

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des ... **IFSW** 

Andreas Leitz

**Laserstrahlschweißen von Kupfer- und
Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung**

Herbert Utz Verlag



Andreas Leitz

**Laserstrahlschweißen von Kupfer- und
Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Laser in der Materialbearbeitung
Band 80

broschiert-Ausgabe:

ISBN 978-3-8316-4549-7 Version: 1 vom 22.02.2016

16:20:15

Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Ebook (PDF)

ISBN

Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und
Aluminiumwerkstoffen in Mischver-
bindung

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung

von Dr.-Ing. Andreas Leitz
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2015

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2016

ISBN 978-3-8316-4549-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	5
Formelzeichen und Abkürzungen.....	7
Kurzfassung.....	9
Extended Abstract.....	10
1 Einleitung und Motivation.....	13
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	15
2.1 Kontaktierverfahren zur Erzeugung von Mischverbindungen.....	15
2.1.1 Mechanische Fügeverfahren	15
2.1.2 Thermische Fügeverfahren.....	18
2.2 Laserstrahlschweißen von Kupfer und Aluminium	26
2.2.1 Kupfer	26
2.2.2 Aluminium	31
2.2.3 Kupfer-Aluminium-Mischverbindung	34
3 Versuchsaufbau und -durchführung.....	40
3.1 Strahlquellen	40
3.2 Optische Systeme.....	40
3.3 Versuchswerkstoffe.....	43
3.3.1 Kupferwerkstoffe	43
3.3.2 Aluminiumwerkstoffe	44
3.4 Probengeometrie und -anordnung.....	45
3.5 Spannvorrichtung	46
3.6 Versuchsparameter.....	47
3.7 Analysemethoden.....	48
4 Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen	51
4.1 Schweiß Eigenschaften von Kupferlegierungen.....	51
4.1.1 Leistungs- und Geschwindigkeitsvariation	51
4.1.2 Einflüsse Nickelbeschichtung	55
4.2 Schweiß Eigenschaften von Aluminiumlegierungen.....	59
4.2.1 Leistungs- und Geschwindigkeitsvariation	59
5 Einflussgrößen beim Erzeugen von Cu-Al-Mischverbindungen	67
5.1 Probenanordnung und Material.....	67
5.1.1 Probengeometrie Cu3/Al5 und Al5/Cu3	68
5.1.2 Probengeometrie Cu10/Al10 und Al10/Cu10	79

5.2	Einfluss Fokusbereich	87
5.3	Variation der Vorschubgeschwindigkeit	98
5.4	Variation der Fokusbereich	109
5.5	Prozessdiagnose mit Röntgenanlage	113
5.6	Ableitung von Strömungsmodellen	121
5.6.1	Theoretische Modelle für Geometrie Cu3/Al5 und Al5/Cu3	121
5.6.2	Theoretische Modelle für Geometrie Cu10/Al10 und Al10/Cu10	125
5.7	Auswertende Zusammenfassung	128
6	Charakterisierung der Verbindungseigenschaften	131
6.1	Festigkeitsuntersuchungen	131
6.2	Übergangswiderstand	138
6.3	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	142
7	Ansätze zur Qualitätssicherung	143
7.1	Kamerabasierte Schweißnahtüberprüfung	143
7.2	Spektrometrische Prozessüberwachung	145
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
9	Literaturverzeichnis	154

Formelzeichen und Abkürzungen

A_{AB}	m^2	Anbindefläche in der Fügeebene
AB_x	m	Anbindebreite in der Fügeebene
A_m		über alle Auftreffwinkel gemittelter Absorptionsgrad
A_t	m^2	elektrisch tragende Kontaktfläche
A_w	m^2	wirksame Kontaktfläche
c_p	J/(kg*K)	spezifische Wärmekapazität
d_f	m	Fokusedurchmesser
d_k	m	Strahldurchmesser Lichtleitkabelende
f_f	m	Brennweite Fokussierlinse
f_k	m	Brennweite Kollimationslinse
F_z	N	Zugkraft
I	A	Stromstärke
I_L	W/m ²	Laserintensität
k	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
l	m	Schweißnahtlänge
M^2		Beugungsmaßzahl
n		Anzahl der Schweißnähte einer Kontaktierung
P_L	W	Laserleistung
$P_{L,abs}$	W	absorbierte Laserleistung
$P_{L,FD}$	W	Laserleistung der frequenzverdoppelten Strahlquelle
$P_{L,IR}$	W	Laserleistung der infraroten Strahlquelle
P_L/d_f	W/m	Strahlparameterquotient
R	Ω	Engwiderstand
$R_{\bar{U}}$	Ω	Übergangswiderstand
T_s	K	Schmelztemperatur
T_v	K	Verdampfungstemperatur
U_{Mess}	V	gemessener Spannungsabfall
v_s	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
z_0	m	Fokuslage
z_R	m	Rayleighlänge
β		Abbildungsmaßstab

η_A		Einkoppelgrad
θ_f	mrاد	Divergenzwinkel des fokussierten Strahls
θ_k	mrاد	Divergenzwinkel des kollimierten Strahls
λ	m	Wellenlänge
λ_{th}	W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kg/m ³	Dichte
AB		Anbindebreite
CT		Computertomographie
Cu-DHP		Kupfer - deoxidized with high residual phosphorus
Cu-ETP		Kupfer - electrolytic tough-pitch
Cu-HCP		Kupfer - high conductivity phosphorus deoxidized
Cu-OF		Kupfer - oxygen free
Cu-PHC		Kupfer - phosphorus deoxidized high conductivity
EDX		Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ET		Einschweißtiefe
FD		Frequenzverdoppelte Laserstrahlung
IR		Infraroter Bereich
LLK		Lichtleitkabel
NB		Nahtbreite
NIR		Nahes Infrarot
NÜ		Nahtüberhöhung
REM		Rasterelektronenmikroskop
RMS		Reaktivmultischichten
RT		Raumtemperatur
SHADOW		Steppless High Speed Accurate and Discrete One Pulse Welding
UV		Ultraviolett
VIS		Visuelles Spektrum

Kurzfassung

Mit Neuentwicklungen von Produkten gehen neue Herausforderungen, wie unter anderem die Wahl einer geeigneten seriellen Umsetzung einher. Dieser Aspekt kommt derzeit bei der Entwicklung von Alternativen Antrieben in der Automobilindustrie zum Tragen. Bestrebungen mechanische Verbindungen durch stoffschlüssige Kontaktierverfahren zu ersetzen und somit die Vorteile, wie beispielsweise höhere Festigkeiten, geringere Übergangswiderstände und kleinere realisierbare Bauräume zu nutzen, bringen das Werkzeug Laser ins Spiel. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt hierbei auf der Überlappkontaktierung der Werkstoffe Kupfer und Aluminium. Die unterschiedlichen physikalischen und metallurgischen Eigenschaften der Werkstoffe, interkristalline Sprödphasenbildung, sowie Rissneigung in der Schweißnaht verdeutlichen die auftretende Komplexität dieser Mischverbindung.

Neben der Anordnung der Materialien und der Probengeometrie zeigen speziell die Laserparameter Fokusdurchmesser und Vorschubgeschwindigkeit signifikante Auswirkungen auf den Schweißprozess. Mit Variation der Strahlquelle von Single-Mode Laser bis zu Multi-Mode Faser- und Scheibenlasern und unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben der eingesetzten Bearbeitungsoptiken konnten in dieser Arbeit die Einflüsse der Fokusgröße auf den Schweißprozess untersucht werden. Dabei stellen sich in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie unterschiedliche Fokusdurchmesser erfolgversprechend dar. Eine weitere positive Beeinflussung der Prozessstabilität kann durch eine geeignete Vorschubgeschwindigkeit erzielt werden. Hohe Schweißgeschwindigkeiten ($> 10 \text{ m/min}$) im Zusammenspiel mit einem geeigneten Fokusdurchmesser ermöglichen ein seriell umsetzbares Prozessfenster mit einem geringen Durchmischungsgrad der Kupfer- und Aluminiumwerkstoffe und entsprechend reduzierten Anteilen von Sprödphasen. Dies führt in Summe zu einer metallurgisch gesehen stabilen Verbindung.

Eine große Bedeutung wird aufgrund des Einsatzgebiets dieser Verbindung der mechanischen Festigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit beigemessen. Eine Steigerung der Festigkeit durch Hinzufügen von Legierungselementen bringt meist Einbußen bei den elektrischen Leitfähigkeitswerten der Kontaktierung mit sich. Aus diesem Grund ist für eine geeignete Verfahrens- und Werkstoffauswahl zur Herstellung der Mischverbindung zwingend eine Gegenüberstellung der Festigkeits- und Leitfähigkeitswerten nötig.

Eine erfolgreiche serielle Umsetzung ist eng an ein, dem Fügeprozess angepassten, Verfahren zur Qualitätssicherung gekoppelt. In dieser Arbeit werden daher zwei Ansätze zur zerstörungsfreien Qualitätsüberwachung aufgezeigt. Das erste untersuchte Verfahren basiert auf der Auswertung der in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses von Kupfer und Aluminium unterschiedlich auftretenden Farbgebungen der Nahtoberfläche. Eine spektrale Überwachung des Schweißprozesses wird mit dem zweiten Verfahren realisiert und ermöglicht ebenso eine Aussage über das zugrunde liegende Mischungsverhältnis und somit über die Schweißnahtqualität.

Extended Abstract

New product developments are accompanied by challenges regarding an appropriate mass production. For the development of electric cars this aspect currently needs to be realized in automotive industry. Efforts to replace mechanical connections with welded connections offer the advantages of higher strength, lower contact resistance and smaller feasible design space. These advantages are likely to be solved by laser material processing. The main focus in the present work lies on overlap joining the materials copper and aluminum, which are known for their good electrical properties. The different physical and metallurgical properties of these materials, intergranular brittle behavior, and formation of cracks in the welded areas show the complexity of the mixing compound of copper and aluminum.

Initially the aim was to gain a deeper understanding of the laser beam welding process of pure copper and aluminum materials (not as mixtures) and to define the factors influencing the welding process. Starting with the observation of the laser welding of pure copper and aluminum materials, the basics were determined for further investigations. Various copper and aluminum alloys and their welding performances at different laser welding parameters were examined. The comparison of bare and nickel-coated copper surfaces shows a positive influence of the nickel layer on process stability and energy coupling. The coupling conditions of the laser are improved by the higher absorption of the nickel and the entire welding process shows a strong reduction of failures in the weld seam. On average an increase of the penetration depth of approximately 20% by the nickel coating was observed. To achieve comparable penetration depths in aluminum much lower laser power (factor of three lower) as compared to copper materials is required. A great increase of the feeding rate (> 50 m/min) causes changes in the flow conditions within the melt pool which leads to failures in the weld seam such as humping, melt pool ejections and grooves at the edge of the seam. In fact this applies for pure copper and pure aluminum.

Blending copper and aluminum materials by an integral contacting method causes undesirable material properties, such as brittle phases and distinctive increase in hardness. SEM and EDX images show that a mixing ratio in the weld seam from 30 to 70% copper to aluminum has to be regarded as critical. Local hardness increases up to 600 HV which corresponds to 10 times the average of the two pure materials. The associated increased risk of cracking highlights the dangers of a high mixing ratio of copper and aluminum. Hence, the goal is either to prevent or to minimize the formation of critical phases in the weld seam.

The information obtained for the pure copper and aluminum materials provides initial insights regarding useful welding parameters for the mixed combination of both materials. The choice of material on which the laser energy coupling takes place and which has to be at least melted on to the joining plane has a great influence on the welding result. The properties of the upper material are decisive factors regarding the beam coupling, the welding process itself and the

metallurgical mixture. If the copper material is positioned on the upper side of the specimen, generally more laser power is required for welding as compared to when aluminum lies above. This is due to the higher thermal conductivity, lower power absorption and the higher melting temperature of copper compared to aluminum. Form and characteristics of the weld seam and surface, as well as process stability also show strong dependencies of the sample assembly. Especially the thicker sample geometry Cu10/Al10 (Cu 1 mm, Al 1 mm) shows that a coupling of the upper aluminum material with respect to mixing and process reliability is advantageous. The higher melting point of copper is used in the lower part as a kind of heat sink, thus ensuring stable welding depths. In the reversed orientation an increased demand for energy to penetrate the copper material is necessary. The lower melting point of aluminum causes a sensitive behavior to process variations which can be seen among other things in different penetration depths inside one weld seam.

Yet another positive influence on the process stability can be achieved by a suitable feed rate. The investigations have shown that for the thin sample geometry Cu3/Al5 (Cu 0,3 mm, Al 0,5 mm) three speed regimes exist. Low speeds (< 25 m/min) cause a very small process window in matters of minimal welding and full penetration welding ($P_L = 400$ W). Even small process variations lead to large failures in the weld seam. With average feed rates between 25 and 40 m/min a stabilization of the welding process can be generated. The process window is doubled in a power range of $P_L = 800$ W. In addition, a minimal intermixture of the copper and aluminum materials and a reduced production of brittle phases are achieved for this speed range. When the feed rate exceeds 40 m/min, due to a change in the melt flow mechanisms the mixing of material increases. Comparable conclusions were obtained for the thicker sample geometry of 10/10 with slightly lower feed rates.

In addition to the arrangement of the material and the geometry of the samples, the laser parameters such as focus diameter and feed rate have a significant impact on the welding process. By varying the beam source from single-mode lasers up to multi-mode fiber and disk lasers in combination with different magnifications of the optics, the influence of the spot size on the welding process can be examined. Depending upon of the geometry of the sample, there are different focal diameters which provide a positive effect on the welding quality. Another positive influence on the process stability can be achieved by a suitable feed rate. Higher welding speeds (> 10 m/min) in combination with an appropriate focus diameter allow a workable process window with a low degree of intermixing of the different materials and a correspondingly reduced level of brittle phases. All these correlations lead to a metallurgically stable compound.

Due to the field of application, a great importance of the compound of copper and aluminum is attached to the mechanical strength and the electrical conductivity. On the one hand, an increase in strength by adding alloying elements usually causes on the other hand losses in

electrical conductivity values of the contact. The use of the aluminum alloy AlMg3 in connection with pure copper.

(Cu-OF), for example, has a significantly higher static tensile strength (~ 35%) than the mixture with the pure aluminum Al99,5. On the contrary, the investigation of the electrical contact resistance shows an average 25% higher transfer resistance for the aluminum AlMg3 than the mixing of the pure compound materials. For this reason, it is necessary to compare the conductivity and strength values and their influences on each other at the same time. The rule is that an increase in strength by adding alloying elements generally reduces the electrical conductivity of the material. Considering this fact allows an appropriate contacting method and the right choice of materials to be taken into account.

A successful implementation of a laser welding process into production has to be closely matched to a quality assurance program which has to be adjusted to the joining process. Two approaches for a non-destructive quality control are pointed out in this thesis. The first method which was investigated was based on the evaluation of a function of the mixing ratio of copper and aluminum, which causes different color schemes in the melting pool. Using camera-based color evaluation of the seam surfaces and consequently a division into predefined classes, which based on the mixing ratio of copper and aluminum, allowed successful conclusions on the penetration depth. This test method is carried out chronologically after the welding process and thus leading to an additional time and extra technical expenditure in industrial implementations.

The second quality assurance method, which takes place at the same time as the welding process is represented by monitoring the emitted spectra during the welding process. A visualization of different mixing ratios of copper and aluminum, which is equivalent to the penetration depths in the lower material, is possible with this measurement method. The local maxima of the aluminum spectra provide a good indicator regarding the degree of the mixture of aluminum and copper.

The numerous investigations carried out in the course of this thesis have shown that a reliable process can be realized with laser welding to create a bonded connection of copper and aluminum materials. The choice of optimized laser parameters such as focal position, feed rate and focus diameter is therefore very important. Further important influencing values are the materials, their arrangement and the geometrical dimensions. The results given in this theses show that a reduction of the critical brittle phases with a continuous laser welding process and without the use of additional material or any laser beam manipulation is possible. Depending on the application, parameters such as beam configuration, arrangement of the materials and the laser process parameters need to be determined accordingly.

1 Einleitung und Motivation

Um das enorme Potential der Elektromobilität auszuschöpfen, wurde von der Bundesregierung der „Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität“ ausgearbeitet, mit dem ehrgeizigen Ziel, mindestens eine Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 und sechs Millionen bis 2030 auf die Straße zu bringen. Neue Forschungs- und Entwicklungsprojekte, vor allem in den Bereichen Batterie, Energiemanagement im Fahrzeug, Informations- und Produktionstechnologie, Integration in das Verkehrs- und Energiesystem, sowie für den Aufbau geeigneter Forschungsinfrastrukturen, legen die Grundsteine bei der Entwicklung innovativer Technologien für die Elektromobilität. Für eine erfolgreiche Markteinführung sind Maßnahmen wie die Förderung von Forschung und Entwicklung nötig, um beispielsweise kostensparende Fertigungsverfahren zu entwickeln [1].

Der Laser als Bearbeitungswerkzeug wird in der industriellen Praxis bereits seit Jahrzehnten erfolgreich für die unterschiedlichsten Fertigungsverfahren eingesetzt. Die weiterhin steigende Zahl an Anwendungen in der Serienfertigung spricht für den Erfolg dieser Technologie. Stetige Innovationen in der Lasertechnik, wie beispielsweise die Weiterentwicklung von brillanten Strahlquellen, Optiken und Qualitätssicherungsansätzen sind die Grundlage für diese Erfolgsgeschichte. Geringer Wärmeeintrag bei der Laserbearbeitung, fallende Investkosten der Strahlquellen und die große Auswahl an verschiedenen Laserstrahlquellen sind nur ein paar Vorteile, welche auf der Suche nach geeigneten Fertigungsverfahren im Bereich der alternativen Antriebe für das Strahlwerkzeug Laser sprechen.

Die Entwicklung von alternativen Antrieben in der Automobilindustrie erweitert die Palette der zu fügenden Werkstoffe über das klassische Feld von Stahl und Aluminium hinaus. So spielt Kupfer mit seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit eine wichtige Rolle. Häufig wird das Ultraschallschweißen als Fügeverfahren in der elektronischen Fertigungstechnik eingesetzt. Die Vorteile des Verfahrens liegen auf den ersten Blick in relativ geringen Investitionskosten und einer minimalen metallurgischen Aufmischung der Bauteile. Dem stehen die Nachteile langer Taktzeiten, der Notwendigkeit einer zweiseitiger Bauteilzugänglichkeit und mechanischer Fügebelastung gegenüber. Der Laser als Fügetechnologie bietet hierbei einige Ansatzmöglichkeiten zur Optimierung. Der gezielte, berührungslose Energieeintrag und die Möglichkeit eines hohen Automatisierungsgrads ermöglichen eine einseitige Kontaktierung in kurzer Taktzeit mit geringem thermischem Eintrag.

Stoffschlüssige Verbindungen der Werkstoffe Kupfer und Aluminium, speziell in der Mischverbindung, bringen einige Herausforderungen mit sich. Die unterschiedlichen physikalischen und metallurgischen Eigenschaften der Werkstoffe (Wärmeleitfähigkeit, Absorptionskoeffizient, Schmelztemperatur), sowie Bildung intermetallischer Phasen, welche sehr spröde sein können und Rissneigung in der Schweißnaht verdeutlichen die Komplexität und die Herausforderungen der Kontaktierung.

In dieser Arbeit werden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer und Aluminium in der Mischverbindung analysiert und Erklärungen für die beobachteten Effekte ausgearbeitet. In Kapitel 2 werden zunächst aktuelle Kontaktierverfahren zur Erzeugung von Mischverbindungen vorgestellt und tiefer auf die Herausforderungen und Besonderheiten beim Laserstrahlkontaktieren von Kupfer- beziehungsweise Aluminiumwerkstoffen in der artgleichen Werkstoffanordnung (Kupfer und Kupfer, beziehungsweise Aluminium und Aluminium) eingegangen. Des Weiteren werden aktuelle Forschungsergebnisse von verschiedenen Laserverfahren zur Erzeugung der Kupfer-Aluminium-Mischverbindung vorgestellt. Nach Vorstellung der in dieser Arbeit verwendeten Systemtechnik (Kapitel 3) erfolgt in Kapitel 4 die Betrachtung der Schweißigenschaften der reinen Werkstoffe Kupfer und Aluminium. Hiermit werden wichtige Kenntnisse für die weiterführenden Untersuchungen der Mischverbindungen bei den relevanten Prozessparametern erworben.

Der Übertrag der Ergebnisse auf die Mischverbindung und eine ausführliche Betrachtung der Einflussgrößen Probenanordnung, Probenmaterial, Fokusslage, Vorschubgeschwindigkeit und Fokusdurchmesser erfolgt in Kapitel 5. Die dort vorgestellten Versuchsserien liefern neue, umfangreiche Erkenntnisse bezüglich des Schweißverhaltens der Mischkontaktierung. Eine Erklärung und Abstraktion der Ergebnisse erfolgt mit der Erstellung von Strömungsmodellen.

Die an die Kontaktierung gestellten Anforderungen werden in Kapitel 6 mittels Festigkeitsuntersuchungen und Analysen der Übergangswiderstände überprüft und Einflüsse der Laserparameter auf die Schweißqualität besprochen. Für eine sichere serielle Umsetzung ist der Einsatz von geeigneten Maßnahmen zur Qualitätskontrolle von immenser Bedeutung. Um die gesamtheitliche Betrachtung der Laserkontaktierung von Kupfer und Aluminium im Hinblick auf eine serielle Umsetzbarkeit zu komplettieren, werden zwei erfolgversprechende Ansätze zur Qualitätssicherung in Kapitel 7 vorgestellt. Abschließend werden in Kapitel 8 die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

„Nur wenn wir eine Leistungssteigerung der Batterie im Elektrofahrzeug bei gleichzeitiger Senkung der Kosten realisieren, wird das Elektroauto die notwendige Kundenakzeptanz erreichen“ [2]. Diese in der Automobilindustrie vorherrschende Sichtweise bestätigt den Handlungsbedarf bei der Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren. Die neuen Erkenntnisse aus dieser Arbeit sollen einen Baustein zu Erfüllung der genannten Ziele liefern.