Al-Al 1 Darstellung der äußeren Erscheinung der Schweißnaht	47
4.4	Probe 55 mit durchgeschweißter Schweißnaht	47
4.5	Probe 44 Aluminium-Aluminium	48
4.6	Probe 49 Aluminium-Aluminium	48
4.7	Probe 43 Aluminium-Aluminium	49
4.8	Schutzgaszuführung Großaufnahme	50
4.9	Schutzgaszuführung Nahaufnahme	50
4.10	Schweißnahtoberseite der Probe 59	51
4.11	Schweißnahtoberseite der Probe 60	52
4.12	Schweißnahtoberseite der Probe 50	53
4.13	Schweißnahtoberseite der Probe 55	54
4.14	Al-Al 15 angeschliffen und Al-AL 2 nicht angeschliffen	54
4.15	Querschliffe der Probe 21 und der Probe 27	56
4.16	Probe 24 Aluminium-Kupfer	56
4.17	Probe 21 Aluminium-Kupfer	57
4.18	Querschliffe der Probe 24 und der Probe 21	57
4.19	Fokuslage liegt 1mm oberhalb der Mittelebene Aluminium-Kupfer	58
4.20	Fokuslage liegt in der Mittelebene Aluminium-Kupfer	58
4.21	Fokuslage liegt 0,5mm unterhalb der Mittelebene Aluminium-Kupfer	58
4.22	Probe 64 Aluminium-Kupfer auf Stahlunterlage verschweißt	60
4.23	Probe 66 Aluminium-Kupfer auf Teflonunterlage in einer Stahleinspannung verschweißt	60
4.24	CT Aufnahme Längsschliff Probe 26 Aluminium-Kupfer	61
4.25	CT Aufnahme Längsschliff Probe 27 Aluminium-Kupfer	61
4.26	CT Aufnahme Längsschliff Probe 28 Aluminium-Kupfer	62
4.27	Probe 27 Querschliff Poren Aluminium-Kupfer	62
4.28	Probe 33 Querschliff Poren Aluminium-Kupfer	63
4.29	Probe 93 mit länglicher Pore	63
4.30	Probe 93 Nahtoberseite	64
4.31	Probe 35 Aluminiumaustritt Aluminium-Kupfer	64
4.32	Probe 35 Querschliff Aluminiumaustritt Aluminium-Kupfer	65
4.33	Probe 83 Nahtoberseite Aluminium-Kupfer	65
4.34	Probe 83 Querschliff Aluminium-Kupfer-1	66
4.35	Probe 83 Querschliff Aluminium-Kupfer-2	66
4.36	Anfang einer Schweißnaht Aluminium-Kupfer	67
4.37	Ende einer Schweißnaht Aluminium-Kupfer Probe 26	68
5.1	Probenaufnahme für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit	71
5.2	Schnittdarstellung der Probenaufnahme für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit	71
5.3	Al-Al 56 Anfang Längsschliff	74
5.4	Al-Al 56 Anfang Oberfläche	75
5.5	Al-Al 56 Ende Längsschliff	75
5.6	Al-Al 56 Ende Oberfläche	76

Abbildungsverzeichnis

5.7	Al-Cu 46 Anfang Längsschliff	76
5.8	Al-Cu 46 Anfang Einschweißtiefe	77
5.9	Al-Cu 46 Ende Längsschliff	77
5.10	Al-Cu 46 Ende Einschweißtiefe	78
5.11	Cu-Cu T1 Mittelebene	78
5.12	Cu-Cu T1 Längsschliff	79
5.13	Cu-Cu T1 Lage	79
5.14	Betrachtungsebenen der Querschliffe für lichtmikroskopische Untersuchungen	80
5.15	Querschliff Probe Al-Al 32 Ende	80
5.16	Querschliff Probe Al-Al 35 Ende	81
5.17	Querschliff Probe Al-Al 36 Ende	81
5.18	Querschliff Probe Al-Cu 3 Ende	83
5.19	Querschliff Probe Al-Cu 12 Ende	84
5.20	Querschliff Probe Al-Cu 7 Ende	84
5.21	T1 Mitte	87
5.22	T1 Ende	87
5.23	T4 Mitte	87
5.24	T4 Ende	88
5.25	Aluminium Rohmaterial 1	91
5.26	Kupfer Rohmaterial 1	92
5.27	Al-Al 40 Bruchfläche Vorderseite Zugversuch	93
5.28	Al-Al 15 angeschliffen Zugversuch	93
5.29	Al-Al 1 Zugversuch	94
5.30	Al-Al 4 Zugversuch	95
5.31	Al-Cu 28 Bruchfläche Aluminiumbereich neben der Schweißnaht	95
5.32	Al-Cu 20 Bruchfläche Schweißnahtwurzel Kupferbereich	97
5.33	Al-Cu 19 Zugversuch	97
5.34	Al-Cu 28 Zugversuch	98
5.35	T 1 Bruchfläche Vorderseite Zugversuch	98
5.36	T ₁ Zugversuch100	
5.37	T 2 Oberseite Bruchfläche Zugversuch	101
5.38	T ₂ Zugversuch101	
5.39	T 4 Vorderseite Bruchfläche Zugversuch	102
5.40	T ₄ 1Zugversuch103	
5.41	Skizze einer Aluminium-Aluminium Schweißnaht	104
5.42	Oberer Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 40000 facher Vergrößerung	104
5.43	Ganz oben einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 2400 facher Vergrößerung	105
5.44	Mittlerer Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 8000 facher Vergrößerung	106
5.45	Unterer Bereich einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 2000 facher Vergrößerung	106

Abbildungsverzeichnis

5.46	Gesamte Schweißnaht einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 70 facher Vergrößerung	107
5.47	Große Pore einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung mit 1200 facher Vergrößerung	107
5.48	Skizze einer Aluminium-Kupfer Schweißnaht	108
5.49	Oberer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung	108
5.50	Oberer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 10000 facher Vergrößerung	109
5.51	Oberer mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 10000 facher Vergrößerung	110
5.52	Oberer mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 20000 facher Vergrößerung	110
5.53	Rechte Grenzfläche einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung	111
5.54	Rechte obere Seite einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 10000 facher Vergrößerung	111
5.55	Linke untere Seite einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 4000 facher Vergrößerung	112
5.56	Linke untere Seite einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 16000 facher Vergrößerung	112
5.57	Untester mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung	113
5.58	Unterer mittlerer Bereich einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung	114
5.59	Große Pore einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung mit 5000 facher Vergrößerung	114
5.60	EDX-Analyse 1	115
5.61	Bereich 2	118
5.62	Bereich 3	118
5.63	Skizze einer Kupfer-Kupfer Schweißnaht	120
5.64	Oberer mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 600 facher Vergrößerung	121
5.65	Oberer linker Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 2400 facher Vergrößerung	121
5.66	Oberer linker Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 10000 facher Vergrößerung	122
5.67	Schweißwulst mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 5000 facher Vergrößerung	122
5.68	Schweißwulst mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 20000 facher Vergrößerung	123
5.69	Schweißwulst mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 40000 facher Vergrößerung	123

Abbildungsverzeichnis

5.70 Schweißwulst rechter Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 10000 facher Vergrößerung 124

5.71 Unterster mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 2400 facher Vergrößerung 125

5.72 Mittlerer mittlerer Bereich einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung mit den Parametern T1 mit 10000 facher Vergrößerung 125

Tabellenverzeichnis

2.1	Phasen Kupfer-Aluminium	17
4.1	Parameter ausgewählter Proben Aluminium-Aluminium	46
4.2	Resultierende Einschweißiefen und Schweißnahtbreiten bei unterschiedlichen Laserleistungen	55
5.1	Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Aluminium Schweißverbindung	72
5.2	Elektrischer Widerstand einer Aluminium-Kupfer Schweißverbindung . . .	72
5.3	Elektrischer Widerstand einer Kupfer-Kupfer Schweißverbindung	73
5.4	Schweißnahtbreite Aluminium-Aluminium	82
5.5	Einschweißtiefe Aluminium-Aluminium	82
5.6	Schweißnahtbreite Aluminium-Kupfer	85
5.7	Einschweißtiefe Aluminium-Kupfer	86
5.8	Schweißnahtbreite Kupfer-Kupfer T1	88
5.9	Einschweißtiefe Kupfer-Kupfer T1	89
5.10	Schweißnahtbreite Kupfer-Kupfer T4	89
5.11	Einschweißtiefe Kupfer-Kupfer T4	90
5.12	Zugversuch des Rohmaterials Aluminium	91
5.13	Zugversuch des Rohmaterials Kupfer	92
5.14	Zugversuch der Parameterkonfiguration Aluminium-Aluminium (angeschliffen)	94
5.15	Zugversuch der Parameterkonfiguration Aluminium-Aluminium	96
5.16	Zugversuch der Parameterkonfiguration Aluminium-Kupfer	99
5.17	Zugversuch der Parameterkonfiguration T1	99
5.18	Zugversuch der Parameterkonfiguration T3	100
5.19	Zugversuch der Parameterkonfiguration T2	102
5.20	Zugversuch der Parameterkonfiguration T4	102
5.21	Gewählter Bereich 1 (<i>Bereich1</i>)	115
5.22	EDX Punkt 1 (<i>Bereich1</i>)	116
5.23	EDX Punkt 2 (<i>Bereich1</i>)	116
5.24	Gewählter Bereich 2 (<i>Bereich1</i>)	116
5.25	Gewählter Bereich 3 (<i>Bereich1</i>)	117
5.26	Gewählter Bereich 4 (<i>Bereich1</i>)	117
5.27	Gewählter Bereich 5 (<i>Bereich1</i>)	117
5.28	Gewählter Bereich 1 (<i>Bereich2</i>)	119
5.29	Gewählter Bereich 2 (<i>Bereich2</i>)	119
5.30	Gewählter Bereich 1 (<i>Bereich3</i>)	119
5.31	Gewählter Bereich 2 (<i>Bereich3</i>)	120

Literatur

- [1] V Alfieri u. a. „Investigation on porosity content in 2024 aluminum alloy welding by Yb: YAG disk laser“. In: *Advanced Materials Research*. Bd. 383. Trans Tech Publ. 2012, S. 6265–6269.
- [2] Vittorio Alfieria, Fabrizia Caiazzo und Vincenzo Sergi. „Autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy: process issues and bead features“. In: *Procedia Cirp* 33 (2015), S. 406–411.
- [3] JM Sánchez Amaya, MR Amaya-Vázquez und FJ Botana. „Laser welding of light metal alloys: aluminium and titanium alloys“. In: *Handbook of laser welding technologies*. Elsevier, 2013, S. 215–254.
- [4] Salahaddin Anik und Lutz Dorn. *Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen- Werkstoffliche Grundlagen*. Schweißen und Schneiden Nr. 12. 1987.
- [5] ST Auwal u. a. „A review on laser beam welding of copper alloys“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96.1 (2018), S. 475–490.
- [6] Jean Pierre Bergmann, Franziska Petzoldt und Stefan Schneider. „Einfluss intermetallischer Phasen auf die Langzeitstabilität von Kupfer-Aluminium-Kontakten“. In: *Thüringer Werkstofftag* (2013).
- [7] H Böhm. „Einführung in die Metallkunde, BI Hochschultaschenbuch“. In: *Mannheim: Bibliographisches Institut* (1992), S. 71.
- [8] Milenko Braunovic, Nikolai K Myshkin und Valery V Konchits. *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*. CRC press, 2017.
- [9] P Brenner. „Entwicklung von Aluminiumlegierungen mit hoher Festigkeit im geschweißten Zustand“. In: *Aluminium* 43.4 (1967), S. 225–238.
- [10] Wissenschaft und Forschung Bundesministerium für Bildung. URL: https://forschungsinfrastruktur.bmbwf.gv.at/de/fi/keyence-vhx-5000-digitalmikroskop_3548.
- [11] Trumpf Laser Cell. *Tru Laser Cell 3000*. URL: https://www.trumpf.com/de_AT/produkte/maschinen-systeme/laserschweissanlagen-und-lichtbogenschweisszelle/trulaser-cell-3000/.
- [12] Chih-Yuan Chen und Weng-Sing Hwang. „Effect of annealing on the interfacial structure of aluminum-copper joints“. In: *Materials transactions* (2007), S. 0706110009–0706110009.
- [13] Ulrich Dilthey. *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*. Springer-Verlag, 2006.

- [14] EM Dold u. a. „Qualitativ hochwertige Kupferschweißungen durch grüne Hochleistungsdauerstrichlaser“. In: *Metall* 72 (2018), S. 457–459.
- [15] U Dürr. „Reproduzierbares Laserschweißen von Kupferwerkstoffen“. In: *Metall* 62.10 (2008), S. 647–651.
- [16] Sebastian Engler, Reiner Ramsayer und Reinhart Poprawe. „Process studies on laser welding of copper with brilliant green and infrared lasers“. In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 339–346.
- [17] *Feldemissionsrasterelektronenmikroskop*. URL: https://forschungsinfrastruktur.bmbwf.gv.at/de/fi/feldemissions-rasterelektronenmikroskop-fei-quantanta-250-feg_1193.
- [18] A Fortunato und A Ascari. „Laser welding of thin copper and aluminum sheets: feasibility and challenges in continuous-wave welding of dissimilar metals“. In: *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 6.2 (2019), S. 136–157.
- [19] IPG Laser GmbH. *YLR-1500CT Manual*. 2005.
- [20] A Haboudou u. a. „Reduction of porosity content generated during Nd: YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys“. In: *Materials Science and Engineering: A* 363.1-2 (2003), S. 40–52.
- [21] Mohammad M Hailat u. a. „Laser micro-welding of aluminum and copper with and without tin foil alloy“. In: *Microsystem technologies* 18.1 (2012), S. 103–112.
- [22] Dominik Hipp. „Einkopplung von Laserstrahlung unter Prozessbedingungen der Materialbearbeitung: Entwicklung einer Bestimmungsmethode und Ergebnisse“. Diss. Dissertation, Dresden, Technische Universität Dresden, 2020, 2020.
- [23] B Hu und IM Richardson. „Autogenous laser keyhole welding of aluminum alloy 2024“. In: *Journal of laser Applications* 17.2 (2005), S. 70–80.
- [24] Helmut Hügel und Thomas Graf. *Laser in der Fertigung*. Bd. 3. Springer, 2014.
- [25] JK Kim u. a. „Bead-on-plate weldability of Al 5052 alloy using a disk laser“. In: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 28.2 (2008), S. 187–190.
- [26] Fritz Klocke und Wilfried König. *Fertigungsverfahren 3- Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*. 4. Auflage. Springer- Verlag, 2007.
- [27] Mathias Kraetzsch u. a. „Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers“. In: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Bd. 2011. 1. Laser Institute of America. 2011, S. 169–178.
- [28] Trumpf Laser. *Tru Disk Laser*. URL: https://www.trumpf.com/de_AT/produkte/laser/scheibenlaser/trudisk/.
- [29] S J Lee u. a. „Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets“. In: *Science and Technology of Welding and Joining* 19.2 (2014), S. 111–118.

- [30] Keng H Leong u. a. „Laser welding of aluminum alloys“. In: *Lasers as Tools for Manufacturing II* 2993 (1997), S. 37–44.
- [31] Gerhard Liedl, Rodrigo Gómez Vázquez und Serguei P Murzin. „Joining of Aluminium alloy and steel by laser assisted reactive wetting“. In: *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 5.1 (2018), S. 1–15.
- [32] Grit Mayer. *Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen*. Informationsdruck i.12. Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut, 2009.
- [33] *Milliohmmeter*. URL: <https://www.sefelec.com/milliohmmetre-mgr10-prd59.html>.
- [34] *Nassschleifmaschine*. URL: http://www.metalco.cz/user/upload/PDF%20soubory/Bro%C5%BEury/Pily/Brillant%20200_DE.pdf.
- [35] C Pohle. „Schweißen von Werkstoffkombinationen“. In: *DVS-Verlag, Düsseldorf* (1999).
- [36] ABB Robotics. *Bedienungsanleitung Erste Schritte - IRC5 und RobotStudio*. 2011.
- [37] Tobias Solchenbach und Peter Plapper. „Mechanical characteristics of laser brazed aluminium–copper connections“. In: *Optics & Laser Technology* 54 (2013), S. 249–256.
- [38] Hermann Thier. *Ursachen der Porenbildung beim Schutzgasschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Stahleisen, 1973.
- [39] Rongshi Xiao und Xinyi Zhang. „Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys“. In: *Journal of Manufacturing Processes* 16.2 (2014), S. 166–175.
- [40] Yuan Xiao u. a. „Combinatorial investigation of Al–Cu intermetallics using small-scale mechanical testing“. In: *Journal of Alloys and Compounds* 822 (2020), S. 153536.
- [41] *Zugprüfmaschine*. URL: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_DE/02_284_Material_Pruefmaschine_AllroundLine_Z005_bis_Z100_PI_DE.pdf.