

Laserstrahllöten von umformfähigen hybriden Platinen aus
Stahl-Aluminium-Mischverbindungen

Der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian von der Haar
geboren am 01. Juli 1982 in Münster

2010

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing habil. P. Wriggers

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens

3. Referent: Prof. Dr.-Ing. V. Wesling

Tag der Promotion 3. Dezember 2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. H. Haferkamp, dem ehemaligen Direktor des Instituts für Werkstoffkunde der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover und Vorstandsmitglied des Laser Zentrum Hannover e.V. für die Aufgabenstellung und seine wohlwollende Unterstützung, ohne die die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens, dem Direktor des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, und Prof. Dr.-Ing. V. Wesling, dem Direktor des Instituts für Schweißtechnik und trennende Fertigungsverfahren der Technischen Universität Clausthal, danke ich für die Übernahme der Koreferate.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Wriggers, dem Direktor des Instituts für Kontinuumsmechanik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, gilt mein Dank für die freundliche Prüfungsleitung.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei all meinen Kollegen, Studenten und Praktikanten insbesondere bei der Fachgruppe „Fügetechnik“ und der Abteilung „Werkstoff und Prozesstechnik“ am Laser Zentrum Hannover e.V., die mir stets mit Rat und Tat geholfen haben, diese Arbeit zu vollenden.

Bedanken möchte ich mich insbesondere bei Dr.-Ing. A. Bormann, Dr.-Ing. O. Meier, Dipl.-Ing. P. Kallage und Dipl.-Ing. C. Stahlhut für die konstruktiven Diskussionen und Anregungen, ohne die diese Arbeit nicht das geworden wäre, was Sie ist.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie insbesondere bei meinen Eltern und Großeltern für die Unterstützung der letzte Jahre. Der größte Dank gebührt mein Frau Sandra von der Haar, die immer an mich geglaubt hat.

Ich möchte nicht versäumen, der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die Förderung der DFG-Forschergruppe 505 zu danken.

Kurzfassung

Im Bereich der Füge­technik für Stahl und Aluminium sind in den vergangenen Jahrzehnten viele Forschungsaktivitäten durchgeführt worden. Die Verbindung von Strukturbauteilen ist sowohl mit mechanischen als auch mit thermischen Fügeverfahren möglich und wird teilweise in der Industrie eingesetzt.

Zur Umsetzung der nächsten Stufe des Leichtbauansatzes bedarf es einer Füge­technologie zur Herstellung hybrider Platinen, die anschließend einer Strukturgebung unterzogen werden können. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines flächigen Fügeverfahrens, das eine anschließende Umformung ermöglicht und im besten Fall eine gute Oberflächeneigenschaft aufweist.

Hierfür wird ein Laserstrahl­lötprozess für hybride Strukturen entwickelt und hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit optimiert. Die gefügten hybriden Platinen werden metallurgisch analysiert und hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte untersucht. Durch Tiefziehversuche in Anlehnung an den Näpfchenversuch nach Swift wird die Umformbarkeit der gefügten Platinen verifiziert und anhand eines Demonstratorbauteils für die Praxis nachgewiesen.

Schlagwörter: Leichtbau, Laser, Mischverbindung, Tiefziehen, Korrosion, Stahl, Aluminium, Löten, Tailored Hybrid Blank

Abstract

During the last years there has been a lot of development in the field of joining technologies for steel and aluminum. Mechanical and thermal joining techniques exist for structure parts so that a joint is possible even under industrial conditions.

The next step for the weight reduction is to join a hybrid blank that can be deformed afterwards. The target of this work is to develop a joining technique for steel to aluminum plates that creates good mechanical properties and at its best good surface properties.

Therefore a laser beam brazing process for hybrid structures has been developed and been optimized to a higher force. The joined blanks have been tested metallurgical, in tensile test and in deep drawing tests according to Swift. At least, a demonstrator product was produced with IHU.

Key words: weight reduction, laser, material mix, deep drawing, corrosion, steel, aluminum, brazing, tailored hybrid blank

Formel- und Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	3
2.1 Leichtbaukonzepte	3
2.1.1 Mischbauweise	3
2.1.2 Fügetechnische Herausforderung Stahl - Aluminium.....	5
2.2 Mechanisches Fügen	7
2.2.1 Nieten	7
2.2.2 Clinchen.....	8
2.2.3 Falzen	9
2.3 Kleben.....	10
2.4 Thermisches Fügen.....	11
2.4.1 Schweißen.....	11
2.4.2 Löten.....	14
2.4.3 Laserstrahllöten	27
2.5 Grundwerkstoffe	31
2.5.1 Stahlwerkstoffe	31
2.5.2 Aluminiumwerkstoffe.....	33
2.6 Korrosion.....	35
3 Ausgangssituation und Zielsetzung.....	38
3.1 Ausgangssituation.....	38
3.2 Zielsetzung.....	39
4 Vorgehensweise zur Zielerreichung	40
5 Versuchswerkstoffe	42
5.1 Stahlwerkstoffe.....	42
5.2 Aluminiumwerkstoffe	42
5.3 Lotwerkstoffe.....	43

6	Versuchsaufbau und –durchführung	47
6.1	Laserbearbeitungskopf.....	47
6.2	Spaltgarantie	49
6.3	Versuchsstand.....	50
6.4	Versuchsdurchführung.....	52
6.5	Tiefziehuntersuchungen.....	54
6.6	Korrosionsuntersuchungen.....	56
7	Auswertung und Diskussion.....	58
7.1	Thermographische Analyse der Brennfleckgeometrie.....	58
7.2	Visuelle Begutachtung der Löt­nähte.....	62
7.3	Bestimmung der Einwirkung der Spaltbreite auf das Löt­ergebnis	66
7.4	Metallographische Untersuchungen und Betrachtung der Phasensaumdicken 67	
7.5	Zugversuche zur Bestimmung der maximalen Kraftaufnahme.....	78
7.6	Bestimmung des Tiefziehverhältnisses	85
7.7	Ermitteltes Prozessfenster.....	95
7.8	Korrosionsuntersuchungen.....	97
7.9	Demonstratorbleche für das Innenhochdruckumformen.....	99
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	106
9	Literaturverzeichnis	108

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen und Konstanten

Zeichen	Benennung	Einheit
a_F	Abstand Flussmittelauftrag zu Fokusmitte	[mm]
$at\%$	Atomprozent	[%]
b	Spaltbreite	[mm]
B	Rondendurchmesser	[mm]
$B_{o,max}$	Ausgangsdurchmesser der Blechrunde	[mm]
c	laterale Fokusslage	[mm]
D_W	Diffusionskoeffizient	[cm ² /s]
D_0	Diffusionskonstante (werkstoffabhängig)	[cm ² /s]
d_k	Korndurchmesser	[mm]
d_o	Stempeldurchmesser	[mm]
f	Pendelfrequenz	[Hz]
F	Kraft	[N]
F_{NH}	Niederhalterkraft	[N]
F_{ST}	Stempelkraft	[N]
I	Intensität im Fokus	[W/cm ²]
K	Keimzahl	[-]
$m\%$	Massenprozent	[%]
P_k	kappilarer Fülldruck	[bar]
P_L	Laserleistung	[kW]
Q	Aktivierungsenergie	[kJ/mol]
R	universelle Gaskonstante	[J/molK]
R_e	Streckgrenze	[N/mm ²]
R_m	Zugfestigkeit	[N/mm ²]
t	Schweißtiefe	[mm]
T	absolute Temperatur	[K]

T_a	Arbeitstemperatur	[°C]
t_d	Diffusionszeit	[s]
T_s	Schmelztemperatur	[°C]
v_D	Drahtfördergeschwindigkeit	[m/min]
v_f	Prozess-/Vorschubgeschwindigkeit	[m/min]
X	Diffusionsweg	[mm]
β	Tiefziehverhältnis	[-]
$\beta_{o,max}$	maximales Tiefziehverhältnis	[-]
ΔU_{pot}	Potentialdifferenz	[V]
θ	Benetzungswinkel	[°]
ρ	Dichte	[g/cm ³]
σ	Spannung	[N/mm ²]
σ_o	Ausgangsspannung	[N/mm ²]

Abkürzungen

Zeichen	Benennung
bspw.	beispielsweise
82/10	Lotlegierung AlSi10Cu6Sn2Ag0,5
86/10	Lotlegierung AlSi10Cu1,3Ag3,7
AA	Aluminium Alloy
Al	Aluminiumgrundwerkstoff
CMT	Cold Metal Transfer
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	Deckschicht
DIN	Deutsche Industrie Norm
DoE	Design of Experiments
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FL	Flussmittel
G	Grenzfläche

VII

GW	Grundwerkstoff
H	heterogener Gefügebestandteil
HV	Härte nach Vickers
i.d.R.	in der Regel
IAA	Internationale Automobil Ausstellung
IHU	Innenhochdruckumformen
hdp	hexagonal dichteste Packung
kfz	kubisch flächenzentriert
KTL	kathodische Tauchlackierung
MK	Mischkristall
MMC	Matrix-Metal-Compound
MSG	Metal-Schutzgas
MTS	Firmenbezeichnung des Zugprüfmachinenherstellers
NVEB	Non Vacuum Elektron Beam
P	Pore
REM	Raster Elektronen Mikroskope
RT	Raumtemperatur
S	Sperrschicht
T4	Wärmebehandlungszustand von Aluminium
THB	Tailored Hybrid Blank
VDA	Verband der Automobilindustrie
WIG	Wolfram Inert Gas

1 Einleitung

Die angestrebten Klimaziele, wie die Reduktion an CO₂-Emissionen und die Reduzierung des Flottenverbrauches, haben zu einem Umdenken in der Herstellung von Fahr- und Transportzeugen geführt. Durch die Weiterentwicklung von Motoren und des Antriebstrangs kann ein Teil an Kraftstoffeinsparungen erzielt werden. Durch die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes kann ein deutlich größerer Anteil an Einsparungen erzielt werden, was diesen Ansatz Erfolg versprechender erscheinen lässt. Diese Gewichtsreduktion steht jedoch im Konflikt mit den gestiegenen Anforderungen an Komfort und Sicherheit für ein Beförderungsmittel.

Durch die Fokussierung auf den Leichtbau wurde eine Vielzahl von Leichtbaukonzepten entwickelt, die sich generell in zwei Klassen einteilen lassen. Ein Ansatz verfolgt die Auslegung über strukturelle Anpassungen der Fahrzeugkomponenten wie bspw. Tailored Blanks. Der zweite Ansatz befasst sich mit der Substitution von Werkstoffen durch optimierte Ausnutzung von werkstoffspezifischen Eigenschaften. Dieser „Multi Material Mix“ nutzt die Eigenschaften von verschiedenen Werkstoffen in unterschiedlichen Anwendungs- und Belastungsfällen optimal aus und verhindert damit Überdimensionierungen.

Die nächste Generation an Leichtbaukonzepten befasst sich mit der Verknüpfung der beiden Ansätze und wird belastungsoptimierte hybride Fahrzeugstrukturen hervorbringen und damit einen weiteren Schritt zur effizienteren Beförderung von Waren und Menschen ermöglichen. Hierfür bedarf es weiter entwickelter Füge-technik, die sich speziell mit der hybriden Bauweise befasst.

Im Bereich der Füge-technik für Stahl und Aluminium sind in den vergangenen Jahrzehnten viele Forschungsaktivitäten durchgeführt worden. Die Verbindung von Strukturbauteilen ist sowohl mit mechanischen als auch mit thermischen Fügeverfahren möglich und wird teilweise in der Industrie eingesetzt. So sind erste Karosseriederivate in Stahl-Aluminium-Mischbauweise am Markt erhältlich.

Zur Umsetzung der nächsten Stufe des Leichtbauansatzes bedarf es einer Füge-technologie zur Herstellung hybrider Platinen, die anschließend einer Strukturgebung unterzogen werden können. Ziel ist die Entwicklung eines flächigen Fügeverfahrens, das eine anschließende Umformung ermöglicht und im besten Fall eine gute Oberflächeneigenschaft aufweist.

In dieser Arbeit wird ein Laserstrahl­lötprozess für hybride Strukturen entwickelt und hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit optimiert. Die gefügten hybriden Platinen werden metallurgisch analysiert und hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte untersucht. Durch Tiefziehversuche in Anlehnung an den Näpfchenversuch nach Swift wird die Umformbarkeit der gefügten Platinen verifiziert und anhand eines Demonstratorbauteils für die Praxis nachgewiesen.

Anhand von systematischen Untersuchungen zur Bestimmung dominanter Prozessparameter und der Verifizierung geeigneter Lotsysteme werden hybride Platinen gefügt. Diese werden anschließend auf die resultierende Phasensaumbildung in der Fügezone untersucht und eine Optimierung des Prozesses vorgenommen. Zusätzlich wird durch die thermische Analyse der Prozesszone eine Verbesserung der Fügeverbindung angestrebt. In abschließenden Umformtest wird die Umformbarkeit der Fügeverbindung untersucht und die Duktilität klassifiziert. Die Mediendichtheit wird durch ein Demonstratorbauteil, welches mittels Innenhochdruckumformen hergestellt wird, nachgewiesen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Leichtbaukonzepte

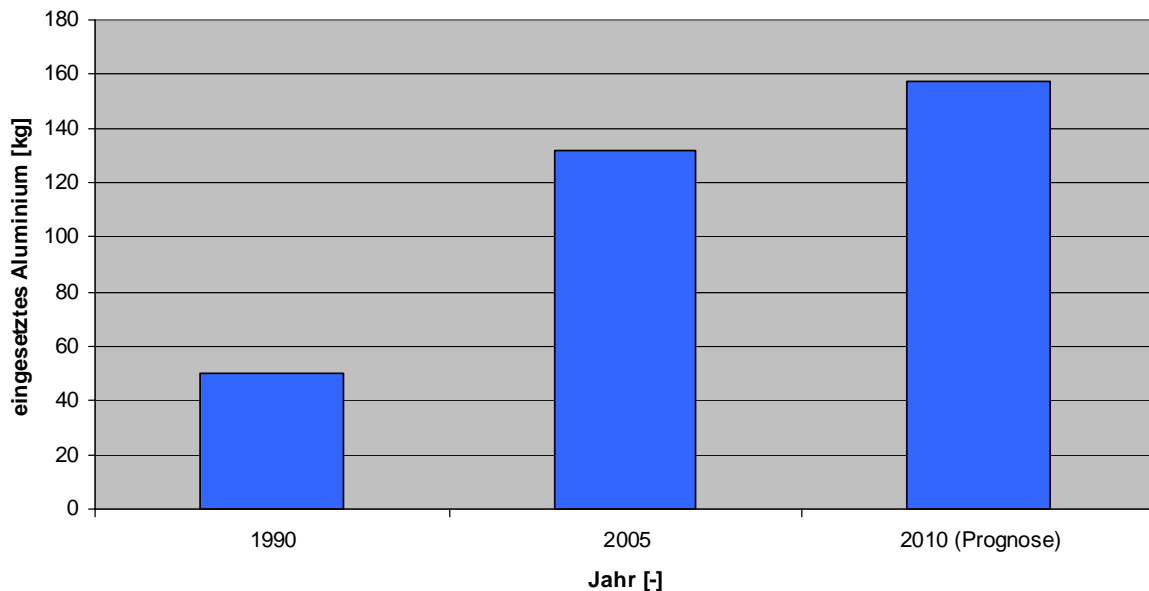
Die stetig gestiegenen Anforderungen an Produkte gerade in der Fahrzeugindustrie haben zu neuen Ansätzen im Bereich des Leichtbaus der Karosserie geführt /1/, /2/. Diese Studien haben ergeben, dass gerade mit der Reduktion des Fahrzeuggewichts das höchste Potential an Kraftstoffersparnis gegeben ist. Infolge dieser Ergebnisse wurden verschiedenste Karosseriestudien mit unterschiedlichen Schwerpunkten durchgeführt. Der Audi A8 (Spaceframe erster Generation) wird wie der Audi A2 (Spaceframe zweiter Generation) bspw. komplett aus dem Leichtmetall Aluminium hergestellt /3/. In der New Steel Body Studie wurde ein Referenzfahrzeug komplett aus modernsten Stahlwerkstoffen nachgebaut und direkt mit dem Serienderivat verglichen. Die Verwendung neuester Werkstoffe erlaubte eine Gewichtsreduzierung bei gleichzeitiger Erhöhung der Steifigkeitswerte /4/. In einem Projektzusammenschluss mehrerer Automobilhersteller und Zulieferer wurde unter dem Namen „Next Generation Vehicle“ im Jahr 2004 eine Studie begonnen, welche die Verwendung von hohen Anteilen Edelstahl im Automobil untersucht /5/.

2.1.1 Mischbauweise

Der Einsatz von Aluminium führt zu einer Reduktion des Fahrzeuggewichtes und damit zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen. Eine Studie von Knibb, Gormezano & Partners (KGP) im Jahr 2007 zeigte, dass der Einsatz von Aluminium in Neufahrzeugen in der EU von 50 kg im Jahr 1990 auf 132 kg im Jahr 2005 gestiegen ist und bis 2010 noch mal um weitere 25 kg steigen wird (siehe Abbildung 1). Hierdurch wird (theoretisch) eine Kraftstoffeinsparung von einer Milliarde Liter und eine CO₂-Reduktion von ungefähr 40 Mio. Tonnen während der Gesamtnutzungsdauer ermöglicht. /6/

Die Veränderung des Einsatzes verschiedener Werkstoffe in einem Fahrzeug weg von einer reinen Stahlkarosserie hin zu einem Einsatz verschiedenster Materialien kann anhand der neuen C-Klasse von Mercedes-Benz nachvollzogen werden. Es werden verschiedenste Werkstoffe über Stahl, Aluminium und Kunststoffe verwendet. /7/

Durch die Verwendung einer Aluminiumfront in einem Mittelklassewagen können bis zu 35% Gewicht der Front bei gleichen räumlichen Verhältnissen eingespart werden. Das führt bei der in dieser Studie verwendeten Fahrzeuganzahl von 5 Mio. Einheiten zu einer Einsparung von 2,2 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen und 770 Mio. Litern Kraftstoff bezogen auf die Gesamtfahrzeugaufleistung /8/.



©LZH

Abbildung 1: Übersicht über die Entwicklung des Aluminiemeinsatzes in der Neufahrzeugherstellung

Am Beispiel der Verwendung von MMC-Lagerstuhlverstärkung in Zylinderkurbelgehäusen kann man das breite Spektrum der Einsatzmöglichkeit von Mischbauweisen erkennen /9/.

Eine Studie zur Effizienz von Tailored Blanks im Türbereich im Vergleich zu konventionellen Türen ergab, dass die kostengünstigste Tür im Test aus Tailored Blanks hergestellt wurde. Des Weiteren wurde als Ergebnis festgehalten, dass sich Tailored Blanking nur dann lohnt, wenn damit eine Integration von Bauteilen verbunden ist /10/.

Die ersten warmumgeformten Tailored Blanks in einer Serienanwendung präsentierte ThyssenKrupp Steel zur IAA 2007. Die lasergeschweißten Platinen setzt Audi in der Plattform des A5 Coupé und des neuen A4 ein. Sie werden zu B-Säulen, hinteren Längsträgern und Tunnelverstärkungen verarbeitet /10/, /11/, /12/.

2.1.2 Füge-technische Herausforderung Stahl - Aluminium

Im Zuge dieser stetigen Verbesserung der Gebrauchseigenschaften bezogen auf die Steifigkeit bei optimiertem Gewicht werden unterschiedliche Materialquerschnitte miteinander gefügt. Diese Ausnutzung der Materialdickensprünge ist seit langem Stand der Technik und wird unter dem Begriff Tailored Blanks oder Tailored Structures vorgestellt /13/, /14/. Um diese Optimierung noch weiter voranzutreiben und um in einem Bauteil unterschiedliche Werkstoffanforderungen zu vereinen, wird zusätzlich noch die Verbindung artfremder Materialien angestrebt. In der Regel werden bei dieser hybriden Bauweise Stahl und Aluminiumwerkstoffe verbunden /15/, /16/, /17/.

Untersuchungen zum thermischen Fügen von Stahl und Aluminium werden seit einigen Jahrzehnten durchgeführt /18/, /19/. In diesen Untersuchungen wurde eine Schweißbarkeit der Verbindung Stahl-Aluminium mit einem Aluminium-Silizium-Schweißzusatz für das Wolframinertgasschweißen nachgewiesen. Das Fügen höherlegierter Stähle konnten nur mit aufwendigen Beschichtungen aus bspw. Zinn ermöglicht werden /20/.

Eine gute Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung bietet /21/, in der eine Zusammenfassung der Forschungsergebnisse verschiedener Einrichtungen gegeben wird. Die aus Sicht der Automobilindustrie aussichtsreichsten thermischen Fügeverfahren für hybride Werkstoffverbunde sind derzeit (im Jahr 2009) das Punktschweißverfahren sowie das Laserstrahllöten mit Zinkbasisloten als Zusatzwerkstoff /22/.

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Erwärmungskonzepte hinsichtlich ihrer prozesstechnischen Grenzen sowie verbindungstechnische Vor- und Nachteile untersucht. Zum Einsatz kamen das Lichtbogen-, das Reib- und das Sprengschweißverfahren. In neueren Untersuchungen zu dieser Thematik werden Widerstandsschweißen, Non-Vakuum-Elektronenstrahlfügen, Lichtbogenschweißen und das Laserstrahllöten und Kombinationen daraus qualifiziert und weiterentwickelt /23/-/28/.

Als Problem der oben genannten Verfahren wird neben der Veränderung der Grundwerkstoffe durch thermische Einwirkung die Entstehung von intermetallischen Phasen genannt /29/. So entstehen beim thermischen Fügen von Stahl und Aluminium in der Fügezone saumartige Strukturbereiche, in denen Mischphasen und

Überstrukturen angesiedelt sind (Phasensaum). Diese Bereiche deuten zwar auf einen ausreichenden stattgefundenen Diffusionsprozess hin, stellen aber bei starker Ausprägung eine metallurgische Kerbe dar. Eine Umgehung der Phasenbildung ist nur durch Reduktion der schmelzflüssigen Anteile von Eisen und Aluminium möglich. Hierfür wird neben Zwischenschichten häufig Legieren durch bestimmte Zusatzwerkstoffe empfohlen. Werden Verfahren ohne Zusatzwerkstoffe betrieben, also der Stahl mit dem flüssigen Aluminium benetzt, sind Phasensäume unvermeidbar.

Während des Erstarrungsvorganges können sich aus der Eisen-Aluminium-Schmelze mehrere Phasen und Überstrukturen ausbilden. Diese Verbindungen weisen komplexe Gitterstrukturen (z.B. orthorombisch) auf, die in der Regel eine Verformung kaum zulassen. Das Zweistoffsystem (siehe Abbildung 2) gibt an, dass drei Phasen (FeAl_2 , Fe_2Al_5 , FeAl_3) und zwei Überstrukturen (FeAl , Fe_3Al) bei Raumtemperatur existent sein können /30/. Weitere Phasen existieren nur bei höheren Temperaturen oder gelten als metastabil, was bei Abschreckvorgängen zu deren Bildung führen kann. Die Phasen und Überstrukturen können generell in Fe-dominante und Al-dominante Verbindungen eingeteilt werden. Die Al-dominanten Verbindungen sind spröde und weisen geringe Festigkeiten auf. Die Fe-dominanten Verbindungen sind duktiler und zeichnen sich durch höhere Festigkeiten aus /32/. Es wird berichtet, dass sich bei Schmelzschweißprozessen hauptsächlich die Phasen FeAl_3 (59,2 m% Al, 40,8 m% Fe) und Fe_2Al_5 (54,7 m% Al, 45,3 m% Fe) bilden /33/. Sie weisen im Vergleich zu den Grundwerkstoffen sehr hohe Härten auf:

- FeAl_3 : 820 – 920 $\text{HV}_{0,2}$
- Fe_2Al_5 : 1000 – 1100 $\text{HV}_{0,2}$,
- Al 80 $\text{HV}_{0,2}$
- Fe 190 $\text{HV}_{0,2}$

wobei die Fe_2Al_5 -Phase als besonders spröde und damit rissinitierend gilt /26/.

In der Eisenphase kann Aluminium bis zu 18 at% gelöst werden, wobei allerdings Aluminiumphase bei Raumtemperatur keine Löslichkeit für Eisen aufweist. Jeglicher Fe-Anteil in der Aluminiumphase führt somit sofort bei Abkühlung zur Bildung der oben erwähnten intermetallischen Phasen. Über hohe Abkühlraten kann ein übersättigtes Kristallgefüge mit einem max. Eisenanteil von 0,08 % erzeugt werden /30/.

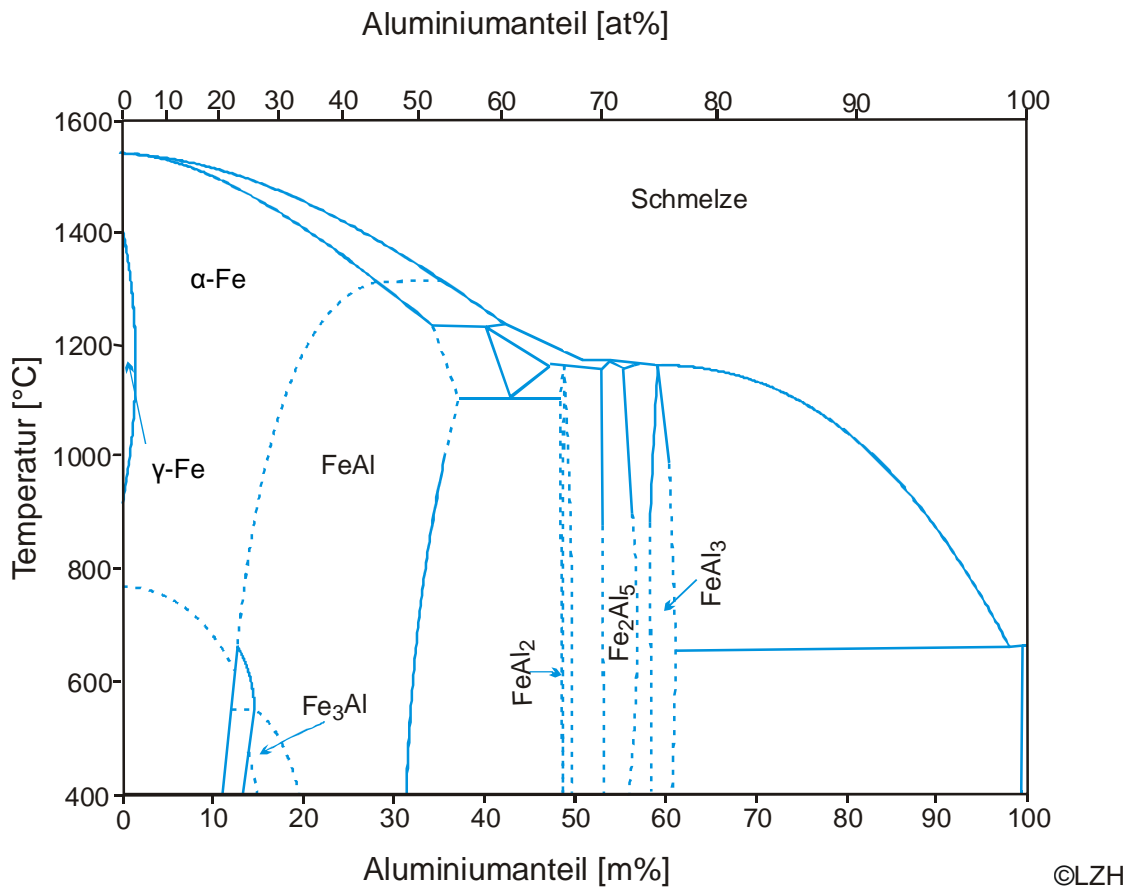


Abbildung 2: Phasendiagramm von Eisen und Aluminium

2.2 Mechanisches Fügen

Für das mechanische Verbinden der artungleichen Werkstoffe Stahl und Aluminium kommen unterschiedliche Fügeverfahren in Frage, wobei für die Verbindung von Stahl- und Aluminiumbauteile in der Literatur neben dem Verschrauben und dem Presssitz /31/ das Nieten und das Clinchen erwähnt werden /34/, /35/. Auf diese beiden Verfahren wird im Weiteren näher eingegangen.

2.2.1 Nieten

Durch die Umformung des Verbindungselements Niet entsteht eine unlösbare, kraft- und formschlüssige Verbindung. Ein Schließkopf wird auf den Schaft des Niets axial aufgestaucht, wobei das Spiel zwischen Nietschaft und Bohrung durch Aufstauchen des Schaftendes ausgefüllt wird (Vollnieten). Es gibt verschiedene Nietverfahren, die sich durch die Art der Niete unterscheiden. Hierbei sind u.a. zu nennen das Blind-, Stanz-, Halbhohl- und das Vollnieten.

Durch die Nietbohrung wird eine Schwächung des Querschnittes der zu vernietenden Knotenpunkte (Stirnseiten) bewirkt. Die Werkstoffe der Niete müssen an die zu verbindenden Grundwerkstoffe angepasst werden, um die höchst mögliche Tragfähigkeit zu erreichen. /36/

Bei Werkstoffkombinationen ist auf eine Potentialtrennung zu achten, um mögliche Korrosion zu vermeiden. Hierfür können Zwischenschichten verwendet werden, welche aber nicht den Bereich im Übergang Niet – Grundwerkstoff isolieren. Hierfür werden beschichtete Niete eingesetzt, sofern sie für die Fügeaufgabe verfügbar sind. /37/

2.2.2 Clinchen

Clinchen oder auch Durchsetzfügen ist ein mechanisches Verfahren zum Verbinden von Blechen ohne Verwendung eines Zusatzwerkstoffes. Man kann es sowohl zu den Fügeverfahren als auch zu den Umformverfahren rechnen, da die Verbindung durch Umformen des Werkstoffs erreicht wird. Nach DIN 8593 ist dem Fügen durch Umformen bei Blech-, Rohr und Profilverteilen neben Quetschen und Verpressen unter anderem das Durchsetzfügen zugeordnet. /38/

Die statischen Festigkeiten bei artgleichen Verbindungen liegen im Bereich von etwa 2/3 bis zum 1,5-fachen einer vergleichbaren Punktschweißverbindung. Die Dauerfestigkeit ist aufgrund von fehlender Kerbwirkung (bei nicht schneidenden Verbindungen) und nicht vorhandener Wärmeeinflusszone höher als bei Punktschweißverbindungen. Besonders wenn unterschiedliche Blechstärken verbunden werden müssen, bietet das Clinchen großes Potential. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch verschiedenartige Materialien und/oder beschichtete Bleche gefügt werden können /39/. Diese Technologie hat sich bereits in der Herstellung von Aluminiumfahrzeugen als wichtigste Füge-technologie etabliert, wobei festzustellen ist, dass durch die Kombination mit flächigem Kleben die Betriebs- und Crashfestigkeit deutlich verbessert werden kann /40/.

Ein Durchsetzfügewerkzeug (siehe Abbildung 3) besteht aus einem Stempel und einer Matrize. Die zu verbindenden Bleche werden durch den Stempel ähnlich wie beim Tiefziehen unter plastischer Deformation in die Matrize gedrückt. Durch eine spezielle Gestaltung der Matrize entsteht eine druckknopfähnliche Form, die die Bleche form- und kraftschlüssig miteinander verbindet. Je nach System bewirkt entweder eine Vertiefung im Boden einer Starmatrize oder das Nachgeben

beweglicher Matrizensegmente, dass die Bleche eine Überschneidung ausbilden. Zu unterscheiden sind hier u. a. der Rundpunkt, bei dem der Stempel eine runde, gasdichte Vertiefung hinterlässt, und der Rechteckpunkt, bei dem die Verbindung sowohl als gasdichte oder als an zwei Seiten eingeschnittene Variante existiert. Dafür können in diesem Verfahren auch höherfeste Materialien miteinander verbunden werden.

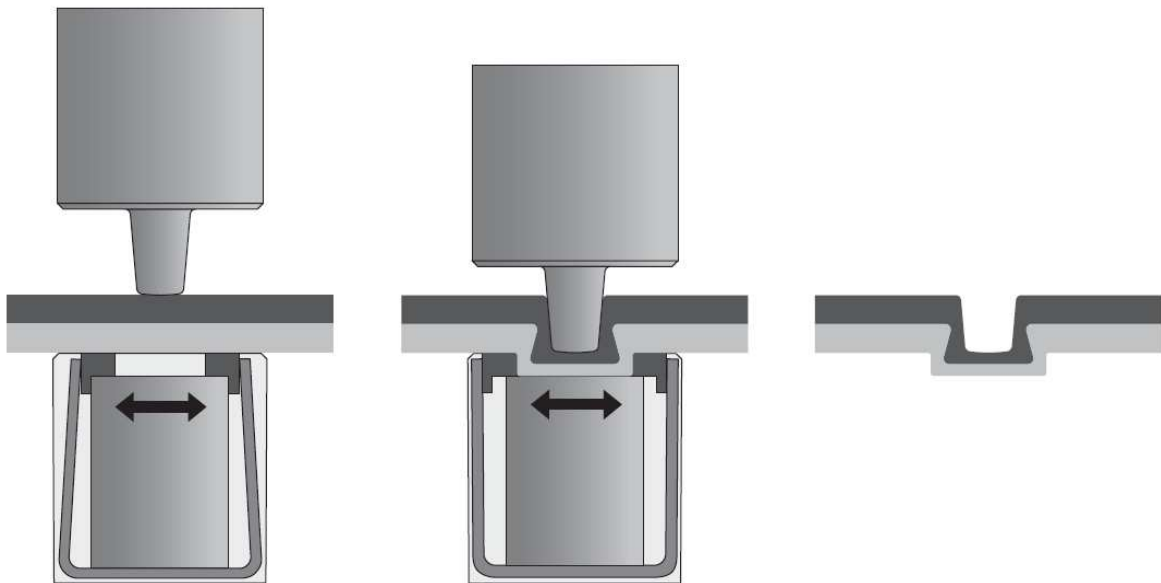


Abbildung 3: Clinchprozess (©TOX PRESSOTECHNIK)

Da sowohl das Nieten als auch das Clinchen eine Veränderung der Oberflächen (Nietenköpfe, Ausprägung, etc.) verursachen, muss nach einer Alternative gesucht werden, die bei einer annähernd gleichen Oberflächenbeschaffenheit im Endzustand ein Verbinden ermöglicht. Dieses kann durch thermische Fügeprozesse erreicht werden, da diese ein flächiges Anbinden der Fügpartner ohne oder mit nur geringer Nahtüberhöhung ermöglichen.

2.2.3 Falzen

Neben den genannten mechanischen punktförmigen Verfahren existieren weiterhin mechanisch-flächenförmige Verfahren, wie das Falzen.

Beim Falzen wird ein Falten eines Bleches um den Fügpartner vorgenommen. „Bei der Verbindung von Blechen hängt die Haltbarkeit des Falzes von der Pressung ab, mit der die Falznaht geschlossen wurde. Eine schwache Pressung gestattet bei geschlossener Falznaht noch die Verschiebung der zusammengefügt Verbindung.“ Ein automatisiertes Verfahren zur Herstellung von Falzen ist das Rollfalzen, bei

dem ein robotergeführtes Werkzeug die Kanten mittels Rollen – meist mehrstufig – umformt und so die Verbindung herstellt. /42/

Dieses Verfahren wird in dieser Arbeit genau wie andere linienförmige Verfahren nicht näher betrachtet, da bei der Herstellung von umformfähigen Platinen diese Verfahren nur begrenzt einsetzbar sind.

2.3 Kleben

Die DIN 8593-8 definiert das Kleben als Fügeverfahren unter Verwendung eines Klebstoffs, d.h., eines nichtmetallischen Werkstoffs. Die Füge Teile werden durch Flächenhaftung und durch die innere Festigkeit der Klebeschicht (Adhäsion und Kohäsion) verbunden. Es werden in /43/ nach der Art des Klebstoffs unterschiedliche Klebeverfahren unterschieden:

- Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen
- Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen

Je nach Kleb- oder Füge Teilwerkstoff sind diese Verbindungen mit oder ohne Schädigung der Füge Teile wieder lösbar.

Das Kleben ermöglicht auch ein Fügen von nicht oder nur schwer schweißbaren Werkstoffen ohne Verwendung von Nieten oder Schrauben. Es wird angewendet beim Verbinden von Metall mit Nichtmetall, wie z.B. Holz, Kunststoffe, Gummi, Glas, Porzellan oder in Fällen, in denen die zu fügenden Werkstoffe durch eine Schweißung nachteilige Veränderungen ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften erfahren. /44/

„Eine Klebverbindung besteht aus den beiden Füge Teilen und der dazwischen liegenden Klebschicht. An den Phasengrenzflächen kommt es nach der Benetzung, die eine bedeutende Rolle spielt, zu Wechselwirkungen (Physisorption, Chemisorption) und mechanischem Formschluss. Zusammengenommen sind diese drei Effekte für die Haftkraft (Adhäsion) verantwortlich. Für eine optimale Benetzung muss der Klebstoff während des Fügevorgangs flüssig sein. Seine innere Festigkeit (Kohäsion) gewinnt er schließlich durch physikalische Abbindevorgänge oder durch chemische Reaktion. Eine Besonderheit stellt die Gruppe der Haftklebstoffe dar, welche ständig flüssig bleiben und nicht aushärten, allerdings zäh werden. /45/“

Die Tragfähigkeit der Klebverbindung resultiert aus den mechanisch-technologischen Eigenschaften des Werkstoff und des verwendeten Klebstoffs, die Herstellungsbedingungen und der Belastungsart. Die wesentlichen Vorteile der Klebeverbindung sind eine kostengünstige Herstellung und die im Vergleich zu anderen Verfahren geringere Anforderung an die Oberflächengüte und die Toleranzen. Auch die geringe Verarbeitungstemperatur (<200°C) wirkt sich positiv auf die thermische Belastung der Bauteile aus. Nachteilig ist jedoch zu erwähnen, dass der Stumpfstoß für dieses Verfahren i.d.R. nicht zum Einsatz kommt, da die Tragfähigkeit dieser Verbindung stark eingeschränkt ist. Außerdem sind Klebeverbindungen möglichst auf Scherung zu beanspruchen, da bei Zug-, Druck- und Schälbeanspruchung nur sehr geringe Festigkeitswerte erzielt werden können. /44/

Des Weiteren kann das Kleben in der Großserienfertigung fertigungstechnische und kostentechnische Vorteile bieten. Zusätzlich wirkt der Klebstoff als Dichtstoff bzw. als Isolator zwischen verschiedenen Metallen und kann so Korrosion verhindern. Durch die vollständige flächige Anbindung wird außerdem eine Spaltfüllung erreicht, die wiederum der Spaltkorrosion entgegen wirkt. /44/

2.4 Thermisches Fügen

2.4.1 Schweißen

Schweißen ist nach DIN 1910-1 das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Es kann durch Hilfsstoffe, z.B. Schutzgase, Schweißpulver oder Pasten, ermöglicht oder erleichtert werden. Die zum Schweißen notwendige Energie wird von außen zugeführt. Die Art der Wärmequelle wird für die Einteilung der Schweißverfahren herangezogen. /45/, /46/

Die Schmelzverfahren trennen sich in das Gießschmelz-, Gas-, Widerstandschmelz-, Lichtbogen-, Elektronenstrahl- und Lichtstrahlschweißen. Diese Verfahren finden je nach Art und Anforderung der Fügeaufgabe ihr Einsatzgebiet.

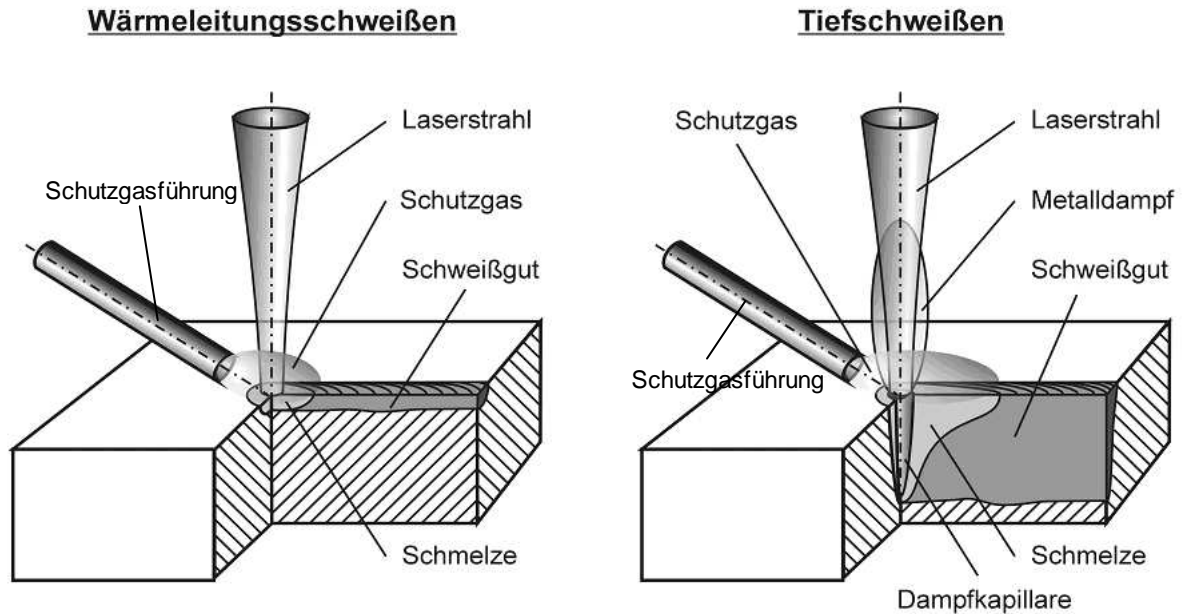
Für diese Arbeit wird als grundlegendes Verfahren nur das Laserstrahlschweißen betrachtet, welches sich im Bereich des Karosseriebaus als bewährtes Verfahren durchgesetzt hat /48/.

Das Laserstrahlschweißen ist ein Schmelzschweißverfahren und unterscheidet sich von anderen Verfahren in der Art der Energiezufuhr. Wird ein Laserstrahl mittels einer geeigneten Optik auf eine Metalloberfläche fokussiert, so wird der Laserstrahl teilweise reflektiert und teilweise absorbiert. Der Absorptions- und der Reflexionsgrad ergeben aufsummiert 100%. Der Absorptionsgrad ist eine werkstoffspezifische Größe, die temperaturabhängig ist und zusätzlich durch die Wellenlänge des Laserstrahls beeinflusst wird.

Unterschieden werden in Abhängigkeit der Intensität der Laserleistung das Wärmeleitungsschweißen und das Tiefschweißen. /49/

Wärmeleitungsschweißen

Der Werkstoff wird beim Wärmeleitungsschweißen anhand der eingebrachten Energie der Laserstrahlung über die Schmelztemperatur aufgeheizt, allerdings reicht die Strahlintensität nicht aus, um einen merklichen Dampfdruck auszubilden /50/. Durch die Vereinigung der Schmelzbäder verbinden sich die zu fügenden Materialien (siehe Abbildung 4). Im Wesentlichen hängt die Wärmeleitfähigkeit vom Material, der Geometrie und der Eigentemperatur des Werkstücks ab und ist in Verbindung mit der Schmelzbadbewegung maßgeblich für die Form und die Tiefe der sich ausbildenden Schweißnaht bzw. des Schweißpunktes verantwortlich. Sowohl für Stahl- als auch für Aluminiumwerkstoffe bietet das Wärmeleitungsschweißen eine hohe Prozessstabilität und erzeugt in der Regel gute Nahtqualitäten mit einer geringen Nahtschuppung und wenig Einbrand bzw. Randkerben. Anwendung findet das Wärmeleitungsschweißen vor allem im Folien- und Dünoblechbereich. Hier werden im Vergleich zu anderen Schweißverfahren bessere Ergebnisse mit geringen Verzügen bei gleichzeitig hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten erzielt /51/. Die Einschweißiefen für dieses Verfahren sind im Allgemeinen < 1 mm.



©LZH

Abbildung 4: Prinzipskizze des Wärmeleitungs- und Tiefschweißens /52/

Tiefschweißen

Im Gegensatz zum Wärmeleitungsschweißen mit Einschweiß-tiefen von < 1 mm können derzeit mithilfe des Tiefschweißeffekts und unter Einsatz der entsprechenden Laserleistung Einschweiß-tiefen von bis zu 25 mm erreicht werden. Damit der Tiefschweißeffekt stattfinden kann, muss die von dem Laserstrahl erzeugte Energiedichte über einem Schwellwert von ca. 10^6 W/cm² (für Stahlwerkstoffe) liegen. Aufgrund der hohen Energiedichte verdampft der zu schweißende Werkstoff und erzeugt einen ausreichend hohen Druck, um eine zum Laserstrahl koaxiale Kapillare auszubilden (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Der hydrostatische Druck sowie die Oberflächenspannung der Schmelze und der Dampfdruck in der Kapillare stehen im Gleichgewicht, so dass diese (häufig auch als Keyhole bezeichnet) nicht zusammenfällt. Der entstandene Dampfkanal ist von einem Schmelzbad umgeben, in welchem die Schmelze bedingt durch die Relativgeschwindigkeit des Keyholes und das vorliegende Druck- und Temperaturgefälle, stark zirkuliert. Das Keyhole folgt den Bewegungen des Bearbeitungskopfes und wird somit entlang der vorgegebenen Schweißkontur geführt, während die Schmelze die Kapillare umströmt und rückseitig erstarrt. Mithilfe des Tiefschweißeffekts lässt sich eine schmale Schweißnaht erzeugen, die im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren ein größeres

Tiefe / Breite-Verhältnis (ca. 5:1) aufweist. Infolge der kleinen Strahl-Stoff-Wechselwirkungszone und der hohen Leistungsdichte im Fokuspunkt befindet sich beim Laserschweißen die Wärmebeeinflussung des Werkstücks auf einem insgesamt niedrigen Niveau. Schweißspannungen und Bauteilverzüge, die durch einen Fügevorgang entstehen, treten beim Laserschweißen in geringerem Maße auf. Eine übermäßige Steigerung der Laserintensität kann einen negativen Einfluss auf das Schweißergebnis haben (siehe Abbildung 5).

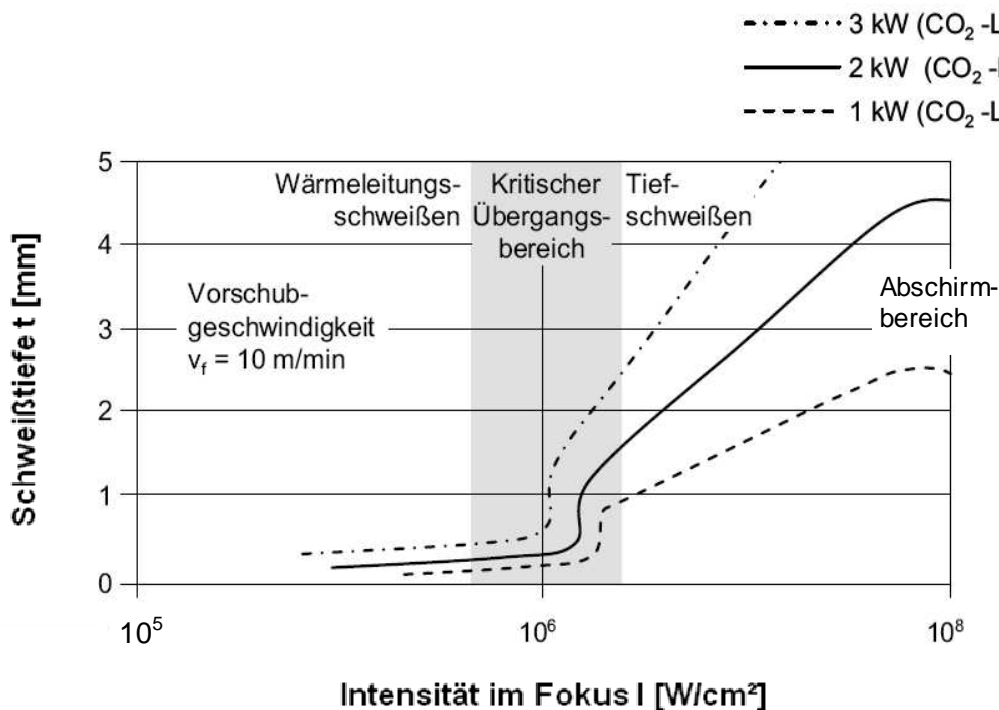


Abbildung 5: Einschweißtiefe als Funktion der Laserleistung und der Intensität im Brennfleck /52/

Ab einem Bereich von 10^7 W/cm^2 (für Stahlwerkstoffe) kann ein abschirmender Effekt des sich an der Werkstückoberfläche befindlichen Plasmas beobachtet werden, wodurch sich die Intensität des auftreffenden Laserstrahls und somit auch die Einschweißtiefe verringert. Die Einschweißtiefe reduziert sich aufgrund des negativen Einflusses des Plasma auf die Strahlpropagation (Fokussierung und Ablenkung); darüber hinaus sinkt auch die Prozessstabilität. /53/

2.4.2 Löten

Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch

Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöt) eine Verbindung der Werkstoffe entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird im Gegensatz zum Schweißen beim Löten nicht erreicht.

Einteilung der Lötverfahren

Die Arbeitstemperatur beim Löten liegt oberhalb der Schmelztemperatur manchmal auch im oberen Bereich des Schmelzintervalls des Lotwerkstoffes aber unterhalb der der zu verbinden Werkstücke /54/. Die DIN ISO 857-2 unterscheidet zwei unterschiedliche Lötverfahren, welche im Folgenden erläutert werden. Über die Arbeitstemperaturen werden die Lötverfahren wie in Abbildung 6 in die Gruppen Weichlöten und Hartlöten eingeteilt.

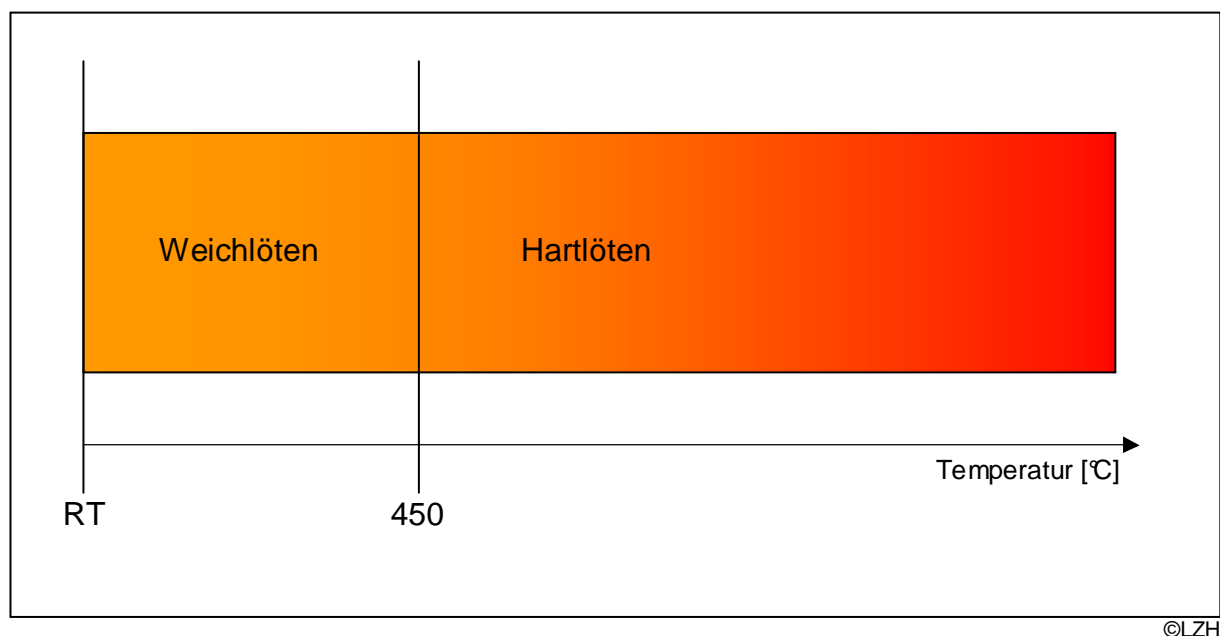


Abbildung 6: Einteilung der Lötverfahren nach der Arbeitstemperatur

Weichlöten

Die Arbeitstemperaturen beim Weichlöten liegen unterhalb von 450°C. Bei diesem Verfahren kommen Lote mit einem Schmelzpunkt von unter 450°C zum Einsatz. Diese Verbindungen finden vornehmlich in mechanisch gering beanspruchten Bauteilen wie z.B. in der Elektroindustrie oder bei industriellen Kühlern Anwendung, was durch das Kriechen von Weichloten unter Last begründet ist /55/.

Hartlöten

Oberhalb von 450°C Arbeitstemperatur werden Verbindungen mit Hartloten nach DIN EN 1044 hergestellt, welche bedingt durch höher erzielbare Festigkeiten als Weichlotverbindungen z.B. Einsatz im Rohrrahmenbau der Fahrzeugindustrie finden. Es gibt verschiedenste Anwendungen im allgemeinen Maschinenbau, bei denen die Werkstoffe mittels Hartlöten stoffschlüssig verbunden werden. Bei Kombinationen von Werkstoffen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften bietet das Löten Vorteile gegenüber dem Schweißen. Als Ersatz für das Schweißen eignet sich das Hartlöten besonders, da Lote mit ausreichender Festigkeit verwendet werden. Eine Hartlötverbindung erweist sich als vorteilhaft beim Leichtbau, wenn z. B. Titan mit Stahl zu einem Bauteil verbunden werden soll /56/.

Das Hochtemperaturlöten (Bezeichnung nach alter Norm DIN 8505) ist ein Lötverfahren unter Luftabschluss (Vakuum, Schutzgas) mit Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb von 900°C liegen. Typischerweise wird bei diesem Verfahren auf die Verwendung von Flussmittel zur Beseitigung von Oxidschichten verzichtet, da der Einsatz eines reduzierenden Schutzgases die Beseitigung der Oxidschicht, die eine ausreichende Benetzung verhindert, bewirkt. Beispielhaft sei hier ein Chrom-Nickel-Stahl genannt, der eine Arbeitstemperatur von ca. 1000°C benötigt, um eine stabile Auflösung der Chromoxidschicht zu gewährleisten. Diese Chromoxidschicht wird unterhalb der benötigten Arbeitstemperatur nicht reduziert sondern verstärkt, was ein Benetzen der Oberfläche des Werkstücks unmöglich macht. Die Verweildauer auf der Lötarbeitstemperatur muss bei diesem Verfahren gering gehalten werden, da es ansonsten zu einem Aufgliedern des Grundwerkstoffes oder zur Bildung spröder Phasen kommen kann /57/.

Bindemechanismen

Die für den Bindevorgang entscheidenden Vorgänge laufen an der Phasengrenze des flüssigen Lotes und des Grundwerkstoffes ab, es sind also Grenzflächenreaktionen. Entscheidend für eine gute Verbindung sind die Benetzungs- und Ausbreitungsvorgänge des Lotes und Flussmittels, sowie die Diffusionsvorgänge zwischen dem Lot und dem Grundwerkstoff. Die Festigkeit einer Lötverbindung wird durch die Haftfestigkeit des Lotes (Adhäsionskräfte) oder die innere Festigkeit der Verbindung (Kohäsionskräfte) bestimmt /58/.

Die Diffusionsvorgänge sind thermisch aktivierte Platzwechselfvorgänge, bei denen ab einer bestimmten Aktivierungsenergie Atome ihre Plätze im Gitter wechseln. Diese Vorgänge bedürfen eines Eutektikums oder Mischkristalls zwischen mindestens einem Grundwerkstoff und dem Lot. Die theoretische Beschreibung des Diffusionsweges ist mit dem Fick'schen Phasengesetz nach Gleichung 1 gegeben.

$$X^2 = 2 * D_W * t_D \quad \text{(Gl. 1) /59/}$$

Der Diffusionsweg X wird durch die Zeit t_D und den Diffusionskoeffizienten D_W bestimmbar.

Bei der Diffusionslänge D (auch Legierungszone) ist es entscheidend, wie weit die Diffusionslängen im Grundwerkstoff D_{GW} und im Lot D_L ausgeprägt sind. Entlang der Grenze G zwischen Grundwerkstoff und Lot wird die unterschiedliche Bewegungsrichtung der Elemente A_{Lot} und A_{GW} unterschieden. Die Bewegungsrichtung und die Tiefe der Diffusion ist entscheidend für die Breite der Legierungszone. Durch eine Abnahme der Breite der Legierungszone kann die Versagenswahrscheinlichkeit reduziert werden. In Abbildung 7 sind einige charakteristische Formen der Legierungszonen dargestellt. Je nach Arbeitstemperatur T_A der Lote entstehen Legierungszonen mit einer Breite von $0,5 \mu\text{m}$ bis zu $20 \mu\text{m}$. Die größte Bauteilsicherheit existiert dann, wenn die Legierungszone aus Primärkristallen oder aus Mischkristallen besteht.

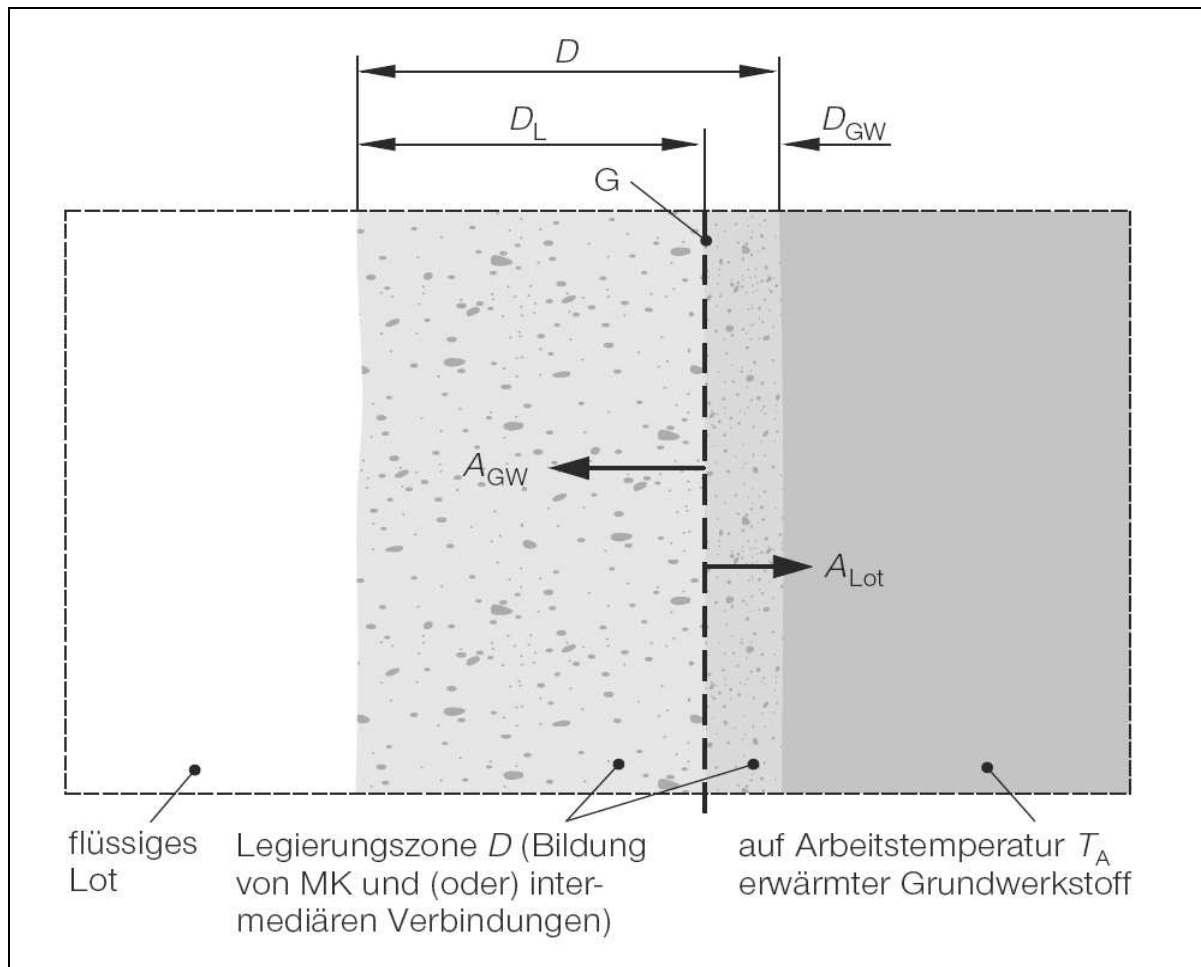


Abbildung 7: Legierungszonen nach /61/

Grundsätzlich ist die durch den Lötvorgang realisierte Verbindung in ihrem makroskopischen Aufbau und ihrer Beschaffenheit inhomogen. D.h., es bilden sich Zonen unvermischten Lotes, Übergangsbereiche mit Diffusionszone, sowie thermisch beeinflusste Bereiche des Grundwerkstoffes /60/.

Die Benetzbarkeit der Lötfläche ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine gute Lötbarkeit. In erster Linie bedarf es für die Benetzung einer metallisch reinen Oberfläche, die nicht durch Oxidschichten bedeckt ist. Des Weiteren ist es für die Festigkeit der Verbindung erforderlich, dass Lot und Grundwerkstoff Mischkristalle oder intermediäre Phasen, auch in geringer Konzentration, bilden können. Durch die Bildung dieser Mischgefüge entstehen Diffusionszonen im Kontaktbereich zwischen dem Grundwerkstoff und dem Lot. Je höher die Arbeitstemperatur des Lötvorgangs, desto stärker finden die Platzwechselforgänge für die Diffusion statt und der Phasensaum bildet sich stärker aus.

Eine Benetzung kann nur dann stattfinden, wenn der Grundwerkstoff frei von jeglicher Oberflächenbeschichtung ist. Die Beschichtungen können Fette, Lacke, aber auch - wie oben erwähnt - Oxidschichten sein, welche vor dem Löten mechanisch oder chemisch entfernt werden müssen. Die den Lötvorgang behindernden Oxide werden mit Flussmittel (siehe oben) beseitigt. Eine optimale Benetzung tritt dann ein, wenn der Benetzungswinkel $\theta = 0^\circ$ ist. In Abbildung 8 ist die Beziehung zwischen den Grenzflächen Lot/Werkstück beim Lötvorgang beschrieben. In /58/ werden Lötverbindungen bis zu einem Benetzungswinkel von $\theta \leq 30^\circ$ als brauchbar angegeben.

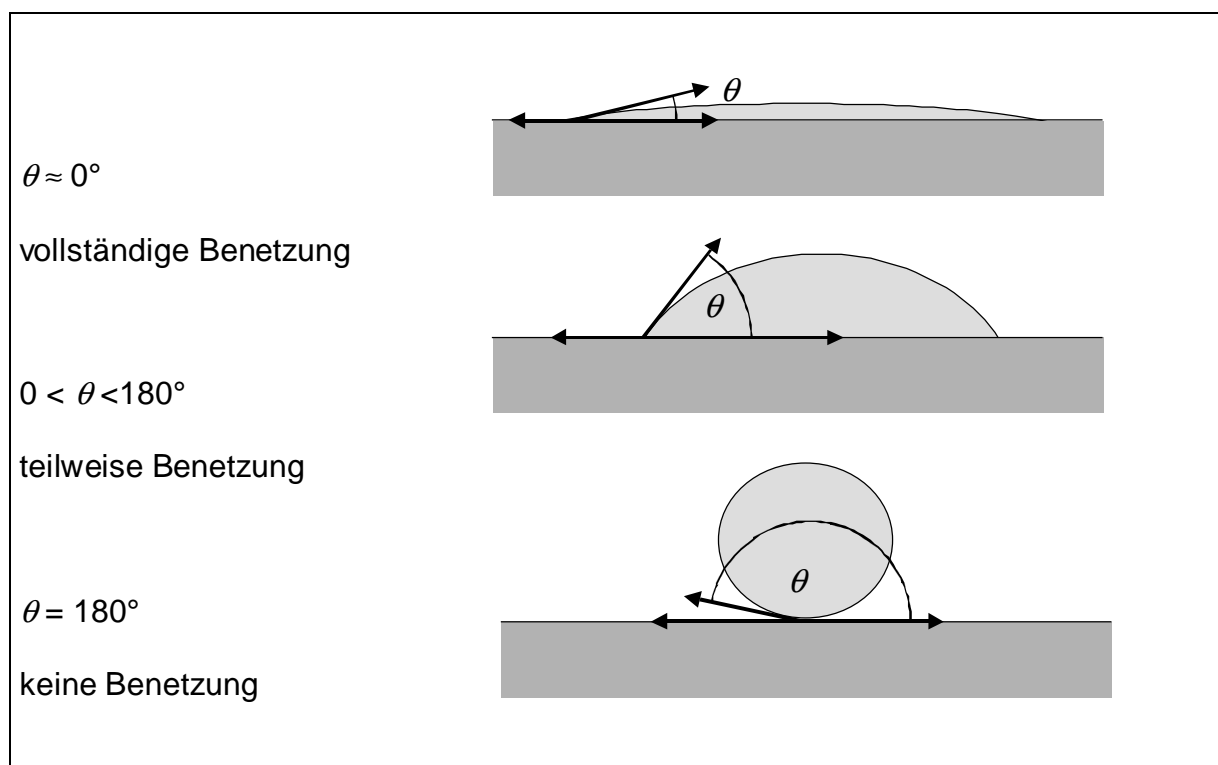


Abbildung 8: Benetzungswinkel beim Löten /61/

In Abbildung 9 ist das Young'sche Spannungstheorem schematisch dargestellt. Eine Abhängigkeit der Haftspannung (σ_{12}) von den Spannungen zwischen dem Werkstück und der Atmosphäre (σ_{13}) sowie zwischen dem Werkstück und der Flüssigkeit (σ_{23}) ist mit der unten aufgeführten Gleichung 2 gegeben. /65/

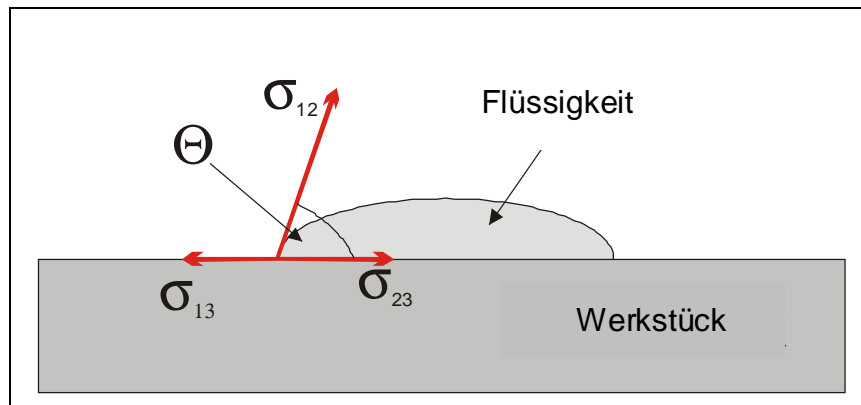


Abbildung 9: Young'sches Spannungstheorem für Flüssigkeiten

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} + \sigma_{12} \cos \theta \quad (\text{Gl. 2}) /65/$$

Die maximale Haftspannung ist bei einer optimalen Benetzung zu verzeichnen, die wie oben erwähnt bei $\theta = 0^\circ$ vorliegt.

Die Ausbreitung des Lotes hängt zum einen von der Benetzungsfähigkeit des Grundwerkstoffes zum anderen vom Fließen des Lotes ab. Die Benetzbarkeit des Lotes kann auch als dessen Fähigkeit beschrieben werden, in enge Spalte entgegen der Schwerkraft einzudringen. In /64/ werden unterschiedliche Größen von Spaltbreiten b genannt, welche in vier Kategorien eingeteilt werden können:

- $b < 0,05 \text{ mm}$
- $0,05 \text{ mm} < b < 0,2 \text{ mm}$
- $0,2 \text{ mm} < b < 0,5 \text{ mm}$
- $b > 0,5 \text{ mm}$

In Abbildung 10 ist der kapillare Fülldruck über der Spaltbreite aufgetragen und lässt deutlich die mit geringer werdender Breite zunehmende Steigfähigkeit des flüssigen Mediums erkennen. Für verschiedene Anwendungen werden unterschiedliche Spaltbreiten angestrebt. So ist für das Handlöten ein größerer Spalt als beim maschinellen Weichlöten in der Literatur empfohlen. /61/

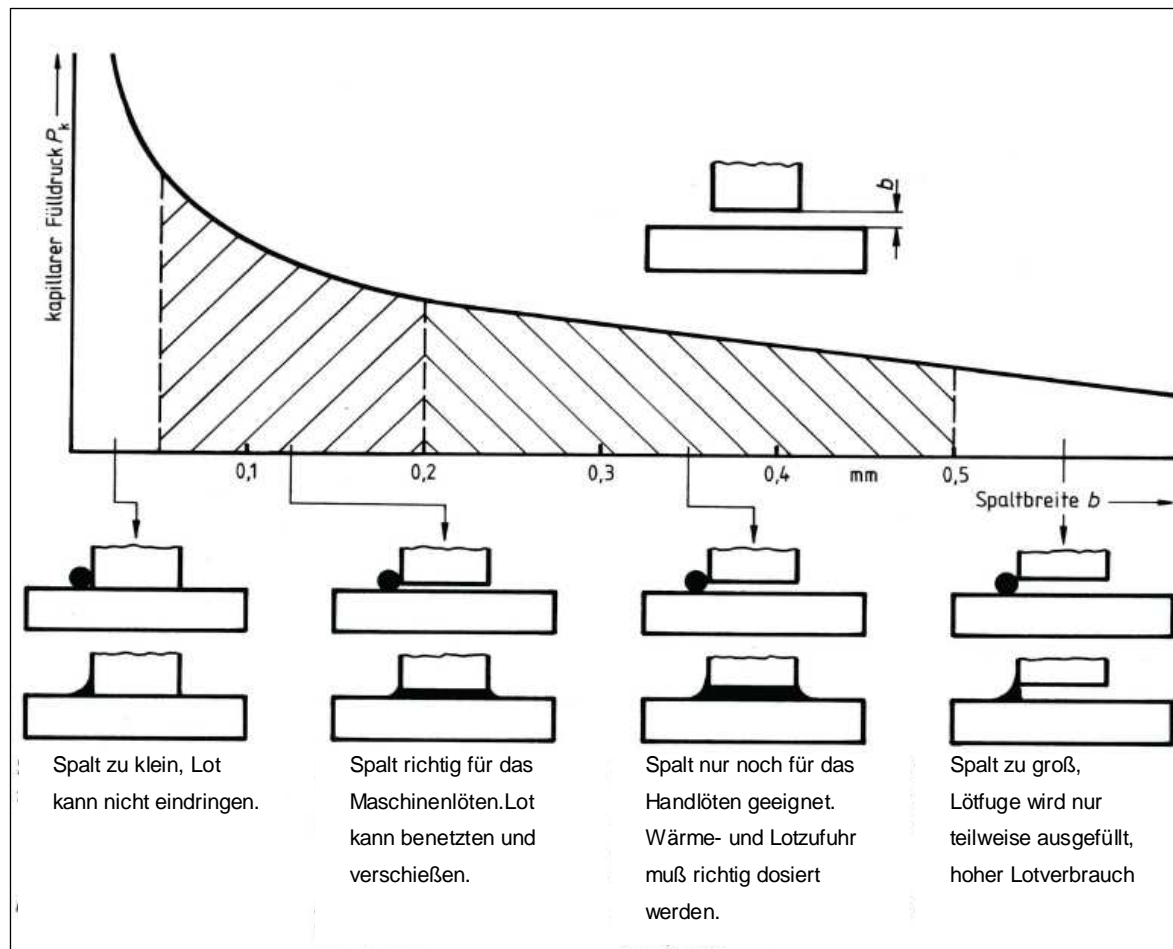


Abbildung 10: Kapillarer Fülldruck in Abhängigkeit der Spaltbreite nach /64/

Die maximale Steighöhe hängt nicht nur von der Fließeigenschaft des Lotes sondern auch von der Breite des Lötspaltes ab. Für gleichmäßige Ergebnisse ist es daher erforderlich, dass die Spaltbreiten bei allen Bauteilen reproduzierbar eingestellt werden. Es besteht die Möglichkeit des Einschießens des Lotes in einen Spalt, wenn dieser über die richtige Spaltgeometrie verfügt. Es ist jedoch auf Entgasungsbohrungen zu achten, durch die Luft oder verdampfendes Flussmittel aus der Lötstelle entweichen kann. Ansonsten können durch den Einschluss des Gases im Lot Poren entstehen können.

Lötbarkeit

Die Eigenschaft eines Bauteils, durch Löten so hergestellt werden zu können, dass es die gestellten Anforderungen erfüllt, wird nach DIN 8514 als Lötbarkeit bezeichnet. Die Lötbarkeit wird beeinflusst von dem Werkstoff (Löteignung), der Konstruktion (Lötsicherheit) und der Fertigung (Lötmöglichkeit).

Die Lötbarkeit eines Werkstoffes wird durch dessen verschiedenen Eigenschaften geprägt /60/:

- Physikalische Eigenschaften
 - Solidustemperatur
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Wärmeausdehnung
 - Benetzbarkeit

- Chemische und metallurgische Eigenschaften
 - Chemische Zusammensetzung
 - Oxidationsverhalten
 - Diffusions- und Löslichkeitsverhalten
 - Gefügeausbildung
 - Härteneigung
 - Aushärtbarkeit
 - Korrosionsverhalten

- Mechanische Eigenschaften
 - Festigkeitsverhalten
 - Eigenspannungszustand

Die Lötbarkeit eines Werkstoffes ist umso besser, je weniger der oben genannten Eigenschaften beim Festlegen der Lötbedingungen zu einem Zielkonflikt führen. Hierdurch wird u. U. eine Abweichung der optimalen Konstruktionsauslegung notwendig, welche eine geringere Lötbarkeit zur Folge hat. Eine Übersicht über die Lötbarkeit der Werkstoffe zeigt die folgende Tabelle 1. Bei der Wahl der Prozessparameter muss immer der Werkstoff mit der geringeren Lötbarkeit beachtet werden.

Tabelle 1: Lötignung von Werkstoffen (in Anlehnung an /61/)

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Werkstoffe, die mit Universalloten und -flussmitteln sowie allen üblichen Verfahren gelötet werden können. z.B.:Kupfer und Kupferlegierungen, Nickel und Nickellegierungen, Eisenwerkstoffe, beliebige Stähle, Kobalt, Edelmetalle	Werkstoffe, die Speziallote und/oder -flussmittel, jedoch keine speziellen Verfahren erfordern z.B.:Aluminium und Aluminiumlegierungen, Hartmetalle, Stellite, Chrom, Molybdän, Wolfram, Tantal, Niob, weichlotähnliche Werkstoffe	Werkstoffe, die nur unter Verwendung spezieller Lote und spezieller Verfahren gelötet werden können. z.B.:Titan, Zirkonium, Beryllium, Keramiken

Die Lötbarkeit wird durch eine lötgerechte Konstruktion und die Beanspruchungsbedingungen beeinflusst. Je weniger konstruktionsbedingte Anforderungen an das Bauteil gestellt werden, desto höher ist die Lötbarkeit. Auch die Wahl der Werkstoffkombination und der Fertigungsbedingungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die resultierende Lötbarkeit.

Entsprechendes gilt für die Lötmöglichkeit. Diese ist umso besser, je mehr die von der gewählten Werkstoffkombination abhängigen, fertigungsbedingten Merkmale bei der Konstruktion berücksichtigt wurden. Diese Merkmale sind

- Größe und Form des Bauteils
- Maßhaltigkeit
- Oberflächenbeschaffenheit
- Form- und Abmessungen des Lötspaltes
- Lage des Lötdepots und der Spaltentlüftungen
- Fixierung der Teile
- Menge und Form des Lotes
- Stoffe und Maßnahmen zur Oxidbeseitigung

- Lötverfahren, Lötprogramm
- Wärmebehandlung
- Reinigen und Prüfen der Lötstelle /63/

Lotsysteme

Unter einem Lot versteht man den zum Löten verwendeten Zusatzwerkstoff. Die chemische Zusammensetzung des Lotes, welches sich von der Zusammensetzung des Grundwerkstoffes unterscheidet, erfolgt für den Lötprozess zweckentsprechend. Die Gefügeausbildung eines Lotes und der Diffusionszone zwischen dem Lot und dem Grundwerkstoff ist erheblich von den Löt- und Abkühlbedingungen abhängig /65/, /66/. Generell wird zwischen Fertig-, Reaktions-, Aktiv- und Verbundloten unterschieden. Das Fertiglot hat seine zweckentsprechende Zusammensetzung schon vor dem Lötprozess, bei einem Reaktionslot bildet sich diese erst während des Prozesses infolge metallurgischer Wechselwirkungen. Mittels Aktivloten werden sowohl metallische als auch nichtmetallische Werkstoffe benetzt, ohne diese vorher zu metallisieren. Verbundlote sind Lotbleche, -bänder oder -folien, die aus mehreren Schichten bestehen, weshalb sie auch Schichtlot genannt werden. Die Lotwerkstoffe werden meist in Drahtform in die Prozesszone eingebracht, wobei zum Teil Fülldrahtlote mit integriertem Flussmittelkern verwendet werden.

In den meisten Fällen sind Lotwerkstoffe Legierungen aus Schwermetallen, wie Blei, Zinn, Zink und Silber. Häufig sind die Legierungen so eingestellt, dass sie eine eutektische oder naheutektische Legierung darstellen. Dies ist durch die niedrige Schmelztemperatur eines Eutektikums begründet, was eine möglichst geringe Arbeitstemperatur für das Lot ermöglicht. Die Arbeitstemperatur liegt entweder im Schmelzbereich oder etwas darüber /63/. Ein weiterer Vorteil einer eutektikumnahen Legierung ist die enge Begrenzung des Erstarrungsintervalls, was ein zähes Fließen des Lotwerkstoffes verhindert. Beginnt das Lot zu schmelzen, verflüssigt sich in kürzester Zeit der gesamte Lotwerkstoff zu einer dünnflüssigen Schmelze. Einzig beim Handlöten kann es sinnvoll sein eine gewisse Teigigkeit des Lotes anzustreben, da ein einfacheres Aufbringen und Erwärmen mit dem LötKolben beziehungsweise -brenner die Arbeit erleichtert.

Bei der Entwicklung von Lotlegierungen werden bei mehrelementigen Lotsystemen häufig die Legierungen so eingestellt, dass eine eutektische Rinne im Mehrstoffsystem ausgenutzt wird um eine geringe Arbeitstemperatur zu erzielen.

Eutektische Zinn-Blei-Lote finden aufgrund ihrer niedrigen Schmelztemperatur von ca. 183°C beim Weichlöten ihren Einsatz.

Für das Hartlöten kommen silberbasierte Lote zum Einsatz, die durch niedrigere Schmelztemperaturen geringere thermische Belastungen ermöglichen. Lotwerkstoffe mit Silbergehalten von über 40% sind keine Seltenheit und werden trotz der hohen Kosten in der Praxis häufig verwendet.

Einen noch höheren Gehalt an Edelmetallen haben die Hochtemperaturlote, die nicht selten bis zu 70% Silber, 80% Kupfer oder 30% Palladium enthalten. In besonderen Fällen ist es sinnvoll, mit reinem Palladium zu arbeiten, was eine Arbeitstemperatur von 1770°C ermöglicht.

Flussmittel

Die Ausbildung einer stabilen Oxidschicht auf der Grundwerkstoffoberfläche verhindert dessen Benetzung mit dem Lot. Eine Entfernung dieser Oxidhaut ist daher unverzichtbar. Untersuchungen in /67/ haben ergeben, dass ein Entfernen der Oxidhaut mit einer WIG-Quelle oder einem gepulsten Laser, welcher jeweils dem Lötprozess vorgeschaltet war, in Abhängigkeit der Stoßgeometrie schlecht bis gar nicht funktioniert. Es ist daher notwendig ein Flussmittel zum Auflösen der Oxidhaut zu verwenden, wie es auch /68/ empfiehlt.

Nach DIN EN 1045 Teil 1 bis 3 sind Flussmittel nichtmetallische Stoffe, die vorwiegend die Aufgabe haben vorhandene Oxide von den Lötflächen zu beseitigen und ihre Neubildung zu verhindern /69/.

Die DIN EN 1045 unterscheidet generell zwischen zwei Typen von Flussmitteln, die beim Hartlöten von Leichtmetallen Verwendung finden:

- Typ FL10: Flussmittel auf Basis hygroskopischer Chloride und Fluoride, vor allem Lithiumverbindungen
- Typ FL20: Flussmittel auf Basis nichthygroskopischer Fluoride

Die Flussmittel können Schwermetallchloride enthalten, die die Benetzungsverhältnisse weiter verbessern und die Ausbreitung des Lotes fördern. Die genaue

Zusammensetzung des Flussmittels ist dabei speziell auf den Anwendungsfall auszulegen. Entscheidende Faktoren stellen die Art der Aufbringung, die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die gesamte Zykluszeit des Lötens dar.

In /70/ wird ein Flussmittelschmelzpunkt von 50°C unterhalb des Schmelzpunkts des Lotes empfohlen, wobei die Arbeitstemperatur des Lotes im Wirkungsbereich des Flussmittels liegen soll.

Bei der Herstellung der hybriden Verbindung aus Stahl und Aluminium werden nur die nichthygroroskopischen Flussmittel verwendet, da Rückstände des Flussmittels auf der Lötnaht Feuchtigkeit aufnehmen. Diese Feuchtigkeit kann als Elektrolyt für Korrosionsvorgänge wirken. Diese Korrosion des Stahlwerkstoffes würde zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der THB führen.

Untersuchungen mit dem Flussmittel FL20 und einem als Fülldraht ausgeführten LH20 mit Lotummantelung sind in /71/ durchgeführt worden. Bei der Verwendung des Flussmittels FL20 und eines separaten Lotwerkstoffes wurden maximal 70% der Zugfestigkeiten des Grundwerkstoffes erreicht. Die Kombination des Lotes und des Flussmittels in einem einzigen Fülldraht stellt sich in der Handhabung als einfacher dar. Lediglich die Unterschiede in den Arbeitstemperaturen zwischen dem Lotwerkstoff mit ca. 480°C und dem Flussmittel mit 420° bis 470°C stellen sich als Begrenzung des Prozessfensters dar, welches theoretisch nicht existiert. Es muss demnach mit einer überhöhten Temperatur gearbeitet werden, wenn beide Zusatzwerkstoffe zeitgleich in die Prozesszone zugeführt werden.

Einsatz von Zwischenschichten

Im Allgemeinen werden Zwischenschichten zur Umgehung der Bildung von intermetallischen Phasen verwendet. Hierbei werden die Zwischenschichten als trennendes Medium zwischen den Werkstoffen genutzt oder dienen der Benetzungsförderung.

Die positive Wirkung von Zink auf das Benetzungsverhalten konnte in /72/ und /73/ nachgewiesen werden. Eine Verwendung von zinkplattiertem Aluminium zur Umgehung der benetzungshemmenden Al_2O_3 -Decksicht wird in /74/ empfohlen. Hiermit ist es möglich flussmittelfrei im Ofen zu löten und eine belastbare

Fügeverbindung herzustellen. Die benetzungsfördernde Wirkung von titanbeschichteten Blechen konnte durch /75/ nachgewiesen werden.

Suslov konnte in /76/ nachweisen, dass beim Löten von Aluminiumwerkstoffen, die mit Silber oder Kupfer beschichtet waren, eine Oxidation des Aluminiums ganz oder teilweise verhindert werden konnte. Die resultierenden Festigkeiten konnten im Vergleich zu unbeschichteten Proben deutlich gesteigert werden.

2.4.3 Laserstrahllöten

Charakteristisch für den Lötprozess mittels Laserstrahl ist eine räumlich eng begrenzte Energieeinbringung in Verbindung mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Durch die kurzen Energieeinwirkungszeiten werden die Verbindungsmechanismen stark beeinflusst. Die Aufheiz- und Abkühlphase sind durch einen hohen Temperaturgradienten gekennzeichnet. Hierdurch haben grobkörnige Gefüge und spröde Phasen nur wenig Zeit sich auszubilden /78/, /83/. Kleine Diffusionszonen sind beim Löten mit Laserstrahlung charakteristisch, wobei diese teilweise unterhalb der Nachweisgrenze liegen bzw. nur bis zu 2 µm breit sind /84/.

Das Lot kann direkt durch den Laserstrahl oder indirekt über den Grundwerkstoff erwärmt und aufgeschmolzen werden. Es wird automatisiert als Draht oder Lotpulver zugeführt oder in Form von Einlegeteilen bzw. Formteilen appliziert.

Die Vorschubgeschwindigkeit beim Laserlöten wird eingeschränkt durch:

- die Reduktionsgeschwindigkeit der Oberflächenoxide
- die Wärmeleitungsbedingungen der Werkstoffe
- das Fließverhalten der Lote

Zur Minimierung der Einschränkungen schlägt /84/ den Einsatz von Nahtwurzelschutz, vorgeheiztem Lot und/oder Pulverlot vor.

Die Anwendung der Lasertechnologie beschränkt sich derzeit auf spezielle Bereiche, in denen die Vorteile wie gute Steuer- und Regelbarkeit, ein hoher Temperaturgradient sowie die starke Fokussierbarkeit zum Tragen kommen. Als Beispiele dienen hier das flussmittelfreie Hartlöten von Brillengestellen (statt Induktionslöten) und das Löten von Elektronikbauteilen, deren Drähte so dünn sind, dass sie für konventionelle Löttechniken zu empfindlich sind. Ein weiteres großes

Einsatzgebiet findet sich beim Löten von Karosserieblechen in der Automobilindustrie. /85/ - /89/

Laserstrahllöten von Fe-Al-Mischverbindungen

Die in Kapitel 2.1.2 beschriebene Problematik der Phasenbildung bei hybriden Verbindungen aus Aluminium und Stahl ist nur durch eine stoffliche Trennung der beiden Grundwerkstoffe möglich. Es bedarf also eines Verbindungswerkstoffes zwischen den Fügepartnern, der eine ausreichende Festigkeit der Verbindung gewährleistet, aber eine Phasenbildung unterdrückt.

In der Literatur werden hierfür häufig Lötprozesse oder so genannte Schweißlötprozesse eingesetzt. /90/-/93/

Bei einem Lötprozess wird ein Lot verwendet, welches einen niedrigeren Schmelzpunkt besitzt als die beiden Fügepartner. Dieser Prozess ist in der Lage Stahl und Aluminium zu verbinden, ohne einen direkten Kontakt der Grundwerkstoffe zu erfordern. Lediglich ein geringer Aluminiumanteil, der im Lot enthalten ist, kommt mit dem Stahlgrundwerkstoff in Kontakt und wird als hinnehmbar eingestuft /75/.

Ein Lötprozess, bei dem einer der beiden Werkstoffe auf- oder angeschmolzen wird, wird in der Literatur als Schweißlötprozess bezeichnet, wobei es sich bei dieser Art der Fügeverbindung um eine Naht mit Doppelcharakter handelt /90/. Auf der Seite des Stahls handelt es sich um einen reinen Lötprozess, aber auf der Seite des Aluminiums um einen Schweißprozess. Das Aufschmelzen des Aluminiumgrundwerkstoffes ermöglicht einen Kontakt des Aluminiums mit dem Stahl, was eine Bildung von intermetallischen Phasen fördert. Die Temperaturen, die zum Schmelzen des Aluminiums notwendig sind, fördern die Diffusionsvorgänge auf der Stahlseite und somit direkt die Bildung von Fe-Al-Verbindungen. In /91/ berichtet der Autor ausführlich von Untersuchungen zum Schweißlöten mit verschiedenen Lotwerkstoffen, wobei sich Zinklote beim Schweißlöten durch eine nicht mögliche Umformung auszeichnen. Er empfiehlt bei benötigter Umformung für seinen Prozess die Verwendung von Aluminiumloten. Durch den beim Schweißlöten notwendigen Überlappstoß wird im Vergleich zu der Prozesstechnik dieser Arbeit die Umformung durch die Stoßgeometrie behindert. Die Verwendung eines Stumpfstoßes bei gleichzeitigem Nichtanschmelzen der Stoßkanten wirkt sich hinsichtlich der Umformbarkeit positiv aus, da ein ebenerer Platinentausgangszustand vorliegt.

Durch die Zugabe des Elementes Silizium kann nach /25/, /75/, /95/-/98/ die Bildung von Eisenaluminiden reduziert werden. Bei der Wahl des Lotwerkstoffes sollte bei einem aluminiumbasierten Lotwerkstoff immer auf einen ausreichenden Siliziumgehalt (mind. 5 m%) geachtet werden.

In Abbildung 11 sind zwei Schliffbilder von hybriden Verbindungen dargestellt. Es handelt sich um eine Paarung aus einem Tiefziehstahl DC04 und einer aushärtbaren Aluminiumlegierung AA6016. Im linken Bild ist deutlich zu erkennen, dass die Werkstückkante des Aluminiums beim Lötprozess angeschmolzen ist, welche sich mit dem Lotwerkstoff vermischt hat. Es handelt sich somit um einen Schweißlötprozess. Im rechten Bild ist ein reiner Lötprozess im Schliff zu sehen. Der detektierte intermetallische Phasensaum ist auf wenige μm begrenzt. Durch das geringe Anschmelzen des Grundwerkstoffes kann der Kontakt zwischen Eisen und Aluminiumatomen und damit die Bildung von intermetallischen Phasen signifikant reduziert werden.

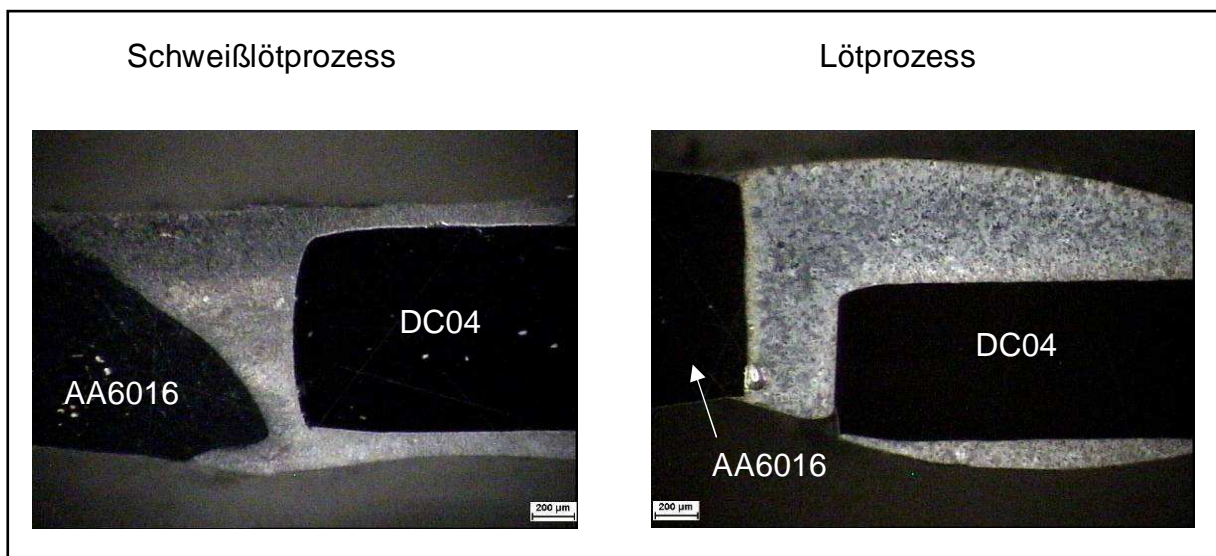


Abbildung 11: Schliffbilder eines Schweißlöt- und eines Lötprozesses im Vergleich (Lot: ZnAl4, $v_f = 1,5 \text{ m/min}$; links: $PL = 3,2 \text{ kW}$; rechts: $PL = 2,6 \text{ kW}$)

In der Literatur /99/-/102/ werden Phasensaumdicken von bis zu $10 \mu\text{m}$ als tolerierbar benannt. Dicken bis $5 \mu\text{m}$ werden für die Umformbarkeit als unkritisch eingestuft /99/. Die genaue Zusammensetzung der Phasensäume und ihrer Verteilung wird von den Autoren unterschiedlich bezeichnet. So wurden gerade bei den hochenergetischen Prozessen wie MSG- und NVEB-Schweißen von gleichmäßigen Phasensäumen mit konstanten Dicken berichtet /99/. Bei den energieniedrigeren Prozessen Laserstrahlloten und CMT wird vorwiegend von einer sprunghaften Änderung der

Phasensaumdicke während des Fügens berichtet, wobei jedoch die Dicke insgesamt geringer ist als bei den höherenergetischen Prozessen /100/, /101/. Bei Zugversuchen in /102/ wurde bei unterschreiten einer Phasensaumdicke von 10 µm ein Versagen von Zugversuchproben ausschließlich im Bereich des Grundwerkstoffs detektiert.

Strahlpendeln zur Reduzierung der Intensität

Das Strahlpendeln bewirkt bei gleichen Parametern für die Vorschubgeschwindigkeit und die Laserleistung eine Reduzierung der Intensität der Laserstrahlung auf dem Werkstück. Folglich führt dieses zu einer geringeren Arbeitstemperatur für den Lötprozess, welche jedoch für eine längere Zeit vorherrscht.

Nach dem zweiten Fick'schen Diffusionsgesetz (Gl. 3) gilt der exponentielle Zusammenhang für die Diffusionslänge X:

$$X^2 = 2 * D_0 \exp(-Q/RT) * t_d$$

(Gl. 3) /59/

D_0 = Diffusionskoeffizient Grundwerkstoff

Q = Aktivierungsenergie

R = universelle Gaskonstante

t_d = Diffusionszeit

T = absolute Temperatur

Dieser Zusammenhang ist bei gleichem Grundwerkstoff und Loten abhängig von der absoluten Temperatur T und der Zeit für den Diffusionsprozess t_d . Bei näherer Betrachtung des mathematischen Zusammenhangs ergibt sich eine hohe Temperatur und eine möglichst lange Haltezeit als diffusionsfördernd. Unter der Prämisse, dass ein reiner Lötprozess angestrebt ist ergibt sich als Randbedingung eine Obergrenze für die absolute Temperatur $T < T_{sAl}$. Somit ergibt sich nur die Möglichkeit, die Diffusionszeit zu verlängern. Die Verlängerung kann demzufolge nur durch Verringerung des Vorschubs oder eine Aufweitung des Brennflecks in Vorschubrichtung erfolgen, da durch eine Erhöhung der Laserleistung die maximale Temperatur über die Schmelztemperatur steigen würde.

Die Auswirkung der verringerten Intensität auf die Keimbildung ist ebenfalls von gesteigertem Interesse, da die Kornfeinung im Bereich der Lötnaht nach der Hall-Petch-Beziehung (Gl. 4) sich positiv auf die Festigkeit des Werkstoffes auswirkt. Die erhöhte Zugfestigkeit R_e kann über die Kornanzahl K , den mittleren Korndurchmesser d_K und die Grundwerkstoffzugfestigkeit σ_0 erreicht werden.

$$R_e = \sigma_0 + K/d_k$$

(Gl. 4) /77/

Die Feinheit der Körner eines Gefüges hängt von den Abkühlbedingungen ab. Maßgeblich für die feine Erstarrung ist eine hohe Keimzahl. Kristallisationskeime müssen eine bestimmte Größe aufweisen, um stabil zu bleiben. Diese Größe ist abhängig von der vorherrschenden Temperatur je geringer die Temperatur ist, desto geringer ist die erforderliche Keimgröße. Eine geringe Überhitzung des Lotes sollte angestrebt werden, um ein feinkörniges Lotgefüge zu erhalten.

Eine Verbesserung der Diffusionsvorgänge durch eine Variation der Brennfleckgeometrie konnte theoretisch errechnet und in Versuchen nachgewiesen werden. Die Veränderung des Fokus wurde in /78/ durch ein Anstellen des Bearbeitungskopfes zu der Werkstücknormalen erreicht. Die Diffusionszeit bei einem Brennfleck mit 1 x 4 mm konnte um 0,3 sek. im Vergleich zu einem 1 x 1 mm Brennfleck verlängert werden. Hierdurch wurde eine optimierte Diffusionstiefe erreicht und dadurch eine Festigkeitssteigerung erzielt.

2.5 Grundwerkstoffe

2.5.1 Stahlwerkstoffe

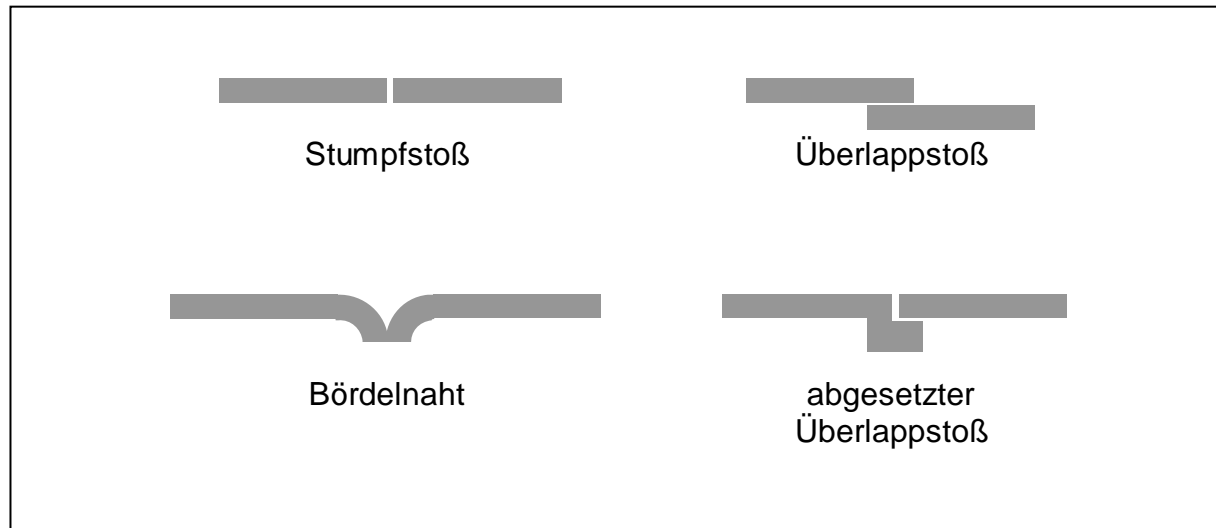
Die Stahlwerkstoffe fallen hinsichtlich ihrer Löteignung laut Tabelle 1 in die erste Gruppe und sind im Allgemeinen gut lötbar. Die Lotauswahl richtet sich nach dem angewandten Fügeverfahren, den späteren Einsatzbedingungen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Hartlötungen von Stahlblechen können die gleichen Festigkeiten wie Schweißverbindungen erreichen, hierbei werden vorrangig Kupfer-, Messing-, Neusilber- oder Silberlote sowie Lote auf Nickelbasis verwendet /79/, /80/.

Hartlöten im Karosserierohbau

Das Fügen von Stahlblechen im Karosseriebau geschieht überwiegend mittels Schweißen. Beim Schweißen wird grundsätzlich mehr Wärme in die Bauteile eingebracht als beim Löten. Diese resultiert aus dem deutlich höheren Reflexionsanteil beim Löten als beim stärker fokussierten Schweißen. Eine hohe Energieeinbringung begünstigt Bauteilverzüge, Gefügeänderungen und das eventuelle Abbrennen der Zinkschicht, so dass das Löten vorteilhaft ist. Außerdem

kann durch die gute Oberflächeneigenschaft der Lötnahtoberraupe ein Einsatz der Lötverbindungen im Sichtbereich ohne große Nachbearbeitung erfolgen.

Anwendungsbedingt werden im Karosseriebau überwiegend I-Nähte, Bördelnähte und Flächennähte am Überlappstoß durchgeführt (siehe Abbildung 12).



©LZH

Abbildung 12: Nahtformen im Karosseriebau

Die konventionellen Löttechniken im Karosseriebau sind das Flammlöten mit dem Acetylen-Sauerstoffbrenner und das MIG-Löten. Die Lasertechnik wird immer stärker angewandt. Als Lote werden die kostengünstigen Kupferbasislote CuZn40, CuAl8 und CuSi3 verwendet. Das Lot als Füllmenge und Modelliermasse ist leichter bearbeitbar als eine Schweißnahtverbindung. Ebenso steigt die Reparaturfähigkeit einer Lötverbindung durch einfaches Herauslöten der Bauteile.

Stand der Technik ist das Löten bei den Übergängen vom Dach zu den Kotflügeln, im Bereich A- und C-Säule, an den Schwellern der hinteren Türen und im Heckbereich (siehe Abbildung 13) /81/.



Abbildung 13: Anwendung der Löttechnik im Automobilbau /81/

Durch die hohen Qualitätsanforderungen der Automobilindustrie ergeben sich für den Einsatz der Löttechnik derzeit noch Probleme. Das Handlöten bedingt durch die schwankende Lötqualität und die hohe Wärmeeinbringung eine geringe Prozesssicherheit und findet demnach kaum Anwendung im Karosseriebau. Die thermischen Schädigungen machen eine Nachbearbeitung der Fügestellen notwendig. Diese Nachbearbeitung verursacht zusätzlichen Zeit- und somit Kostenaufwand. Des Weiteren findet sie durch giftige Dämpfe und Hitze unter schlechten Arbeitsbedingungen statt, dies gilt besonders wenn mit Flussmittel gearbeitet wurde. Das Laserstrahllöten von Stahlwerkstoffen mit Kupfersiliziumloten ist die am weitesten verbreitete Anwendung.

Insgesamt hat das Löten wegen seiner oben genannten Vorteile ein großes Potential im Karosseriebau. Die Nachteile müssen durch Entwicklung entsprechender Technologien abgebaut werden. Hierbei wird besonders in der Lasertechnologie ein großes Potenzial gesehen.

2.5.2 Aluminiumwerkstoffe

Das Interesse für Aluminium als Konstruktionswerkstoff ist in den letzten Jahren stetig gestiegen, was auch die Zahlen der Zuwächse auf Fachmessen wieder spiegeln /82/. Aluminium findet in verschiedenen Bereichen aufgrund seiner vorteilhaften Eigenschaften seinen Einsatz /78/. Es ist heute neben Stahl der zweitwichtigste Werkstoff in der industriellen Anwendung geworden. Die Dichte von Aluminium beträgt mit $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ nur ungefähr ein Drittel der Dichte von Stahl und eignet sich somit optimal für den Leichtbau. Durch die geringe Dichte ist es möglich Bauteile hinsichtlich ihrer Steifigkeiten zu optimieren und dabei mit dem gleichen

Gewicht wie bei einer Stahlkonstruktion auszukommen. Die unterschiedlichen Legierungssysteme stellen Aluminiumgrundwerkstoffe mit Festigkeiten von $R_m = 60$ bis 530 MPa bereit, wodurch für nahezu jeden Anwendungsfall die passende Legierung gefunden werden kann (siehe Abbildung 14).

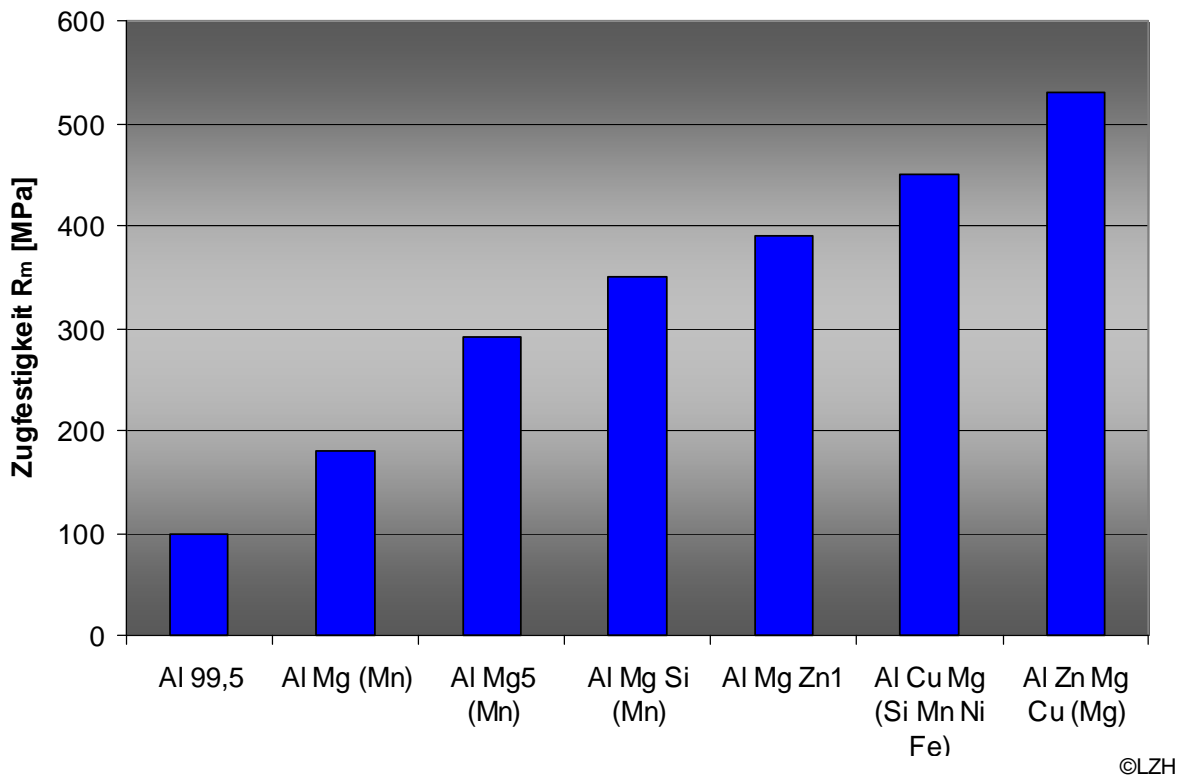


Abbildung 14: Übersicht der erzielbaren Zugfestigkeiten unterschiedlicher Aluminiumlegierungssysteme /94/

Die gute chemische Beständigkeit ist für die spätere Verwendung in der Verkehrsmittelindustrie ein Vorteil, wirkt sich jedoch beim Löten als nachteilig aus.

Eine metallische Aluminiumoberfläche überzieht sich an Luft durch Reaktion mit Sauerstoff bzw. Wasserdampf mit einer dünnen, aber dichten, natürlichen Schicht aus Aluminiumoxid, die sie gegen weitere Angriffe schützt /103/. Die Schutzschicht besteht im Wesentlichen aus amorphem Al_2O_3 und setzt sich aus mehreren Schichten zusammen. Am Rande des Grundwerkstoffs bildet sich eine heterogene Gefügeschicht aus, die durch unterschiedliche Sauerstoff- und Fremdatomgehalte geprägt ist. Darüber ist eine dünne Grundsicht, die sog. Sperrschicht, die den Abschluss gegenüber der Atmosphäre bildet. Auf dieser Schicht bildet sich eine inhomogene Schicht aus Mischoxiden, die sog. Deckschicht.

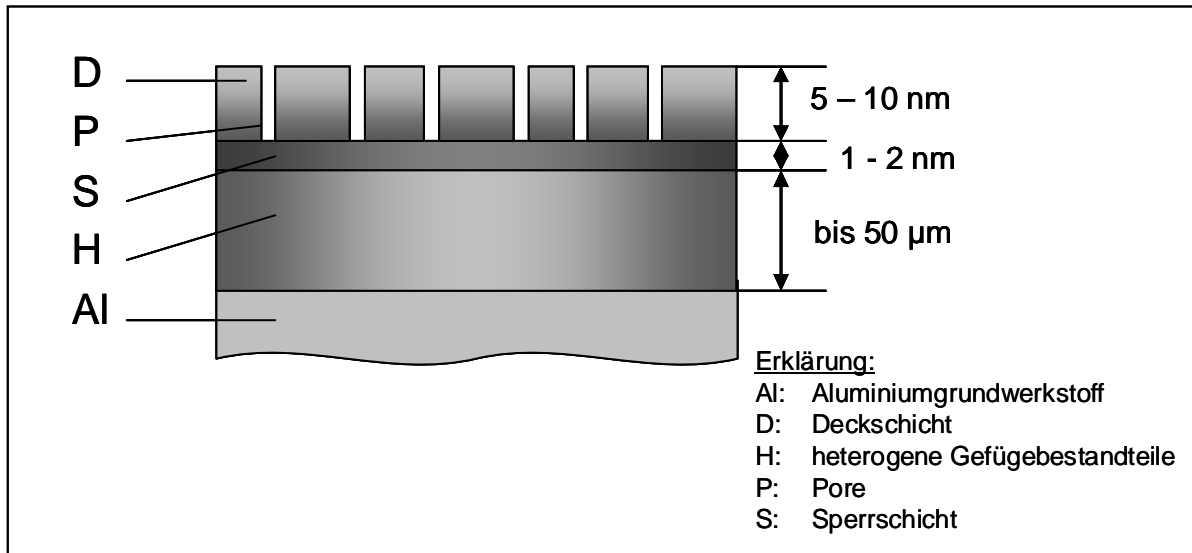


Abbildung 15: Aufbau der Oxidschicht auf dem Aluminiumgrundwerkstoff (schematisch)

Die Sperrschicht (1 bis 2 nm) verfügt über eine geringe Leitfähigkeit für Elektronen und Ionen und wirkt somit wie ein Isolator bei chemischen Grenzflächenreaktionen. Hierdurch ist ein wirksamer Schutz gegen Korrosion gegeben. Bei einer Entfernung, egal ob chemisch oder mechanisch, tritt spontane Neubildung ein. In der Deckschicht, die i.d.R. 5 bis 10 nm beträgt, lagern Metalloxide, die gut an der Grundsicht haften und damit einen wirksamen Schutz des darunter liegenden Metalls gegen Korrosion bewirken /105/.

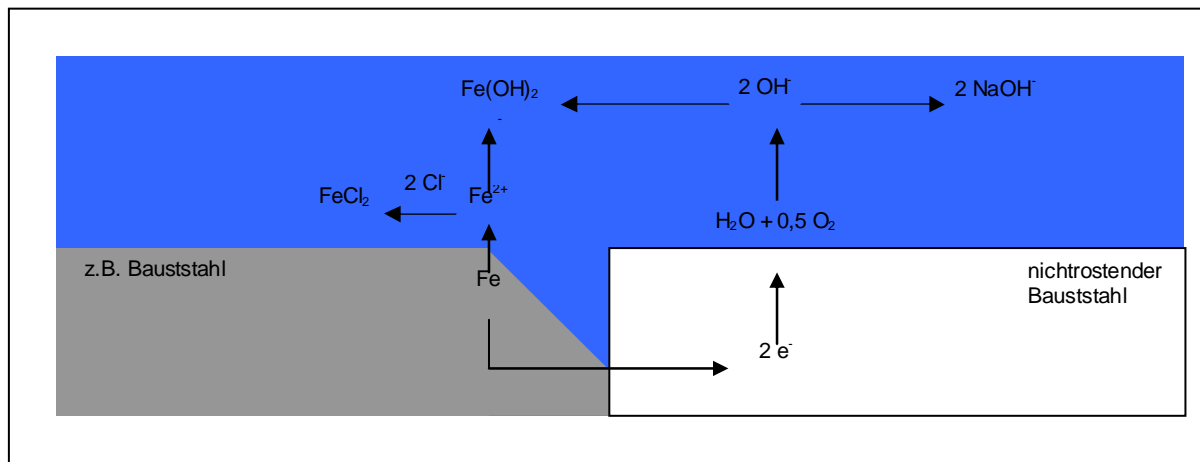
2.6 Korrosion

Als Korrosion werden Vorgänge bezeichnet, bei denen ein Werkstoff durch chemische Reaktion mit Bestandteilen seiner Umgebung geschädigt wird /36/. Dabei werden Bindungen, die den Werkstoffzusammenhalt bewirken, zugunsten stabilerer Bindungszustände aufgegeben. Metalle sind wegen der relativ lockeren Bindung ihrer Bindungselektronen in dieser Hinsicht besonders gefährdet.

Die unterschiedlichen elektrochemischen Potenziale von Eisen und Aluminium führen naturgemäß zu einem kritischen Korrosionsverhalten /26/. Bei einer Verbindung aus zwei artfremden Metallen tritt Kontaktkorrosion auf.

Zwei Metalle, die leitend miteinander verbunden sind oder Bereiche desselben Werkstoffs mit unterschiedlichem Potential, bilden bei Benetzung mit einem Elektrolyten ein Korrosionselement (siehe Abbildung 16). Die unedlere Elektrode wird

zur Anode, die edlere zur Kathode. Durch den Ladungsaustausch über die elektrisch leitende Verbindung und den Elektrolyten kann sich an beiden Elektroden keine Gleichgewichtszustände einstellen. Die stärkere Anodenreaktion führt zu deren allmählichen Auflösung: die Anode wird korrodiert /108/.



©LZH

Abbildung 16: Korrosionselement mit Elektrolyt am Beispiel Baustahl und nichtrostender Stahl

Das Ausmaß einer durch Kontakt verschiedener Metalle verursachten Korrosion hängt von den nachfolgend genannten Einflußfaktoren ab:

- von der Differenz der Lösungspotentiale beider Metalle,
- vom Polarisationswiderstand beider Metalle,
- von der elektrischen Leitfähigkeit des Elektrolyten und
- vom Verhältnis von anodischer zu kathodischer Fläche.

Die Potentialdifferenz kann zu einer ersten Abschätzung der Korrosionsneigung herangezogen werden, wobei gilt: Je größer der Abstand in der Spannungsreihe, desto geringer ist die Eignung für diese Kombination anzusehen. Sie beträgt für Aluminium und Eisen $\Delta U_{\text{pot}} = 1,22\text{V}$, was einem hohen Wert und damit einer hohen Korrosionsneigung entspricht. Durch den Polarisationswiderstand, ein chemischer Kennwert, der sich aus dem Anstieg der Stromdicht-Potential-Kurve ergibt, wird die Reduktion des Korrosionsstroms durch die Bildung einer Deckschicht auf Anode und Kathode beschrieben.

Typische Maßnahmen gegen Kontaktkorrosion sind:

- nach der Spannungsreihe geeigneterer, d.h. enger beieinander stehende Kontaktpartner wählen,
- vermeiden eines ungünstigen Flächenverhältnisses,
- isolieren der Kontaktpartner,
- anodische Teile leicht ersetzbar oder im Querschnitt dicker ausführen,
- dem Elektrolyten Inhibitoren zufügen und
- beide Metalle durch ein drittes Metall kathodisch schützen. /109/

In /91/ berichtet der Autor von der Notwendigkeit Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium gegen Witterungseinflüsse zu schützen, da es ohne diesen Schutz zu massiven Korrosionserscheinungen führt. In /110/ wird von der sicheren Beherrschung der Kontaktkorrosion beim Einsatz von Aluminium in Mischbauweisen berichtet. Als Konversionsverfahren hat das gebräuchliche Triphosphatieren die besten Ergebnisse für den Einsatz zur Vorbehandlung von Mischbaukarosserien aufgezeigt. Um eine ausreichende Phosphatschichtdicke auf den Aluminiumoberflächen zu erreichen, wird ca. 400 bis 600ppm Fluorid benötigt. Sie erlaubt jedoch nur einen im Tauchbad durchlaufenden Aluminiumanteil von <20%, da sich die Sedimentbildung bei der nachfolgenden KTL-Beschichtung als nachteilig erweist. Sollen Aluminiumanteile von >20% beschichtet werden, muss auf Spritzphosphatieren umgestellt werden. Generell hat die bestehende Korrosionsproblematik bei Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium zur Entwicklung von kompatiblen Oberflächenbeschichtungsverfahren sowie geeigneter Verklebungen geführt, so dass zumindest zur Vermeidung von elektrochemischer Korrosion zwischen Stählen, hochfesten Stählen, Aluminium- und Magnesiumlegierungen eine Lösung zur Verfügung steht /111/. Einen ersten Ausblick auf die Auswirkung der Korrosion auf die Festigkeiten und die Dehnung liefert /121/, in der Untersuchungen bzgl. der Alterungserscheinung durch Korrosion durchgeführt wurden. Es ließ sich nachweisen, dass die Festigkeiten auf einem gleichen Niveau bleiben und lediglich die Dehnungen abnehmen.

3 Ausgangssituation und Zielsetzung

3.1 Ausgangssituation

Der Stand der Wissenschaft und Technik zeigt ein deutliches Einsatzpotential für die Verwendung von Stahl-Aluminium-Mischbauweisen auf. Es existieren bereits Erfahrungen im Verbinden dieser Werkstoffe, sowohl mechanisch, über Klebeverbindungen als auch thermisch. Es liegen Erkenntnisse für das Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen vor, wobei es sich im Bereich der Serienanwendungen um mechanisches Fügen oder um Kleben handelt. Des Weiteren wurden verschiedene thermische Verfahren entwickelt und wiesen in Laboruntersuchungen ein Potential für deren Einsatz in der Herstellung von hybriden Strukturen auf.

Die bisherigen Verwendungen in der Industrie sind in der Regel auf mechanische Verbindungen wie Nieten, Schrauben oder Clinchen beschränkt. Hierbei handelt es sich um historisch bekannte Fügetechniken, die sich einfach auf eine geänderte Materialkombination anpassen lassen. Es bedarf hierbei lediglich bspw. einer Anpassung der Nietwerkstoffe oder des Kraftverlaufs (Clinchen). Auch kann der Kontakt der Werkstoffe durch Verwendung von Isolationsschichten z.B. Klebstoffe verhindert und der Korrosionsneigung entgegengewirkt werden. Die Klebtechnik eignet sich besonders für die Verbindung von artfremden Werkstoffen, wird aber durch die Stoßgeometrien und die bevorzugte Kraftaufnahmerichtung in ihrer Anwendung eingeschränkt.

Die Anwendung von umformbaren Halbzeugen ist bislang für Mischverbindungen nicht bekannt. Da sich im Bereich des Tailored Blanking aber ein hohes Einsatz- und damit Einsparpotential aufgezeigt hat, sollte dieses Potential auch bei den Mischverbindungen gehoben werden können. Hierfür bedarf es Untersuchungen zur Herstellung von diesen hybriden Halbzeugen und deren Charakterisierung hinsichtlich ihrer resultierenden Umformeigenschaften.

Im Zuge verschiedener Projekte wurde die Herstellbarkeit dieser hybriden Platinen nachgewiesen, wobei jedoch die anschließende Umformbarkeit nicht getestet wurde.

3.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es die Herstellbarkeit von hybriden Platinen aus Stahl und Aluminiumwerkstoffen durch das Laserstrahllöten zu erweitern, indem die Prozesstechnik an die Fügeaufgabe angepasst wird. Die Platinen sollen einen möglichst gleichmäßigen Übergang im Fügebereich aufweisen, weshalb als Fügegeometrie der Stumpfstoß gewählt wurde. Durch eine optimierte Prozessführung soll eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Prozessstabilität erzielt werden. Durch den Ansatz des Strahlpendelns soll eine angepasste Temperaturführung und dadurch eine bessere Benetzung des Lotes auf den Grundwerkstoffen erzielt werden. Es soll eine verbesserte Erwärmung gerade bei hohen Prozessgeschwindigkeiten angestrebt und dadurch eine Effizienzsteigerung erreicht werden.

Durch eine Charakterisierung der Nahteigenschaften aus metallurgischer Sicht wird ein Verständnis für die optimalen Fügeparameter aufgebaut. Durch quasistatische Zugversuche und Tiefziehproben in Anlehnung an den Näpfchenversuch nach Swift werden die mechanischen Kennwerte der Löt Nähte ermittelt, die das Einsatzpotential der hybriden Verbindungen widerspiegeln sollen.

Abschließend wird der im Stand der Wissenschaft aufgezeigten Korrosionsneigung Rechnung getragen, indem einige umgeformte und beschichtete Proben einem 10-wöchigen Korrosionstest unterzogen werden. Hierbei soll aufgezeigt werden, wie das Korrosionspotential dieser Fügeverbindung einzuschätzen ist.

4 Vorgehensweise zur Zielerreichung

Ausgehend von der beschriebenen Ausgangssituation und Zielsetzung wurde ein Lösungskonzept zur Zielerreichung erarbeitet, das sich in zwei Phasen gliedert.

In der ersten Phase werden Laserstrahl­lötungen von Mischverbindungen durchgeführt, die eine Machbarkeit des Prozesses aufzeigen sollen. Durch thermographische Aufzeichnungen des Prozesses wird die Möglichkeit der Videoanalyse genutzt, um Prozessstörungen oder Instabilitäten gezielt nachzuweisen. Der Einfluss der Strahlformung kann so ebenfalls direkt an der Versuchsanlage sichtbar gemacht werden. Eine anschließende Analyse widmet sich dem quasistatischen Zugversuch und Tiefziehversuchen in Anlehnung an den Nöpfchenversuch nach Swift. Eine weitere Analyse wird durch metallographische Schliffbilderstellung vorgenommen. Die Ergebnisse der Analysen sind einerseits mechanische Kennwerte, wie Zugfestigkeiten und Tiefziehverhältnisse, andererseits Gefügeauswertungen, wobei im Wesentlichen auf die Ausprägung des Lotgefüges und die entstandenen Phasensäume eingegangen wird. Durch eine Korrelation der erzielten Kennwerte wird eine Optimierung des Laserstrahl­lötprozesses vorgenommen. Hierdurch kann eine verbesserte Prozessführung erreicht werden. Die Anpassung der Löttemperaturen und ihre Auswirkung auf die charakteristischen Kenngrößen, die Ergebnis der Analysen sind, kann durch den gewählten Lösungsansatz tiefer durchdrungen und ein umfassendes Prozessverständnis erarbeitet werden.

Nach dem Durchlaufen von Iterationsschritten in der ersten Phase wird ein Versuchsdemonstrator hergestellt, der die industrielle Umsetzbarkeit des Verfahrens nachweisen soll. An Proben, die für den Demonstrator verwendet werden, wird in der zweiten Phase des Lösungsansatzes dem Korrosionspotential Rechnung getragen. Hierfür wird ein Korrosionstest durchgeführt, wie er in der Automobilindustrie Stand der Technik ist. Im Anschluss an die Korrosionsuntersuchung wird eine Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien bewertet und in Zusammenhang mit den Ergebnissen der metallurgischen Untersuchungen betrachtet, um eine Erkenntnis für ggf. weitere Optimierungen des Prozesses hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien zu erreichen.

Der aufgezeigte Lösungsansatz ist in Abbildung 17 dargestellt und verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den einzelnen Schritten und unterschiedlichen Stufen in den einzelnen Phasen.

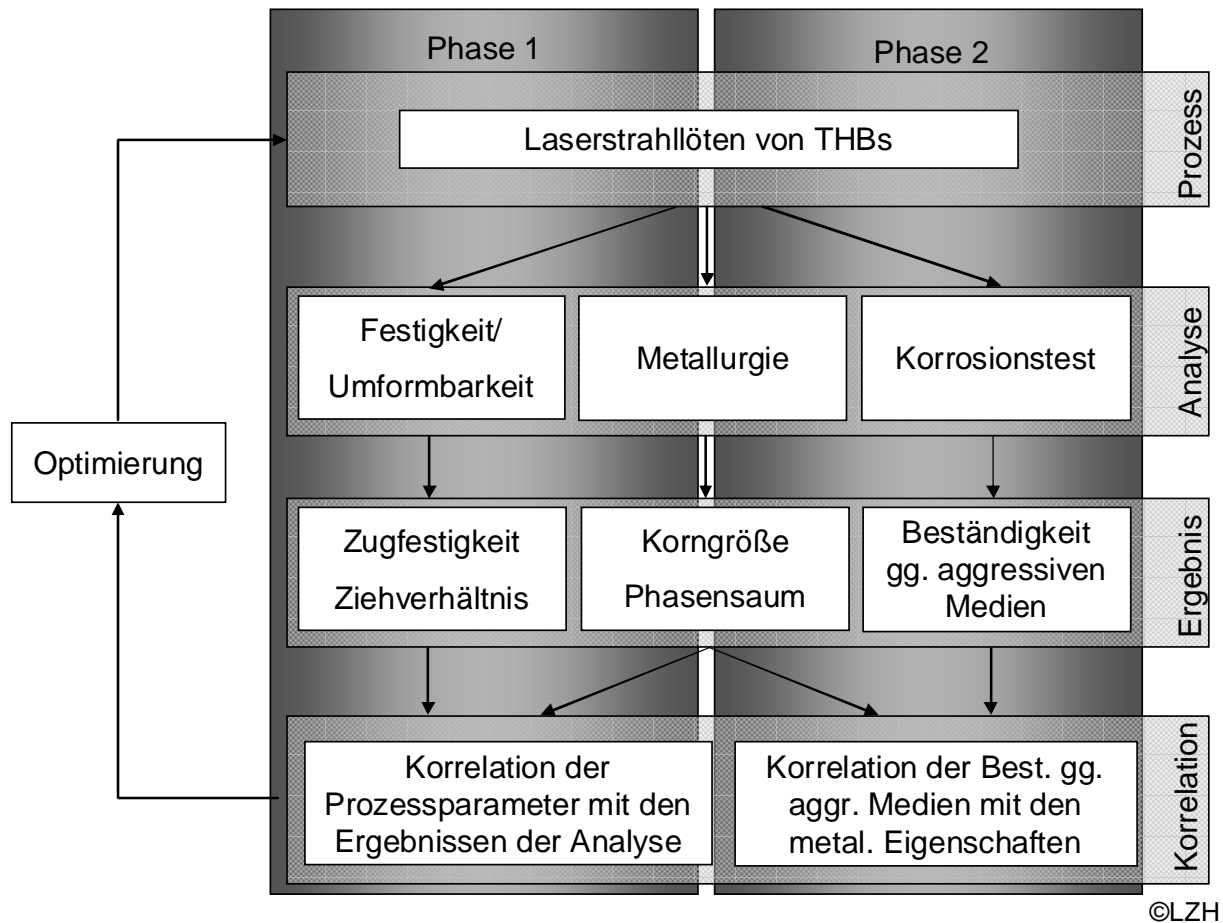


Abbildung 17: Lösungsansatz zum Laserstrahllöten und Charakterisieren von Fe-Al-Mischverbindungen

Durch das systematische Vorgehen anhand des Lösungsansatzes kann die Anzahl der notwendigen Versuchsdurchläufe deutlich reduziert und dadurch die Zielerreichungsgeschwindigkeit gesteigert werden. Zusätzlich kann durch den verwendeten Lösungsansatz eine schnelle Rückkopplung dominanter Prozessparameter und deren Einfluss auf mechanische oder metallurgische Kennwerte erfolgen, was zusätzlich einem vertieften Prozessverständnis und einer optimalen Zielerreichung dient.

5 Versuchswerkstoffe

Die Auswahl der verwendeten Versuchswerkstoffe erfolgte hinsichtlich der Einsetzbarkeit im Automobilbau mit Hinblick auf die Verfügbarkeit. Ein weiterer Aspekt waren Vorüberlegungen zu legierungstechnischen Vorteilen bzw. möglichen Schwierigkeiten bei der Benetzung und beim Tiefziehen.

5.1 Stahlwerkstoffe

Für die Auswahl der Stahlwerkstoffe wurden ein Tiefziehstahl und ein hochfester Stahl bevorzugt. Beide Stähle zeichnen sich durch eine gute Umformbarkeit aus und finden in der Praxis ihre Anwendung.

Beim DC04 handelt es sich um einen Tiefziehstahl, wie er für verschiedenste Applikationen Anwendung findet. Der höherfeste HCT600XD zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit bei guter Umformbarkeit aus. Dieser Dualphasenstahl wird kaltgewalzt. Die verwendete Blechdicke für alle Versuche ist $t = 1$ mm. Beide verwendeten Stahlwerkstoffe sind mit einer Zinkschicht versehen, welche galvanisch aufgetragen wurde.

5.2 Aluminiumwerkstoffe

Aus der oben beschriebenen Bandbreite der Aluminiumlegierungen wurden zwei Knetlegierungen ausgewählt (siehe Tabelle 2), die sich im Legierungsaufbau deutlich unterscheiden. Es wurde je ein Vertreter der Gruppe der nicht aushärtbaren 5000er und der aushärtbaren 6000er Legierungen ausgewählt. Diese Legierungen finden vermehrt Einsatz im Automobilbau und zeichnen sich durch ihre gute Umformbarkeit aus. Die eingesetzte Blechdicke ist für alle Versuche $t = 1,15$ mm.

Die nicht aushärtbare Legierung AA5182 (AlMg4,5Mn) zeichnet sich durch einen hohen Magnesiumanteil aus, welcher sich in der Steigerung der Festigkeit niederschlägt. Die durch den hohen Anteil an Magnesium hervorgerufene Neigung zur interkristallinen Korrosion wird durch das Zulegieren von Mangan reduziert. Die Oberflächenbeschaffenheit ist durch den Magnesiumanteil von 4,5% unterschiedlich zu einer Aluminiumoxidhaut ohne Magnesium. Es kommt zu einer Bildung von Magnesiumoxidflächen, welche durch das Lot benetzt werden müssen. Bei der Auslegung des Flussmittels ist somit darauf zu achten, dass dieses sowohl auf Aluminium- als auch auf Magnesiumoxid anwendbar ist. Dieses ist schwer

umzusetzen, wenn ein nicht korrosives Flussmittel verwendet werden soll. Die ausreichende Benetzbarkeit muss somit metallurgisch überprüft und nachgewiesen werden.

Als zweite Legierung wird aushärtbare AA6016 (AlMg0,4Si1,2) im Zustand T4 verwendet. Die Aushärtung erfolgt über die Bildung von Mg_2Si bei der Wärmebehandlung. Für die Festigkeitssteigerung dieser Legierung ist ein Überschuss an Silizium im Vergleich zum Magnesium verantwortlich. Diese Legierung weist somit einen geringeren Magnesiumanteil auf als die oben beschriebene AA5182 und sollte somit benetzungstechnisch vorteilhafter sein.

Tabelle 2: Legierungszusammensetzung der Al-Versuchswerkstoffe nach /106/

Legierung	Massenanteil der Legierungselemente in m%								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Rest
AA5182	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4,0-5,0	0,1	0,25	0,1	0,2
AA6016	1,0-1,5	0,5	0,2	0,2	0,25-0,6	0,1	0,2	0,15	0,2

5.3 Lotwerkstoffe

Die Lotwerkstoffe, die für die Verbindung von Stahl und Aluminium in dieser Arbeit zum Einsatz kommen, teilen sich in zwei Hauptgruppen auf. In der einen Gruppe sind die Aluminiumbasislegierungen eingeordnet. Die Zink-Basislote werden der zweiten Gruppe zugeordnet. Durch Zink-Silberbasislote wird die Auswahl der Lotwerkstoffe vervollständigt.

Aluminiumbasislote

Aus der Gruppe der Aluminiumbasislote existiert ein bereits am Markt bewährtes Standardlot. Das eutektische AlSi12 verfügt über eine Arbeitstemperatur von ca. 610°C und hat aufgrund seiner Legierungszusammensetzung einen eng eingegrenzten Schmelzbereich. Die Senkung der Arbeitstemperatur und somit der Schmelztemperatur des Lotes war und ist speziell für das Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen Gegenstand umfangreicher Untersuchungen /114/, /115/, /116/.

Ausgehend von den oben genannten Untersuchungen wurden zwei Legierungen als Probemuster untersucht, die ein Legierungssystem AlSi10 als Grundlegierungssystem aufweisen. Diese Lote sind durch zulegieren von zwei bzw. drei Legierungselementen in ihrer Arbeitstemperatur gesenkt worden. Durch die

komplexen Legierungssysteme wird die Ziehfähigkeit zu Drähten für die einfache Handhabung jedoch eingeschränkt. Aus diesem Grund kamen abweichend von allen anderen Loten Lotdrahtdurchmesser von 1,6 mm statt 1,2 mm für die verwendeten Aluminiumlote zum Einsatz.

Zinkaluminiumlote

Zinkaluminiumlotsystem zeichnen sich gegenüber den Aluminiumbasislote durch eine deutlich reduzierte Arbeitstemperatur aus. Hierdurch wird die Möglichkeit der Einstellung eines reinen Laserlötprozesses verbessert, da es zu einer Verringerung der Anschmelzung des Aluminiumgrundwerkstoffes kommt. Es gibt technische Lotlegierungen von 2% bis 20% Aluminiumanteil, die sich durch Arbeitstemperaturen von 381°C bis zu 420°C auszeichnen. Ein weiterer Vorteil dieser Legierung ist das Nichtvorhandensein von intermetallischen Phasen bei Raumtemperatur, was zu ausreichend zähen Werkstoffen führt (siehe Abbildung 18). /113/

Zinklegierungen wurden mit unterschiedlichen Aluminiumgehalten untersucht, jedoch ohne ein weiteres Zulegieren von anderen Elementen zu berücksichtigen, da die Arbeitstemperatur der Lote deutlich unterhalb der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe liegt.

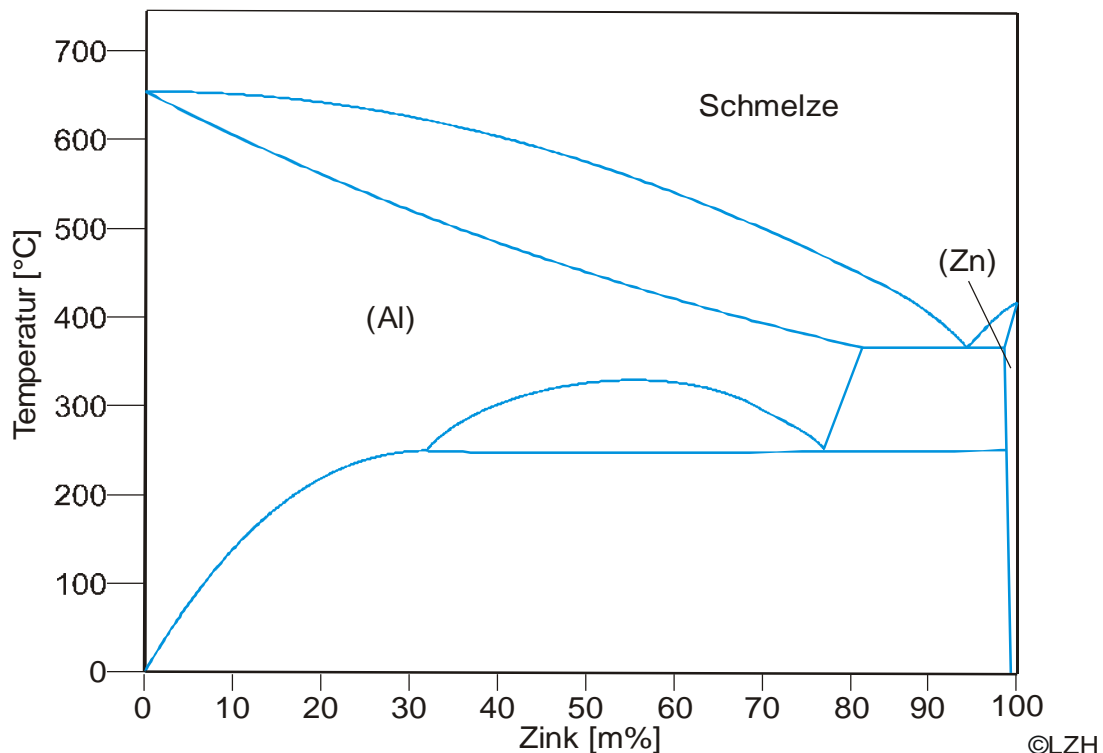


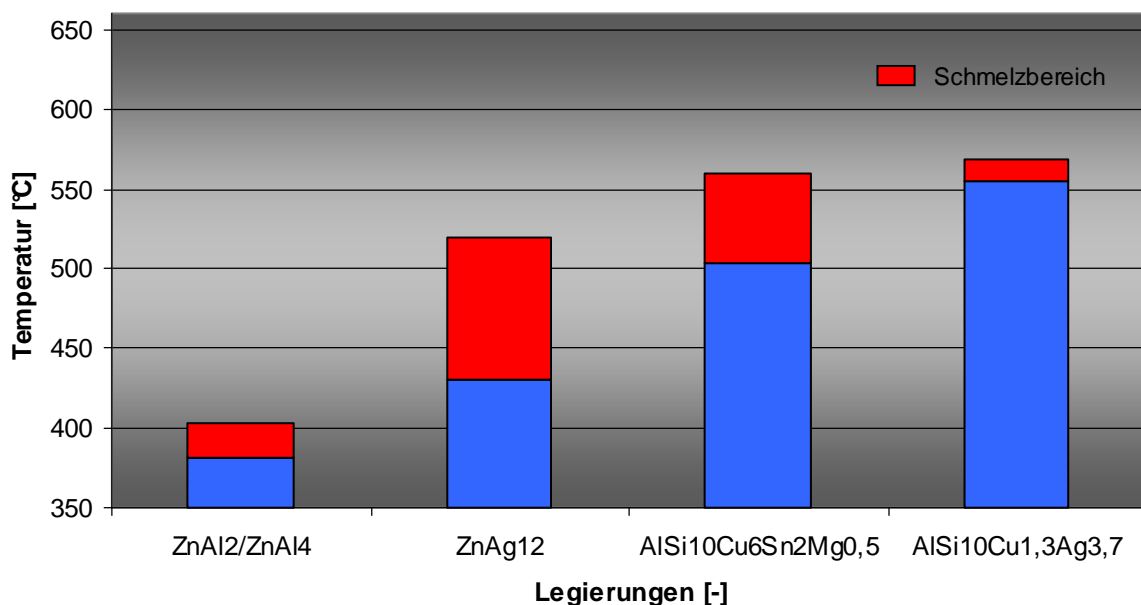
Abbildung 18: Phasendiagramm Aluminium - Zink

Zinksilberlote

Als Referenzversuche um die Temperaturdifferenz zwischen den Zinkaluminiumloten und den Aluminiumloten zu schließen, wird in Stichversuchen ein Lot des Systems Zinksilber getestet, welches sich durch eine Arbeitstemperatur ca. 500°C auszeichnet.

Diese Lotsysteme sind bezogen auf die Herstellkosten wegen des Elementes Silber teurer, könnten aber durch die erhöhte Verarbeitungstemperatur einen Festigkeitsgewinn der Fügeverbindung ermöglichen. Es ist zu prüfen, wie exakt sich die Arbeitstemperatur für das Löten einstellen lässt.

Eine Übersicht der Schmelzbereiche der einzelnen Lotlegierungen gibt Abbildung 19, wobei der Abstand zur Schmelztemperatur des Aluminiumwerkstoffes (660°C – oberes Ende des Diagramms) von entscheidender Rolle ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Zinklotsysteme einen deutlicheren Abstand aufweisen als die Aluminiumsiliziumlote. Jedoch ist es durch die Anpassung der Legierungssysteme gelungen eine Absenkung der Arbeitsbereiche im Vergleich zu AlSi12 mit 600-620°C zu erreichen.



©LZH

Abbildung 19: Übersicht der Schmelzbereiche der verwendeten Lotlegierungen

Höher-schmelzende Lote, wie z. B. AlSi12 und Ag55Sn, finden in dieser Arbeit keine Verwendung. Die Schmelztemperaturen der Aluminiumlegierungen liegen mit

$T_s = 660^\circ\text{C}$ zu nah an den Arbeitstemperaturen der höherschmelzenden Lotlegierungen, so dass ein reiner Lötprozess nicht erreicht werden kann.

Die verwendeten Lotdrahtdurchmesser sind mit einer Ausnahme 1,2 mm. Bei den Aluminiumloten wurden auf Grund der Herstellbarkeit nur Lotdrahtdurchmesser von 1,6 mm verwendet.

Flussmittel

Für alle durchgeführten Untersuchungen wurden CsAlF-Flussmittel der Firma FLUX GmbH verwendet. Dieses Flussmittel weist eine Aktivierungstemperatur von 420-480°C auf. Es lässt sich sowohl als Aufsprühflussmittel, wie auch als Flussmittel für Fülldrahtlote verwenden.

6 Versuchsaufbau und –durchführung

Im Folgenden werden der Versuchsaufbau und der Laborarbeitskopf genauer beschrieben.

6.1 Laserbearbeitungskopf

Mit Hilfe einer Laserbearbeitungsoptik soll eine eindimensionale Aufweitung des Brennflecks erreicht werden. Hierdurch ist eine Verbesserung der thermischen Beeinflussung der Grundwerkstoffe anzustreben. In Vorschubrichtung wird die thermische Einwirkung der Laserstrahlung erhöht, wobei die thermische Schädigung senkrecht zur Vorschubrichtung reduziert, mindestens jedoch nicht erhöht wird.

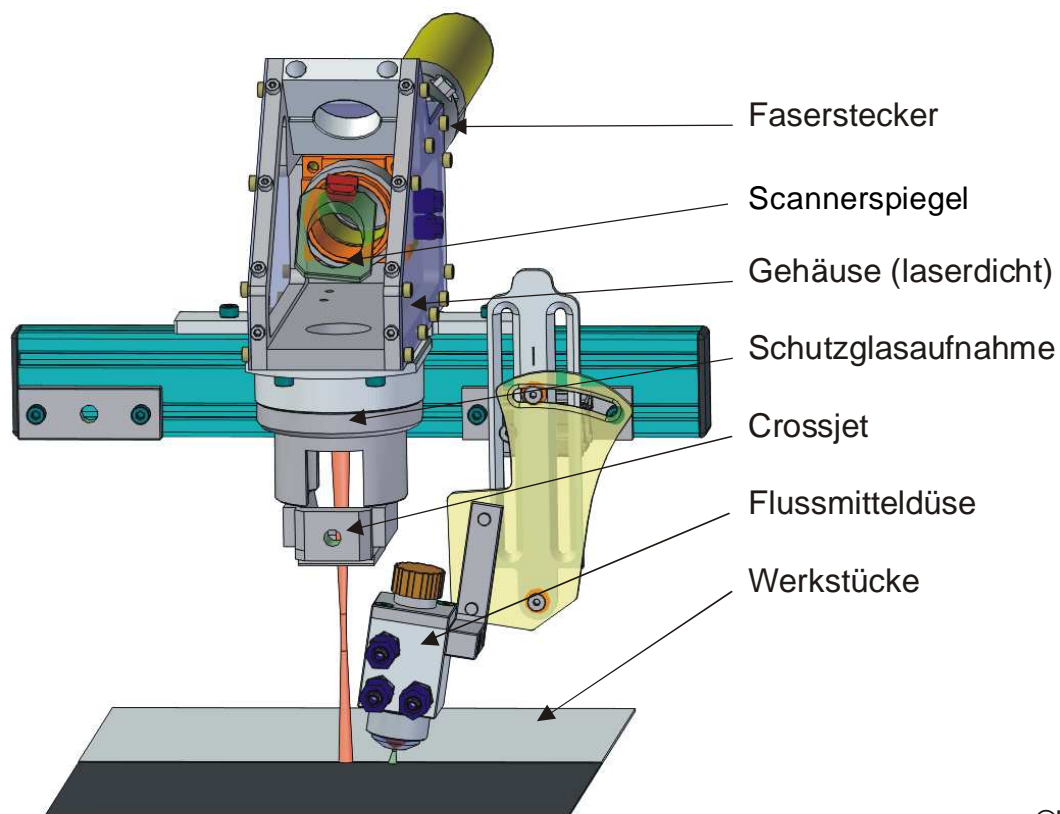
Für die Lötversuche wurde ein Laserbearbeitungskopf verwendet, der eine Bewegung des Laserstrahls in Vorschubrichtung ermöglicht. Hierfür ist ein Galvoscaner in den Bearbeitungskopf integriert, der ein Pendeln des Laserstrahls in einer Richtung ermöglicht. Der Bearbeitungskopf ist in einem Gehäuse verbaut, das eine laserdichte Kapselung der Strahlformungskomponenten ermöglicht und besteht aus marktüblichen Standardkomponenten.

Der Laserstrahl wird mit einer Kollimierung von 100 mm parallelisiert und mit einer Fokussierung von 200 mm gebündelt. Die Fokussierung und die Kollimierung sind in den Kühlkreislauf des Lasers eingebunden, um diese Komponenten für Laserleistungen bis 4 kW einsatzfähig zu gestalten. Es ergibt sich ein Abbildungsverhältnis von 1:2, was eine Verdoppelung des Faserquerschnitts als Fokusedurchmesser erlaubt. Für das Laserstrahllöten bedarf es keines möglichst geringen Fokusedurchmessers, sondern einer flächigeren Einkopplung des Laserstrahls, weswegen in vielen Fällen defokussiert gelötet wird. Eine Defokussierung führt jedoch zur Vergrößerung des Brennfleckdurchmessers, d.h. einer Aufweitung in alle Richtungen. Hierdurch wird eine thermische Beeinflussung des Grundwerkstoffes außerhalb der Fügezone vollzogen. Die Aufweitung ist somit an die jeweilige Fügegeometrie anzupassen und durch die maximal zulässige Wärmeeinflusszone begrenzt.

Mit Hilfe des Einachsscanners kann der Brennfleck in der Vorschubrichtung zusätzlich aufgeweitet werden. Dieses ermöglicht bei einer Mindestpendelfrequenz von 100 Hz eine quasistatische Vergrößerung in einer Richtung. Um eine möglichst homogene Brennfleckausleuchtung zu erzielen, bedarf es einer hohen

Ansteuerfrequenz des Scanners. Je höher die Ansteuerfrequenz wird, desto geringer werden die möglichen Auslenkungen des Fokuspunktes. Hierdurch ergibt sich bei einer gewünschten Auslenkung von 10 mm bei einer Fokusbreite von 4 mm eine maximale Pendelfrequenz von 200 Hz.

Der im Rahmen der Arbeit genutzte Bearbeitungskopf ist modular aufgebaut und mit einer Einheit zur Applizierung von Flussmittel in sprühfähiger Form versehen. Die Sprühvorrichtung kann über ein Lehrenblech in der Neigung variiert und hinsichtlich der Höhenlage verstellt werden. Der Abstand zwischen der Flussmittelapplikation und der Wirkzone des Lasers kann über Schienen variiert werden. Angesteuert wird der Scanner über einen Funktionsgenerator und eine zum Scanner gehörenden Verstärkerplatine. Der Crossjet dient dem Schutz der Laseroptik vor Prozessemissionen. In Abbildung 20 ist eine konstruktive Darstellung des Bearbeitungskopfes zu sehen.



©LZH

Abbildung 20: Konstruktionsdarstellung des Bearbeitungskopfes

Bei der Erprobung des Bearbeitungskopfes wurde festgestellt, dass sich die optimale Einstellung für die Flussmitteldüse bei 90° zur Werkstückoberfläche befindet. Die

verwendete Lehre ist somit nicht mehr notwendig. Es erweist sich jedoch von Vorteil, wenn die laterale Lage der Düsenmitte zur Position des Fokus exakt nachjustiert werden kann, so dass der Flussmittelstrahl immer auf die Spaltmitte gerichtet ist. Dies wird bei einer Variation der lateralen Brennflecklage notwendig, um die homogene Erwärmung der unterschiedlichen Grundmaterialien zu ermöglichen. Hierfür wurde eine X-Y-Verstelleinheit an der Flussmitteldüse angebracht, die eine Justage im Bereich von je 10 mm mit einer Auflösung von 0,1 mm erlaubt. Der verwendete, modifizierte Arbeitskopf ist in Abbildung 21 zu sehen, wobei die Draht- und die Flussmittelposition im Detail dargestellt ist.

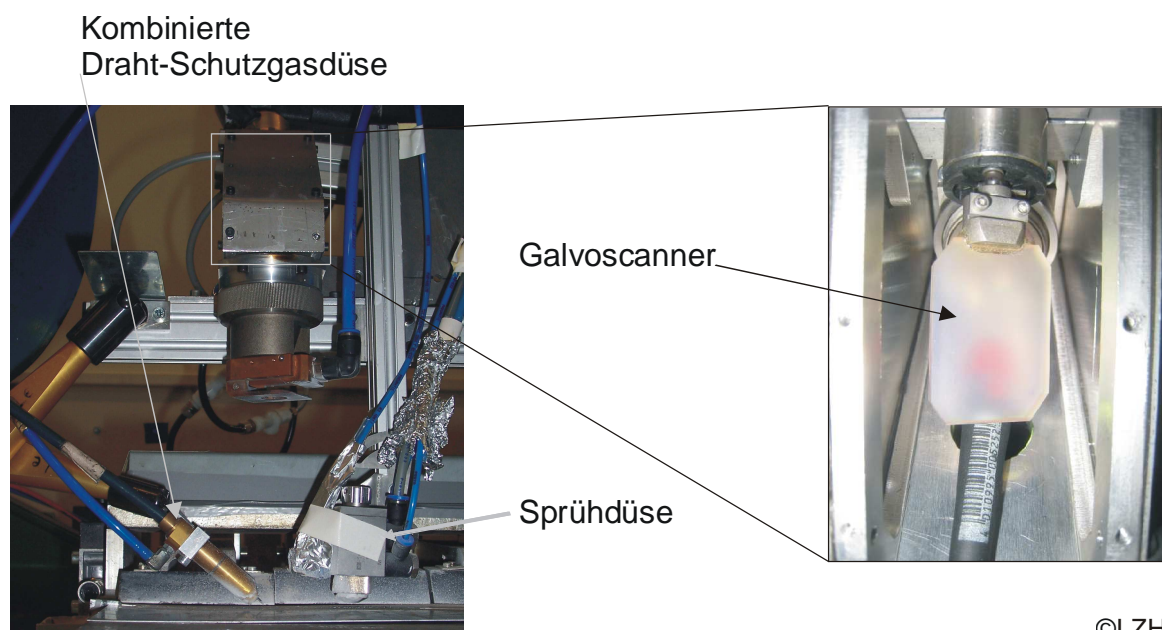
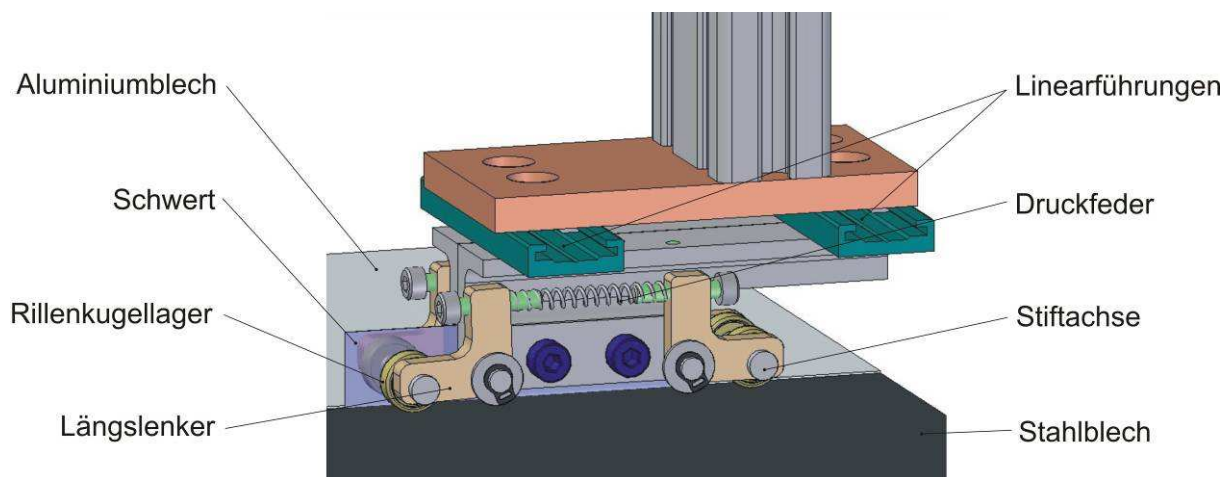


Abbildung 21: Scanner (Links: in Bearbeitungsposition; Rechts: geöffnet) im Detail

6.2 Spaltgarantie

Beim Löten werden Spalte zwischen den Fügepartnern benötigt, um ein Fließen des Lotes zu ermöglichen. Hierdurch kommt es zu einer flächigen Anbindung der beiden Fügepartner und somit zu einer ausreichenden Festigkeit. Die Spalte dürfen je nach Anwendungsfall bestimmte Minimal- und Maximalwerte nicht überschreiten. Um diese für das Laserstrahllöten genauer zu verifizieren, wurden Untersuchungen zur benötigten Spaltbreite durchgeführt. Hierfür wurde durch geeignete Lehren das Spaltmaß vor dem Lötprozess eingestellt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen sollte

die Notwendigkeit der Spaltführung und Kontrolle nachgewiesen und eine Spaltgarantie konstruiert werden, um die benötigten Spaltmaße definiert einzustellen. Für die Versuche wurde eine Spaltgarantie mit einem Schlitten mit wechselbarem Einsatz aus Stahl verwendet, der die Einstellung unterschiedlicher Spaltmaße erlaubt. Zwei Linearführungen ermöglichen eine schwimmende Lagerung und damit einhergehend die Bewegung des Führungsblechs orthogonal zur Vorschubrichtung. Über eine Feder vorgespannte Rollen drücken dabei die beiden Fügepartner auf die Spanntechnik, um ein Ausweichen der Bleche noch oben zu verhindern. Diese Rollen dienen ebenfalls zur Verminderung der Reibung zwischen der Spaltgarantie und dem Werkstück. Durch den modularen Aufbau kann ein schnelles Wechseln des Führungsblechs erfolgen.



©LZH

Abbildung 22: Spaltkontrolle mit Führungsschwert

6.3 Versuchsstand

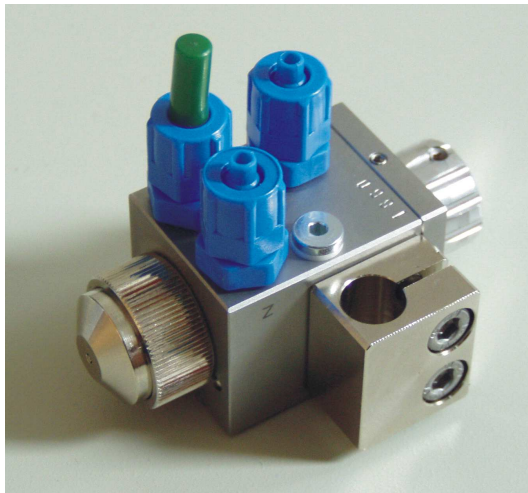
Die Versuche dieser Arbeit sind auf einer 3-Achs-CNC-Verfahreinheit vorgenommen worden. Der Arbeitsbereich beträgt 500 mm in X-, 2000 mm in Y-, und 300 mm in Z-Richtung und ermöglicht eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 15$ m/min. Über digitale Schaltausgänge kann eine Ansteuerung von verschiedenen Zusatzgeräten ermöglicht werden.

Als Laserstrahlquelle kommt ein Nd:YAG-Laser der Firma Trumpf mit der Bezeichnung „HL 4006D“ zum Einsatz. Dieser Laser erzeugt eine maximale Ausgangsleistung von $P_L = 4$ kW im Dauerstrichbetrieb, wobei die Laserstrahlung über eine Glasfaser mit einem Faserquerschnitt von 600 μm zur Bearbeitungsoptik

geführt wird. Nd:YAG-Laser sind aufgrund ihrer Wellenlänge und der daraus resultierenden Unempfindlichkeit gegenüber Störungen durch das laserinduzierte Plasma die am häufigsten eingesetzten Laser für das Laserstrahllöten.

Das verwendete Flussmittel wird in einem luftdicht schließenden Glasgefäß aufbewahrt und mit einem handelsüblichen Magnetrührer ständig in Bewegung gehalten, um ein Absetzen des Flussmittelpulvers in der Trägerflüssigkeit zu verhindern. Eine Schlauchpumpe der Firma Verder fördert ca. 0,06 g/sek Flussmittel mit dem zugehörigen Transportmedium zur Sprühdüse der Firma Schütze Spritztechnik (siehe Abbildung 23), die das Flussmittel zerstäubend aufträgt. Die Sprühdüse wird über Druckluft gesteuert und verfügt über einen getrennten Sprühgaseingang. Ein ständiges Umlaufen des Flussmittels wird durch eine Rückflussleitung gewährleistet und führt zu einer besseren Durchmischung des Flussmittels.

Sprühventil mit
variierender Düsengröße



Schlauchförderpumpe mit
variabler Fördermenge



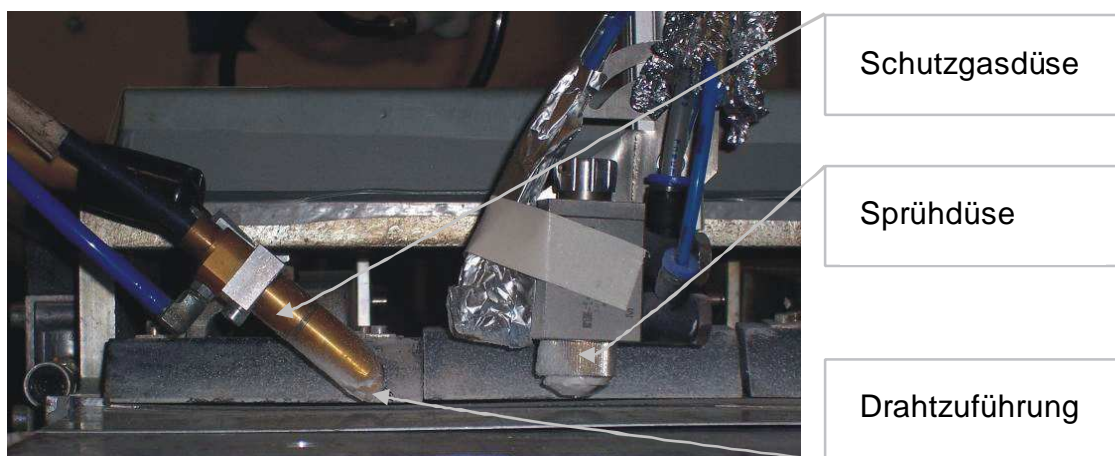
©LZH

Abbildung 23: Sprühventil und Schlauchförderpumpe

Die verwendeten Lotwerkstoffe stehen als Draht zur Verfügung und können mittels eines Drahtförderers der Fügezone zugeführt werden. Der Drahtförderer ist ein Kaltdrahtförderer der Firma Dinse und ermöglicht die Förderung unterschiedlicher Drahtdurchmesser mit verschiedenen stufenlos einstellbaren Fördergeschwindigkeiten $0 \text{ m/min} < v_D \leq 10 \text{ m/min}$. Die Drahtzuführung ist von einer koaxial angeordneten Düse umgeben, die das verwendete Schutzgas Argon auf den Drahtaufreffpunkt richtet. Um einen geringen Abstand zwischen dem

Drahtauftreffpunkt und dem Brennfleck des Lasers zu ermöglichen, ist die Düse an einer Seite mit einer Aussparung versehen.

In Abbildung 24 ist die Sprühdüse für den Flussmittelauftrag und die kombinierte Draht-Schutzgaszuführung dargestellt. Die Höhenlage, die in der Abbildung angefahren ist, entspricht dem Arbeitsabstand während des Prozesses. Das eingespannte Werkstück befindet sich ca. 4 mm unterhalb der Sprühdüsenöffnung. Der Abstand des Flussmittelauftrags vom Mittelpunkt des Fokus beträgt $a_F \approx 50$ mm.



©LZH

Abbildung 24: Sprühdüse und kombinierte Draht-Schutzgaszuführung im Arbeitsabstand

Als Spanntechnik wird eine im Laser Zentrum Hannover e.V. konstruierte pneumatische Spannvorrichtung mit einer Einspannlänge von maximal 500 mm verwendet. Durch eine Einleghilfe kann eine exakte Lage des Fügespalt gewährt werden.

6.4 Versuchsdurchführung

Zur Optimierung der Versuchsdurchführung bedarf es der Kenntnis der den Prozess beeinflussenden Parameter. Hierfür wurde im Vorfeld der Versuche eine genaue Betrachtung der Einflussgrößen vorgenommen. Die Verifizierung der Zielgrößen (optimale Umformung und Festigkeit der Lötinähte) erlaubt eine genaue Rückkopplung der Einflussgrößen auf das Prozessergebnis.

Die detektierten Einflussgrößen sind die Laserleistung, die Brennfleckgeometrie, die Flussmittel- und die Löt drahtmenge, die Aufbringung der Medien und die Spaltbreite, wobei hinsichtlich der Laserleistung die maximale Ausgangsleistung des verwendeten Systems eine definierte Obergrenze darstellt. Ebenso ist der maximale Vorschub der Verfahrenseinheit eine Ober- und die bislang erreichten Vorschübe von 1 m/min eine Untergrenze.

Die Einflussgrößen sind in Abbildung 25 in Bezug auf ihre Entstehung oder Beeinflussungsmöglichkeit dargestellt.

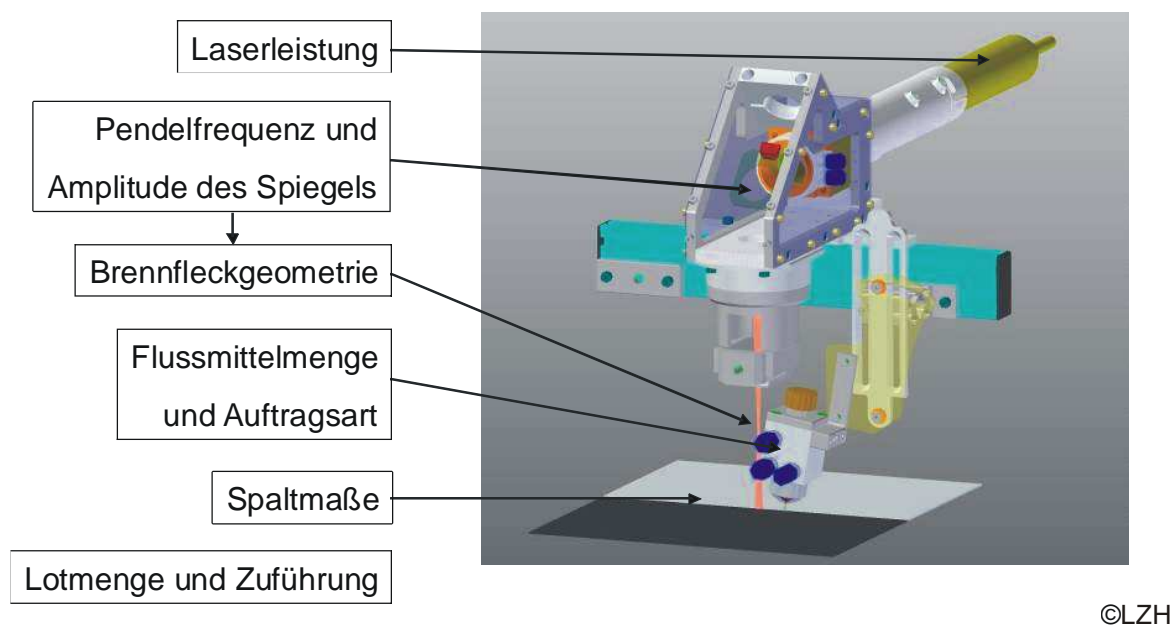
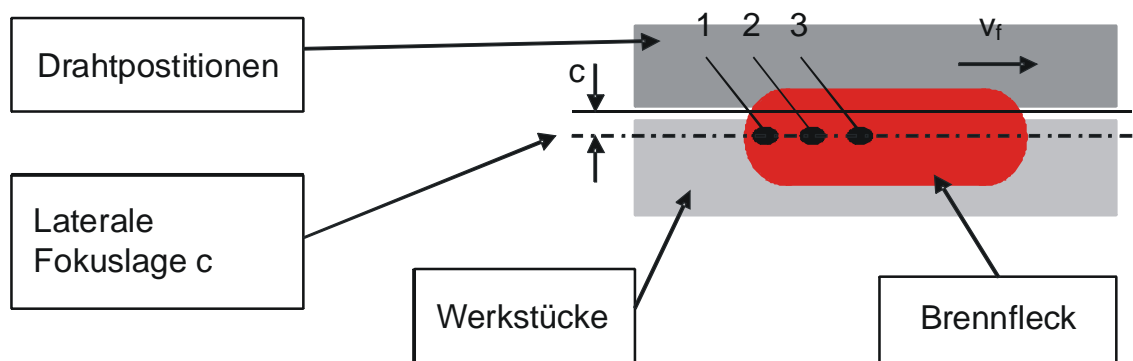


Abbildung 25: Einflussgrößen auf den Laserlötprozess

Der Zusammenhang zwischen dem aufzuschmelzenden Drahtvolumen und der benötigten Laserleistung erlaubt die Einstellung der optimalen Drahtmenge und eine spätere Variation der Laserleistung. Die Verbesserung der Benetzungseigenschaften durch das Strahlpendeln bedarf ggf. einer Anpassung der Laserleistung. Somit kann durch eine Vorbereitung und Festlegung der Zielgrößen der Versuchsaufwand reduziert und diskrete Fragestellungen anhand von Stichversuchen generell beantwortet werden.

Für eine optimale Benetzung und daraus resultierende Nahteigenschaften wurde eine systematische Variation des Drahtauftreffpunktes (1, 2, 3) und der lateralen Fokuslage vorgenommen, wobei ein vertieftes Prozessverständnis für die Auswirkung des Strahlpendelns auf das Benetzungsverhalten des Lotes auf der

Grundwerkstoffoberfläche erlangt werden soll. Durch anschließende visuelle Begutachtung der Lötinähte wurde die optimale Drahtposition bestimmt. Die variierten Drahtpositionen und die laterale Fokuslage sind in Abbildung 26 dargestellt. Zusätzlich wurde der Drahtanstellwinkel variiert, was eine Änderung der Schutzgasposition mit sich bringt, da diese in einer kombinierten Düse angebracht sind. Bei der Variation des Drahtauftreffwinkels konnte jedoch nach wenigen Versuchen festgestellt werden, dass der optimale Winkel bei 60° zur Strahlrichtung liegt. Aus diesem Grund wird im Folgenden nicht näher auf diese Variation eingegangen.

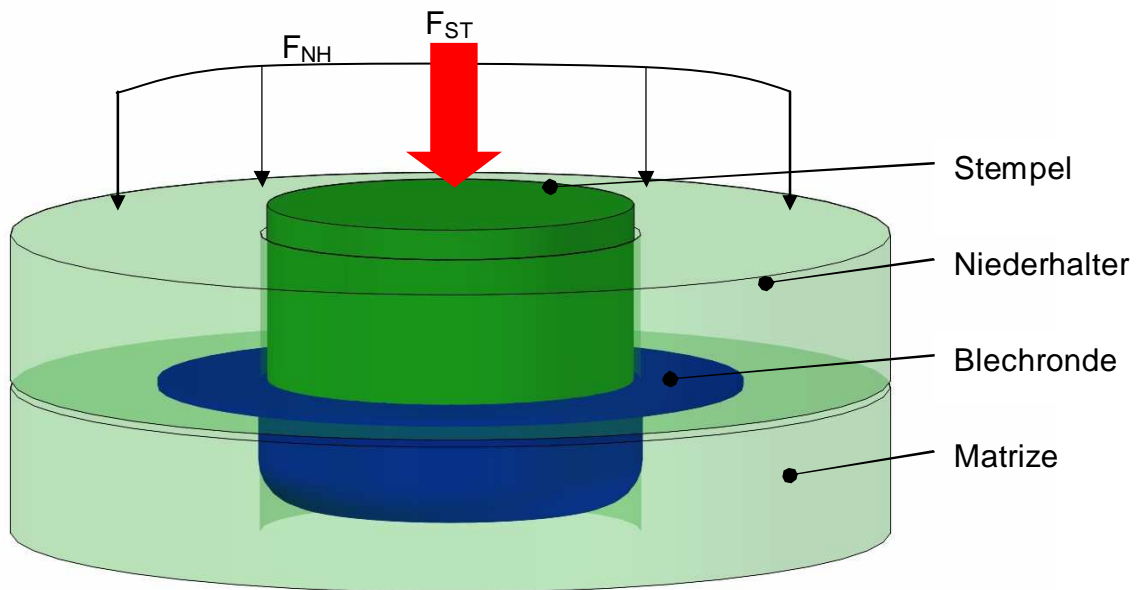


©LZH

Abbildung 26: Drahtposition im Brennfleck

6.5 Tiefziehuntersuchungen

Bei einer Tiefziehprüfung wird eine Blechrunde mit einem Ausgangsdurchmesser D_0 zwischen einem Ziehring und einem Niederhalter eingespannt. Die durch die Tiefziehpresse aufgebrachte Niederhalterkraft F_{NH} verhindert die Faltenbildung im Flanschbereich (Falten 1. Art). In der ersten Phase des Umformvorgangs formt der Ziehstempel den Ziehteilboden aus. Dieser Vorgang wird als Streckziehen bezeichnet, dabei fließt der Werkstoff aus der Blechdicke. Wird in der zweiten Phase des Umformvorgangs die Umformkraft größer als die Flanscheinzugskraft, wird der eigentliche Tiefziehvorgang eingeleitet. Der Werkstoff fließt aus dem Flanschbereich in die Ziehteilzarge (siehe Abbildung 27).



©LZH

Abbildung 27: Tiefziehprüfung in Anlehnung an den Nöpfchenversuch nach Swift

Beim Tiefziehen treten unterschiedliche Kräfte in den verschiedenen Bereichen der Umformung auf. Im Bereich des Ziehteilbodens handelt es sich um eine zweichachsige Zugbeanspruchung. Im Flanschbereich wird eine Zug-/Druckbeanspruchung und im Auslauf der Stempelkante eine behinderte einachsige Zugbeanspruchung eingeleitet /119/. Die Kräfte, die auf das Bauteil wirken, sind in Abbildung 28 dargestellt.

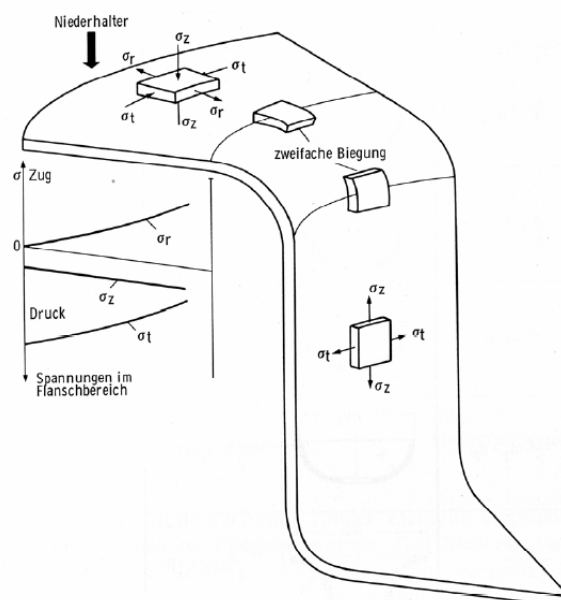


Abbildung 28: Beanspruchungen beim Tiefziehen im Anschlag nach /119/

Als Ergebnis ergibt sich aus dem Durchmesser des Tiefziehstempels d_0 und dem Ausgangsdurchmesser der Blechrode $B_{0,max}$ das maximale Tiefziehverhältnis $\beta_{0,max}$.

$$\beta_{o,max} = B_{o,max}/d_o$$

(Gl. 5) /119/

Hierbei ist zu erwähnen, dass der verwendete Aluminiumgrundwerkstoff über ein maximales Tiefziehverhältnis im Auslieferungszustand von $\beta_{o,max} = 2,05$ verfügt. Dieses Tiefziehverhältnis wird jedoch durch die Überalterung des Werkstoffs und damit einhergehende Verfestigung weiter reduziert, so dass bei Blechen, die zu einem späteren Zeitpunkt getestet werden, teilweise abweichende Werte gemessen wurden.

6.6 Korrosionsuntersuchungen

Der Klimawechseltest wird nach der Norm VDA 612-415 durchgeführt und dauert insgesamt 10 Wochen. In diesen 10 Wochen werden verschiedene Klimawechsel vollzogen, die eine Korrosion über einen Lebenszyklus abbilden. In einem stetigen Wechsel von Salzkondenswasser-Aufheizen und -Belüften wird die Probe in einem Wechselklima in kurzer Zeit stark beansprucht. Nach einem Zyklus, der eine Woche dauert, werden die Proben entnommen und die Korrosionserscheinung dokumentiert. Anschließend werden die Proben wieder in der Kammer verteilt und ein neuer Zyklus gestartet. In Tabelle 3 sind die einzelnen Prüfphasen für einen einwöchigen Zyklus dargestellt und die zugehörigen Prüfdauern und –temperaturen zu entnehmen.

Die Proben werden in einer Klimawechseltestkammer in zwei Ebenen angeordnet, wobei in wöchentlichen Intervallen die Positionen gewechselt werden. Dieser Wechsel wird vollzogen, um über die gesamte Dauer des Tests eine gleichmäßige Belastung der Proben zu erzielen und nicht durch eine Betropfung von Blechen oberhalb ungleichmäßige Bedingungen hervorzurufen.

Tabelle 3: Klimawechseltest nach VDA 621-415

Methode Nr.11	Wechseltest VDA 621-415			
	Prüfphase	Prüfdauer	Prüftemperatur	Befeuchter- temperatur
1. Abschnitt	Salznebel mit anschl. Prüfraumwäsche	24 Std.	35°C	55°T
2. Abschnitt	Raumluft	0,5 Std.	RT	
3. Abschnitt	Kondenswasser heizen	7,5 Std.	40°C	
4. Abschnitt	Kondenswasser belüften	16 Std.	RT	
5. Abschnitt	Kondenswasser heizen	8 Std.	40°C	
6. Abschnitt	Kondenswasser belüften	16 Std.	RT.	
7. Abschnitt	Kondenswasser heizen	8 Std.	40°C	
8. Abschnitt	Kondenswasser belüften	16 Std.	RT.	
9. Abschnitt	Kondenswasser heizen	8 Std.	40°C	
10. Abschnitt	Kondenswasser belüften	16 Std.	RT.	
11. Abschnitt	Raumluft	48 Std.	RT.	
12. Abschnitt	Programmende			

7 Auswertung und Diskussion

7.1 Thermographische Analyse der Brennfleckgeometrie

Die thermische Auswirkung der Brennfleckgeometrie hat beim Laserstrahllöten einen besonderen Einfluss auf das Benetzungsverhalten des Lotwerkstoffes mit dem Grundwerkstoff. Eine ungleichmäßige Erwärmung der Grundwerkstoffe bewirkt eine ungleichmäßige Benetzung des Fügestoßes. Dieses kann bei der Werkstoffkombination Stahl und Aluminium gezielt genutzt werden, um die unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit und Absorptionsverhalten der Werkstoffe zu kompensieren. Bei Materialkombinationen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften und variierenden geometrischen Abmessungen ist die Möglichkeit der gezielten Beeinflussung der Temperaturen im Bereich der Fügezone vorteilhaft. Durch eine Verschiebung der lateralen Fokusslage wird der unterschiedliche Wärmeabfluss in das Werkstückvolumen ausgeglichen und eine gleichmäßige Lötnaht erzeugt.

Eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit kann ebenfalls durch eine Veränderung der Brennfleckgeometrie ermöglicht werden. Um eine Steigerung der Geschwindigkeit bei nahezu gleichen Prozessergebnissen zu erreichen, bedarf es ähnlichen Diffusionsbedingungen. Diese können durch die Diffusionstemperatur und die Haltezeit der Diffusionstemperatur beeinflusst werden.

Durch einen Laserbearbeitungskopf mit einem integrierten Scannerspiegel kann der Laserfokus in eine Richtung abgelenkt und dadurch unidirektional aufgeweitet werden.

Mittels einer thermographischen Kamera (ThermCAM 1000) wurden verschiedene Brennfleckgeometrien untersucht, um den Einfluss des Strahlpendelns auf den Prozess zu verifizieren. Entscheidend für ein fundiertes Prozessverständnis ist die Erkenntnis der Temperaturverteilung an der Oberfläche der Grundwerkstoffe in Kombination mit dem Flussmittel und dem Zusatzwerkstoff. Hierfür wurden die aufgenommenen Videosequenzen hinsichtlich der Temperaturverteilung analysiert.

Um die Auswirkung der Strahlformung auf die Benetzung der Fügepartner zu untersuchen, wurden Lötungen mit unterschiedlichen Pendelhüben und Frequenzen durchgeführt. Diese Lötungen wurden mit einer Thermographiekamera beobachtet, um die Temperaturverteilung analysieren zu können. Mit Hilfe dieser

thermographischen Untersuchungen kann außerdem ein Eindruck über die vorherrschenden Temperaturen bei den verwendeten Prozessparametern gewonnen werden. Abbildung 29 zeigt exemplarisch ein Temperaturprofil, in dem der Drahtaufreffpunkt und die Werkstückbewegung für die Versuche dargestellt sind. Der Drahtaufreffpunkt wurde für die hier gezeigten Auswertungen konstant gehalten.

Zu Beginn wurden Lötungen mit einem stehenden Brennfleck, der ca. 4 mm Durchmesser aufweist, durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass sowohl die Aluminium- als auch die Stahlblechkante bei Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 1,5 m/min ausreichend erwärmt werden können. Die Benetzung auf der Stahloberfläche, welche mit Zink beschichtet ist, ist als optimal einzustufen. Die Aluminiumblechseite weist eine weniger starke, aber dennoch ausreichende Benetzung auf. Bei einer weiteren Steigerung der Prozessgeschwindigkeit kommt es zu beginnenden Inhomogenitäten in der Lotnahtausprägung, was auf eine unzureichende Erwärmung der Fügezone zurückzuführen ist.

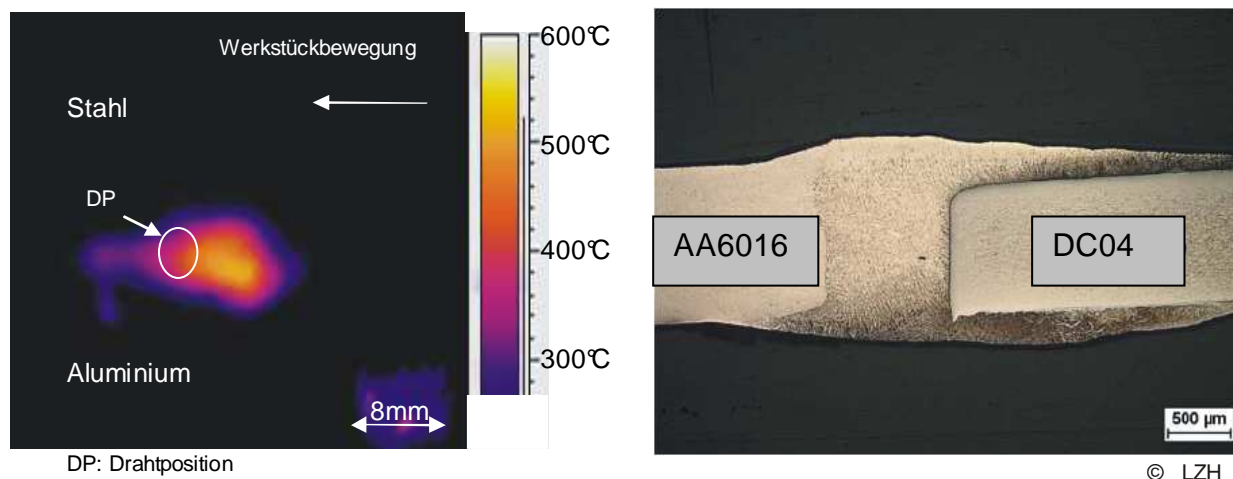


Abbildung 29: Thermographieaufnahme und Schlibbild der Lötnaht

Für die nächsten Versuche wurden Sinusschwingungen für die Ansteuerung verwendet, da diese den Galvoscaner am gleichmäßigsten ansteuern und eine Frequenz von >100 Hz ermöglichen. Diese Frequenz wird benötigt, um auf dem Werkstück eine quasisimultane Brennfleckgeometrie zu erreichen. Die Wärmeleitungsgeschwindigkeit ist bei Frequenzen oberhalb von ca. 100 Hz langsamer als die Fokuspendingung, so dass sich keine variierenden Prozessverhältnisse einstellen. Der Werkstoff wird deshalb durch einen länglich-

ovalen Brennfleck erwärmt, der aus einem sich bewegenden runden Brennfleck entsteht.

Bei den Strahlpendelversuchen konnte eine deutliche Verbesserung der Prozessstabilität festgestellt werden, durch die aufgeweitete Prozesszone kann das Flussmittel besser aktiviert und damit die Oberfläche optimal für die Benetzung vorbereitet werden. Für die Thermographieaufnahmen wurde eine Pendelfrequenz von 200 Hz für die vergleichenden Lötungen eingestellt. Bei dieser Pendelfrequenz konnte ein sehr stabiler Prozess erreicht werden, der eine Lötgeschwindigkeit bis zu 4 m/min erlaubt.

Mit der Messung der Temperaturverteilung soll weiterhin Aufschluss über die Auswirkung des Strahlpendelns auf die Prozesstemperatur erlangt werden. In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind die Auswertungen dargestellt.

In Abbildung 30 ist ein Temperaturverlauf quer zur Lötichtung dargestellt, der an einer Thermographieaufnahme ohne Strahlpendeln ermittelt wurde. In der Mitte der Fügezone ist eine maximale Temperatur von ca. 600° C festzustellen. Nach außen fallen diese Werte stark ab, was zum einen auf die Leistungsdichteverteilung der Laserstrahlung zum anderen auf die Wärmeabfuhr von der Stoßgeometrie in das Bauteil zurückzuführen ist. Anhand des Temperaturverlaufes ist erkennbar, dass es in der Mitte der Fügezone, trotz Defokussierung des Laserstrahls, zu einer Überhitzung der Werkstücke kommen muss, damit in der Nähe der Stoßkante noch eine ausreichende Benetzung gewährleistet wird. Diese Überhitzung führt im unmittelbaren Kontaktbereich zwischen Aluminiumgrundwerkstoff und Lot zu einer Überalterung in der Wärmeeinflusszone.

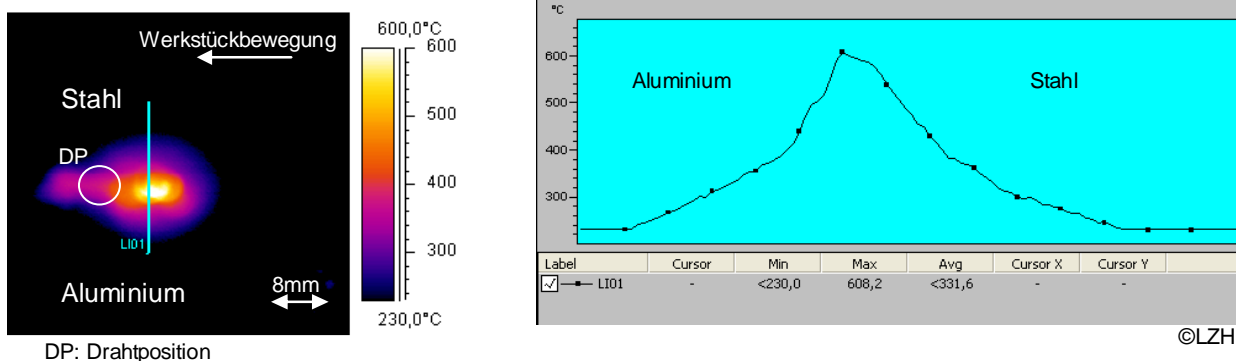


Abbildung 30: Querprofil der Temperatur beim Löten ohne Strahlpendeln

Um die Überalterung zu vermeiden soll mittels Strahlpendeln die Maximaltemperatur im Brennfleck reduziert und gleichzeitig der Temperaturgradient im Randbereich des

Brennflecks abgeflacht werden. Mittels einer Temperaturanalyse wurde das Temperaturprofil an einer Lötprobe mit Strahlpendeln (Pendelhub ca. 10 mm bei einem Fokusdurchmesser von 4 mm) ermittelt.

Anhand des Temperaturprofils in Abbildung 31 ist eine Reduzierung der Maximaltemperatur zu erkennen. Die Maximaltemperatur konnte durch das Strahlpendeln bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit um ca. 80°C auf 520°C gesenkt werden. Sichtbar wird auch die Erweiterung des Bereiches in dem Temperaturen zwischen 300° und 400°C vorherrschen. Ein Absenken der Temperatur im mittleren Bereich des ovalen Brennflecks stimmt mit dem Drahtaufreffpunkt überein. Durch die benötigte Energie für das Aufschmelzen des Lotes wird die Temperatur in diesem Bereich abgesenkt.

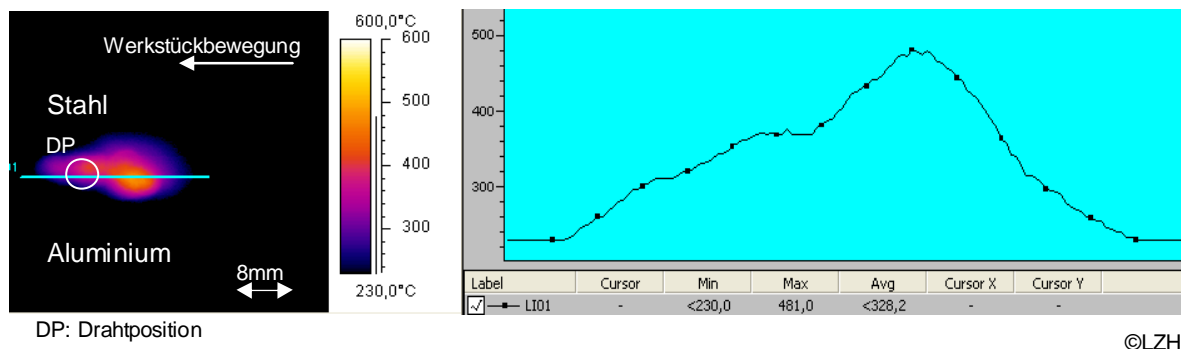


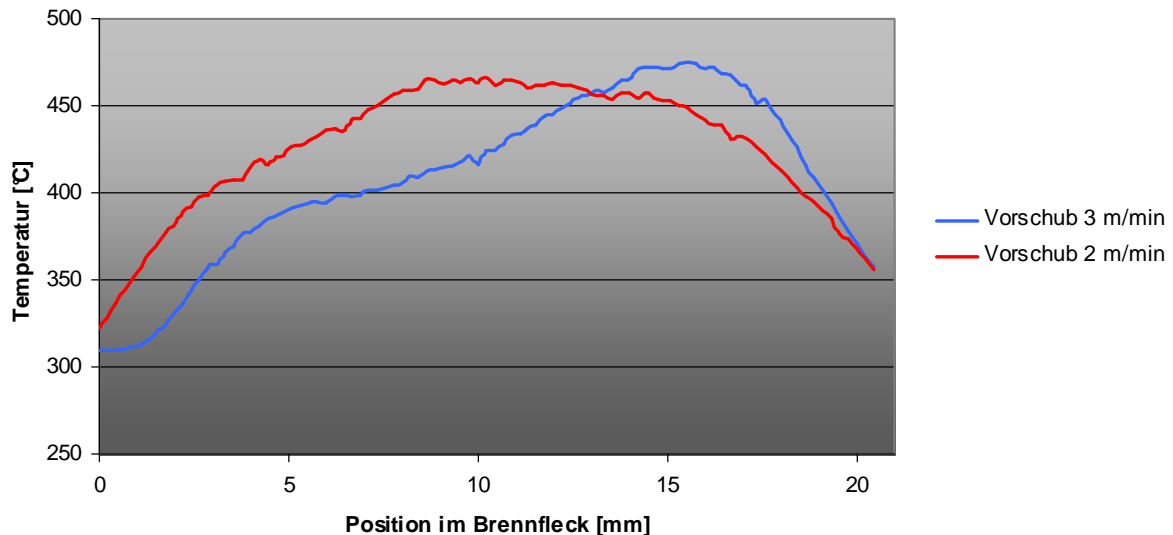
Abbildung 31: Längsprofil der Temperatur beim Löten mit Strahlpendeln

Mittels Thermographieaufnahmen bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten konnte der Verlauf der Temperatur in Längsrichtung durch den Brennfleck analysiert werden.

In Abbildung 32 sind die Temperaturverläufe im Brennfleck bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 und 3 m/min dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/min eine gleichmäßige Temperaturverteilung vorliegt. Über den gesamten Brennfleck ist der Temperaturgradient im vorderen wie im hinteren Bereich gleich, dies deutet auf eine ausreichende Zeit für eine Wärmeleitung aus der Prozesszone in Vorschubrichtung und entgegen dieser hin. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Wärmeleitungsgeschwindigkeit im Werkstück höher ist, als die Vorschubgeschwindigkeit. Steigert man die Vorschubgeschwindigkeit auf 3 m/min kann eine Überhöhung der Temperatur im Frontbereich des Temperaturverlaufes des Brennflecks erkannt werden. Es ist zu erwähnen, dass die maximale Temperatur im vorderen Bereich

etwas höher ist als bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/min. Der Temperaturgradient im vorderen Bereich ist deutlich höher als im hinteren Bereich, was für ein schnelles Aufheizen der Fügezone und ein langsames Abkühlen spricht. Die Fläche unter dem Kurvenzug ist jedoch bei dem Temperaturverlauf mit 2m/min um ca. 5 % größer, was einen höheren gemittelten Energieeintrag bedeutet.



©LZH

Abbildung 32: Temperaturverlauf durch die Mitte des Brennflecks mit Strahlpendeln

Durch das Laserstrahlpendeln kann die maximale Temperatur gesenkt und der Temperaturgradient in Vorschubrichtung abgeflacht werden. Dieses führt zu einer besseren Benetzung gerade bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten. Durch die Reduzierung der Maximaltemperatur wird eine thermische Beeinflussung der Grundwerkstoffe teilweise verringert oder ganz eingedämmt. Es ist von einer Verringerung der thermischen Schädigung der Randbereiche der Fügezone auszugehen, was sich positiv auf die Festigkeit der Fügeverbindung auswirken sollte.

7.2 Visuelle Begutachtung der Löt Nähte

Nach jeder Lötung wurden die Löt Nähte einer visuellen Analyse unterzogen, um unmittelbar Erkenntnisse über Optimierungspotential zu erlangen. Aufschluss können hierbei die Flussmittelwirkzonen geben. Ist diese bspw. nicht zu erkennen, kann dies ein Hinweis auf eine zu geringe Arbeitstemperatur sein. Ist die Flussmittelwirkzone nur an einigen Stellen ausgeprägt, deutet dieses auf eine Störung des

Flussmittelauftrages hin. Es konnte beobachtet werden, dass bei unterbrochenem Sprühauftrag die Flussmittelwirkzone diesem Bild ähnelt (vgl. Abbildung 34 links instabiler Prozess).

Eine geringe Benetzung der Aluminiumoberfläche kann als ein Indiz für zu geringe Erwärmung des Aluminiumgrundwerkstoffes gesehen werden. Die Spaltfüllung und die Überhöhung der Lotoberraupe kann Aufschluss über die richtige Drahtmenge geben. Anhand einer Lötung mit 5000er Aluminium soll eine ungleichmäßige Lötung dargestellt werden. Die Lötung in Abbildung 33 weist eine ungleichmäßige Nahtausprägung auf. Diese ist ein Indiz für einen unruhigen Prozess. Bei der AA5182 lässt sich kein gleichmäßiger Lötprozess einstellen, da die Benetzung durch das Magnesiumoxid erschwert wird. Hinzu kommt eine deutliche Porenbildung im Bereich der Lötnahtunterseite (rechts), die auf Verdampfen von Flussmittel zurückzuführen ist. Bei einer Überhitzung der Proben lässt sich nur noch ein Schweißlötprozess einstellen.



©LZH

Abbildung 33: Visuelle Bewertung einer Lötung von DC04 mit AA5182 (rechts Nahtunterseite und links Nahtoberseite)

Im Weiteren soll anhand einer Probe mit einem prozesstypischen Lötergebnis einige Auffälligkeiten näher beschrieben und auf einige Charakteristika der Lötnaht eingegangen werden.

Die Probe in Abbildung 34 wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 3$ m/min gelötet, wobei die Drahtfördergeschwindigkeit $v_D = 3,8$ m/min betrug und die Zufuhr stechend erfolgte. In dieser Abbildung ist eine Lötnaht dargestellt und der Nahtanfang und das Nahtende in einer Vergrößerung hervorgehoben. Die Nahtlänge beträgt 210 mm, wobei der Anfang der Naht einen instabilen Prozess aufweist. In der linken Vergrößerung ist zu erkennen, dass die Lotoberraupe eine ungleichmäßige Oberfläche hat, dieses ist ein Indiz für eine noch nicht exakt eingestellte laterale Fokusslage und einer notwendigen Anpassung der Arbeitstemperatur.

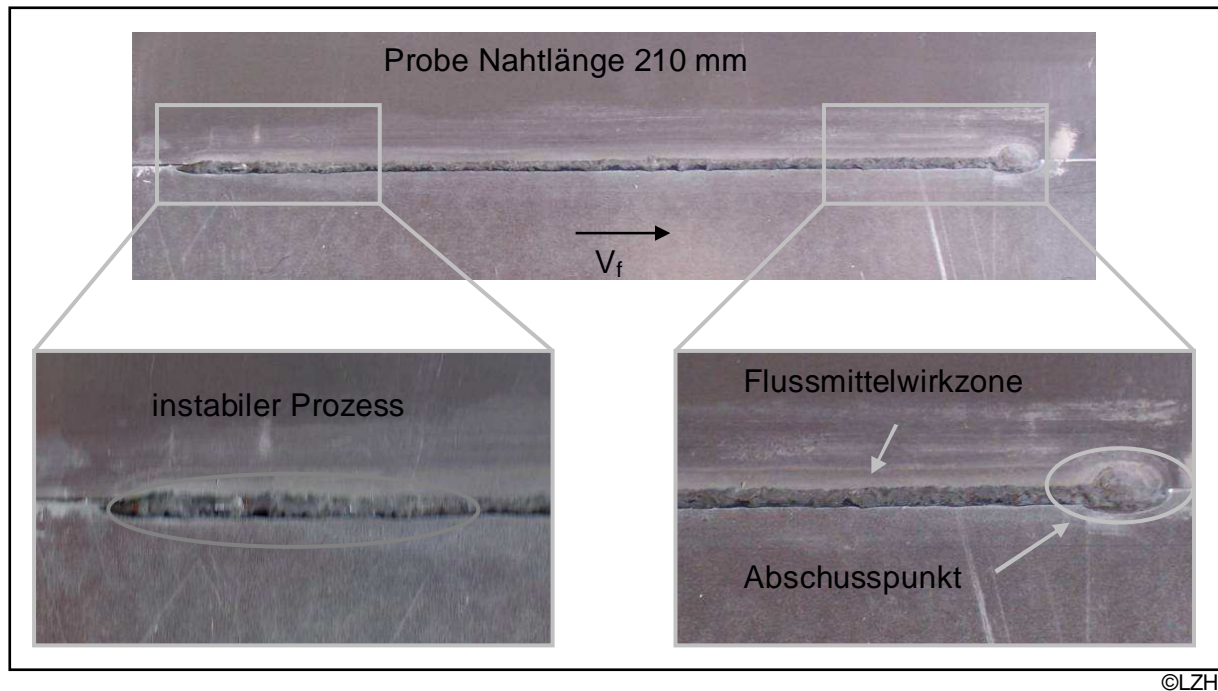


Abbildung 34: Übersichtsaufnahme einer Lötnaht

Im weiteren Verlauf der Lötnaht stabilisiert sich der Prozess aufgrund der vorlaufenden Wärme und bildet eine gleichmäßige Lotoberraupe aus. Im rechten Bild ist der Abschusspunkt des Drahtes zu erkennen, der sich durch die höhere Energieeinbringung in einer breiten Lötnaht widerspiegelt. An dieser Stelle wird häufig auch ein Schweißlötprozess, wie oben beschrieben, durch die hohe Energie erreicht.

Auf der Seite des Aluminiumblechs, hier im Bild oben, ist die Spur des aktivierten Flussmittels deutlich zu erkennen. Das aktivierte Flussmittel hat die Oxidschicht des Aluminiums aufgebrochen und lässt die Oberfläche matt erscheinen. Es ist festzustellen, dass die Flussmittelmenge ausreichend ist für eine gute Benetzung, durch die breitere Flussmittelwirkzone ist genügend Fläche für die Benetzung vorbereitet. Die Auswirkung dieser Wirkzone auf die Korrosionseigenschaften wird im Weiteren näher betrachtet.

Durch eine Optimierung des Prozesses konnte eine Stabilisierung und ein gleichmäßigeres Fügeergebnis erzielt werden. Die Änderung der Drahtzufuhr von stehend auf schleppend ermöglicht ein deutlich besseres Abschmelzen des Drahtes und damit einhergehend ein besseres Benetzungsverhalten auf die durch das Flussmittel desoxidierten Oberflächen. Mit der angepassten Fügevariante konnten schmale und gleichmäßige Nähte erzeugt werden, die sich positiv auf die

Umformeigenschaften auswirken sollten. Durch die Gleichmäßigkeit und die symmetrische Ausprägung der Nahtober- und -unterseite werden sich gerade im Hinblick auf die Innenhochdruckumformung und die Napfziehversuche Vorteile ergeben. Die erzielten Nahtformen sind in Abbildung 35 dargestellt.

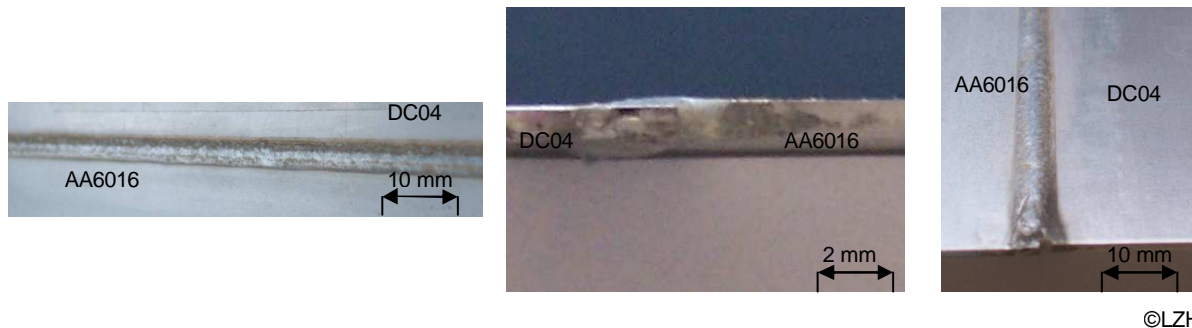


Abbildung 35: Erzielte Nahtausprägungen nach der Prozessoptimierung (links: Nahtunterseite, Mitte: Querschliff makroskopisch, rechts: Nahtoberseite)

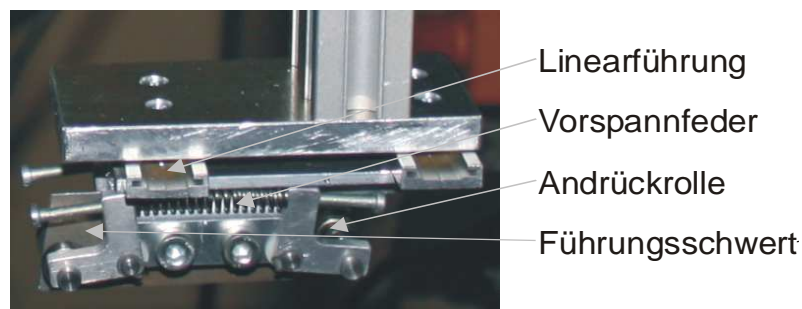
Nach der optischen Begutachtung werden die Proben einer mechanischen Belastungsprobe unterzogen. Hierbei werden die Proben längs und quer zur Lötichtung mit einer Kraft beaufschlagt, um die Festigkeit der Lötnaht eines ersten Testes zu unterziehen. Hierbei sind nicht Kräfte das entscheidende Kriterium, sondern die Möglichkeit eine Probe zu verformen, so dass der Aluminiumgrundwerkstoff sich in der Lötnahtnähe verformt und die Lötnaht nicht versagt. Diese manuelle Vorabprüfung stellt ein erstes Auswahlkriterium für die Zugversuchs- und Umformproben da. Die Belastungsaufbringung auf die Probe kann der Abbildung 36 entnommen werden. Im rechten Teil der Abbildung ist eine Probe nach einem Test der Minimalbiegeradien zu sehen. Hier wurde getestet, ob die Duktilität der Lötnaht ausreichend ist, um bei einem Napfziehversuch einen Stempelradius von 6 mm zu tolerieren.



Abbildung 36: Belastungstest für händische Vorabprüfung (Probenlänge vor Belastung 100 mm)

7.3 Bestimmung der Einwirkung der Spaltbreite auf das Lötergebnis

Die thermische Beeinflussung der Grundwerkstoffe führt zu einem Ausdehnen der Fügepartner. Hierdurch verändert sich die Lötspaltbreite, was zu variierenden Prozessbedingungen führt. Erste Ansätze einer Spaltkontrolle, die während des Lötprozesses die geforderten Spaltmaße einstellt, wurden getestet. Hierfür wurde ein Schlitten mit Rollen versehen und dem Prozess vorgeschaltet, durch ein integriertes Führungsschwert sollte ein definiertes Spaltmaß eingestellt werden. Über zwei vorgespannte Federn wurden über Umlenkhebel die Führungsrollen auf die Werkstückoberflächen gedrückt. In Abbildung 37 ist der Führungsschlitten dargestellt.



©LZH

Abbildung 37: Spaltgarantie im montierten Zustand

Bei der Erprobung dieser Spaltkontrolle wurde jedoch festgestellt, dass diese nicht das gewünschte Ergebnis ermöglicht, da durch einen verengten Spalt die Reibung zwischen dem Führungsschwert und den Stoßkanten der Fügepartner zu einem Stick-Slip-Effekt führt. Dieses hat eine induzierte Schwingung im Bearbeitungskopf zur Folge, die nicht toleriert werden kann. Um die Auswirkung der fehlenden Spaltkontrolle auf das Fügeergebnis zu verifizieren, wurden Lötungen mit gleichen Parametern, aber zwei verschiedenen Einspannkonzepthen analysiert.

In einem ersten Versuch wurden die Grundwerkstoffe durch Fühlerlehrenband der Stärke 400 µm auseinander gehalten. In einem zweiten Versuch wurden auf diese verzichtet. Die Einschnürung der Spalte wurde abschließend in metallographischen Schliffen quer zur Löttrichtung ausgemessen, die vermutete Einschnürung des Lötspaltes konnte nachgewiesen werden. Diese war jedoch im Vergleich zu den eingestellten 400 µm (vgl. ohne Erwärmung in Abbildung 38) nicht signifikant. In der unten aufgeführten Abbildung 38 sind die Einschnürungen bei den unterschiedlichen

Prozessführungen zu sehen. Es ist zu erkennen, dass durch die Fühlerlehrenbänder im Bereich des Anfangs und des Endes eine Zwangsführung vorliegt, sich die Bleche aber im Bereich der Nahtmitte zusammenziehen. Bei den Versuchen ohne Zwangsführung ist eine deutlichere Einschnürung zu sehen, die aber mit max. 100 μm als konstant eingestuft wurde. Diese kann bei der Prozessauslegung berücksichtigt werden und erlaubt einen Verzicht auf die Spaltkontrolle.

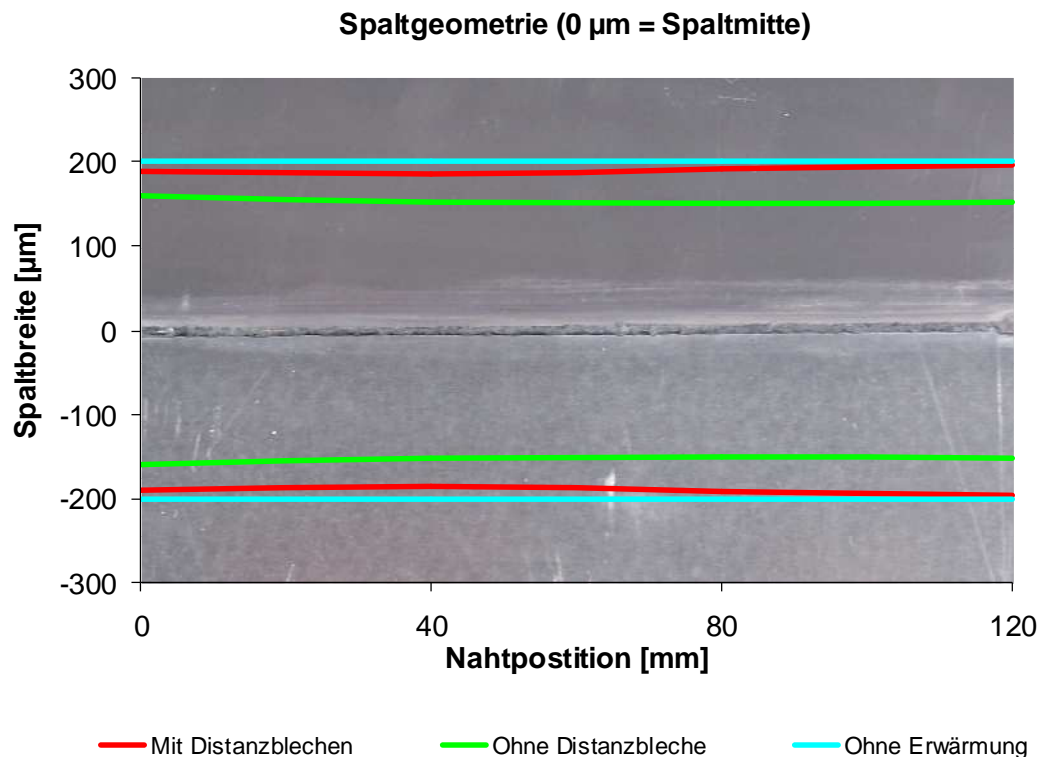


Abbildung 38: Spalteinschnürung bei unterschiedlichen Prozessstrategien

7.4 Metallographische Untersuchungen und Betrachtung der Phasensaumdicken

Zur Beurteilung der Fügeverbindung werden metallographische Analysen der Fügezone im Querschliff vorgenommen. Diese Untersuchungen geben Aufschluss über die Homogenität der Fügestelle und können ggf. etwaige Fehlstellen aufzeigen. Des Weiteren können Erkenntnisse über die Morphologie und die Ausprägung des Phasensaumes gewonnen werden.

Zink-Aluminiumlote

Bei der Herstellung von Mischverbindungen mit Zinkbasisloten kommt es auf Grund der Arbeitstemperaturen von ca. 400 – 450°C zu einem reinen Lötprozess, d.h. die Grundwerkstoffe werden nicht aufgeschmolzen. Im Bereich des Stahlbleches ist somit ein geringer Anteil Aluminium vorhanden, der ausschließlich durch das Lotssystem bereitgestellt wird. Ein Auflegieren durch Diffusion vom Aluminiumgrundwerkstoff ins Lot wird als vernachlässigbar eingestuft.

Eine Analyse der Schiffe unter dem Auflichtmikroskop und dem Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigen fehlerstellenfreie Lötverbindungen, welche sowohl die Ober- als auch die Unterseite des Stahlbleches benetzen. Ein typisches Schlibbild einer Lötung mit Fülldrahtloten ist in Abbildung 39 zu sehen. Es kann im Bereich der Stoßkante des Stahlbleches ein Phasensaum mittels REM detektiert werden, der eine Dicke von ca. 3 µm aufweist.

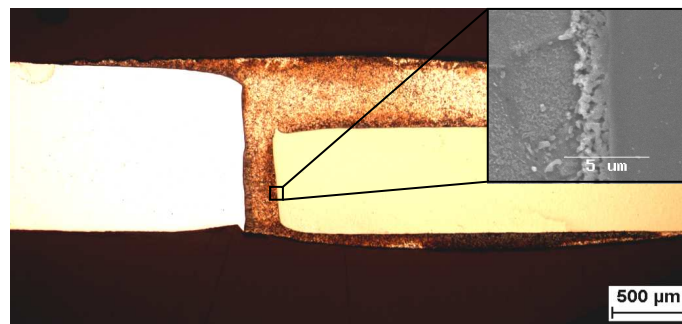
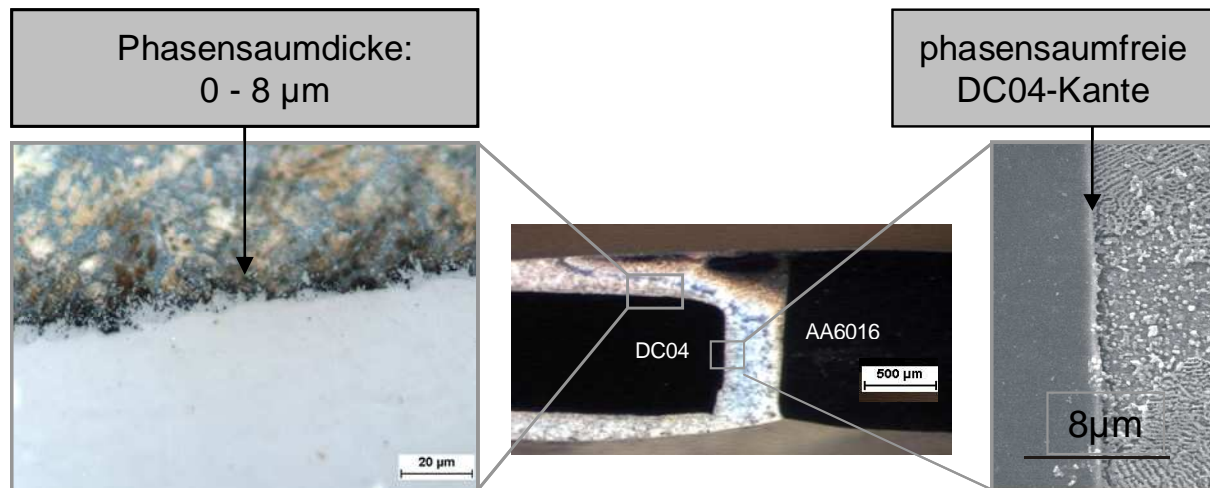


Abbildung 39: Querschliff einer Lötnaht, die mit ZnAl₂-Fülldrahtlot gelötet wurde (links AA6016; rechts DC04; $v_f = 1,5$ m/min; $P_L = 2,5$ kW)

Bei der Analyse der Prozesstechnik mit getrennter Flussmittelaufbringung und der Verwendung des Strahlpendels wurde ein gering abweichendes metallurgisches Verhalten detektiert.

An der Oberseite des Stahlblechs und im oberen Drittel des Fügestoß kommt es zur sporadischen Bildung von intermetallischen Phasensäumen. Diese treten in sprunghaft wechselnder Morphologie auf, wobei die Ausprägung bis zu 7 µm beträgt. In Abbildung 40 ist ein Querschliff mit REM-Aufnahmen zu sehen.



©LZH

Abbildung 40: Phasensaumanalyse: Querschliff einer Lötprobe mit ZnAl2-Lot ($v_f = 3 \text{ m/min}$; $P_L = 2,8 \text{ kW}$)

Im weiteren Verlauf der Stirnkante und auf der Blechunterseite konnten nur Phasensäume gefunden werden, wenn es zu Anschmelzungen der Aluminiumstoßkante gekommen ist. Diese sind auf eine zu hohe Prozesstemperatur zurückzuführen, so dass sich ein Schweißlötprozess einstellt.

Eine EDX-Analyse des Phasensaumes wurde durchgeführt, um die detektierten Phasen anhand der Erkenntnis aus /26/ und /30/ einzuordnen. Hierdurch kann eine Charakterisierung des Phasensaums im Hinblick auf den Einfluss auf die Umformbarkeit vorgenommen werden.

Es wurde ein Fe-Anteil von 30 at% und ein Al-Anteil von 70 at% festgestellt, was auf einen Fe_2Al_5 -Phasensaum schließen lässt. Diese Phase ist typisch für thermische Fügeverfahren mit hoher Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit und weist nach /30/ eine Härte von 1000-1050 $\text{HV}_{0,2}$ auf. Sie kann demnach als hinderlich für die Umformung eingestuft werden, wobei im Verlauf der Untersuchungen Rückschlüsse über die tolerierbare Dicke des Phasensaums gezogen werden. Die Ausprägung und die Morphologie des Phasensaumes ist entscheidend für die Umformbarkeit und die Belastbarkeit der Fügeverbindung. Es bedarf der Erkenntnis der Versagensmechanismen und der Schwachstelle der Fügeverbindung, um eine Optimierung der Fügeverbindung vornehmen zu können. In Abbildung 41 ist die Auswertung der EDX-Analyse dargestellt und der Messpunkt genau bestimmt.

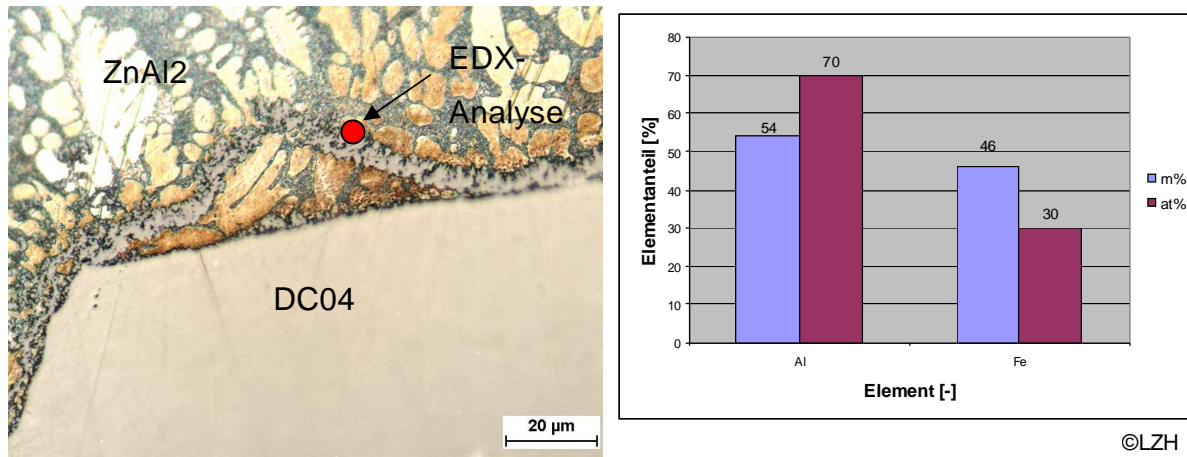
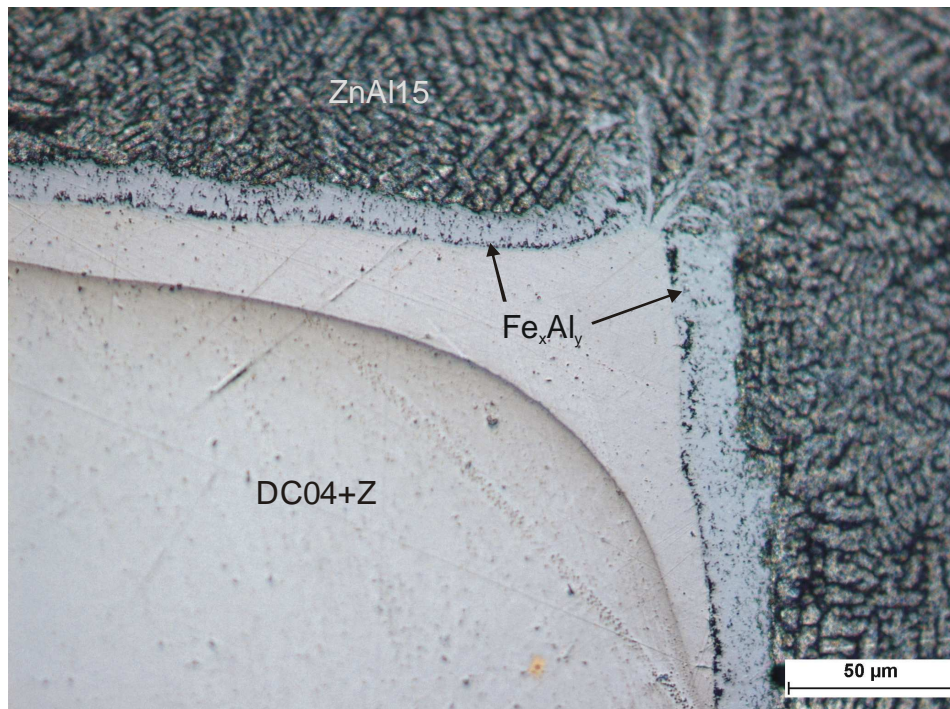


Abbildung 41: EDX-Analyse eines Phasensaumes ($v_f = 3 \text{ m/min}$; $P_L = 3,1 \text{ kW}$)

Durch die Verwendung eines ZnAl15-Lotes mit einem deutlich höheren Aluminiumanteil soll dessen Auswirkung auf die metallurgischen Eigenschaften näher untersucht werden. Durch den erhöhten Aluminiumanteil sollte es zu einer erhöhten Bildung von FeAl-Phasen kommen, da das Aluminium, welches in schmelzflüssiger Form vorliegt, in direkten Kontakt mit dem Stahlblech kommt. Die Anwendbarkeit dieses Lotes ist ebenfalls gegeben, allerdings werden erhöhte Prozesstemperaturen benötigt. Bei der metallurgischen Analyse konnte eine leichte Anschmelzung des Aluminiumgrundwerkstoffes detektiert werden. Es ist somit davon auszugehen, dass der Aluminiumanteil im Lot höher als 15 m% ist, was eine Phasensaumentstehung begünstigt.

Die Klassifizierung der Phasensaummorphologie ergab einen dichten Überzug der Stahlkanten mit einem Phasensaum, der in seiner Ausprägung eine gleichmäßige Breite aufweist. Lediglich im Bereich des Schlagscherengrates kommt es zu einer Veränderung des Phasensaumbildes. An der Spitze des Schergrates löst sich der Phasensaum in das Lot hinein ab und bildet sich an der Spitze sporadisch neu. Es kann davon ausgegangen werden, dass an dieser Stelle die Haftung des Phasensaumes am Stahlblech gering ist. Durch die Erstarrung des Lotes und der vorherrschenden Turbulenz kommt es möglicherweise zu einem Ablösen und Unterlaufen der Phasen, hierdurch können sie sich neu bilden. In Abbildung 42 ist der Phasensaum dargestellt und die Ablösung im Bereich der Schlagscherenkante deutlich zu sehen.



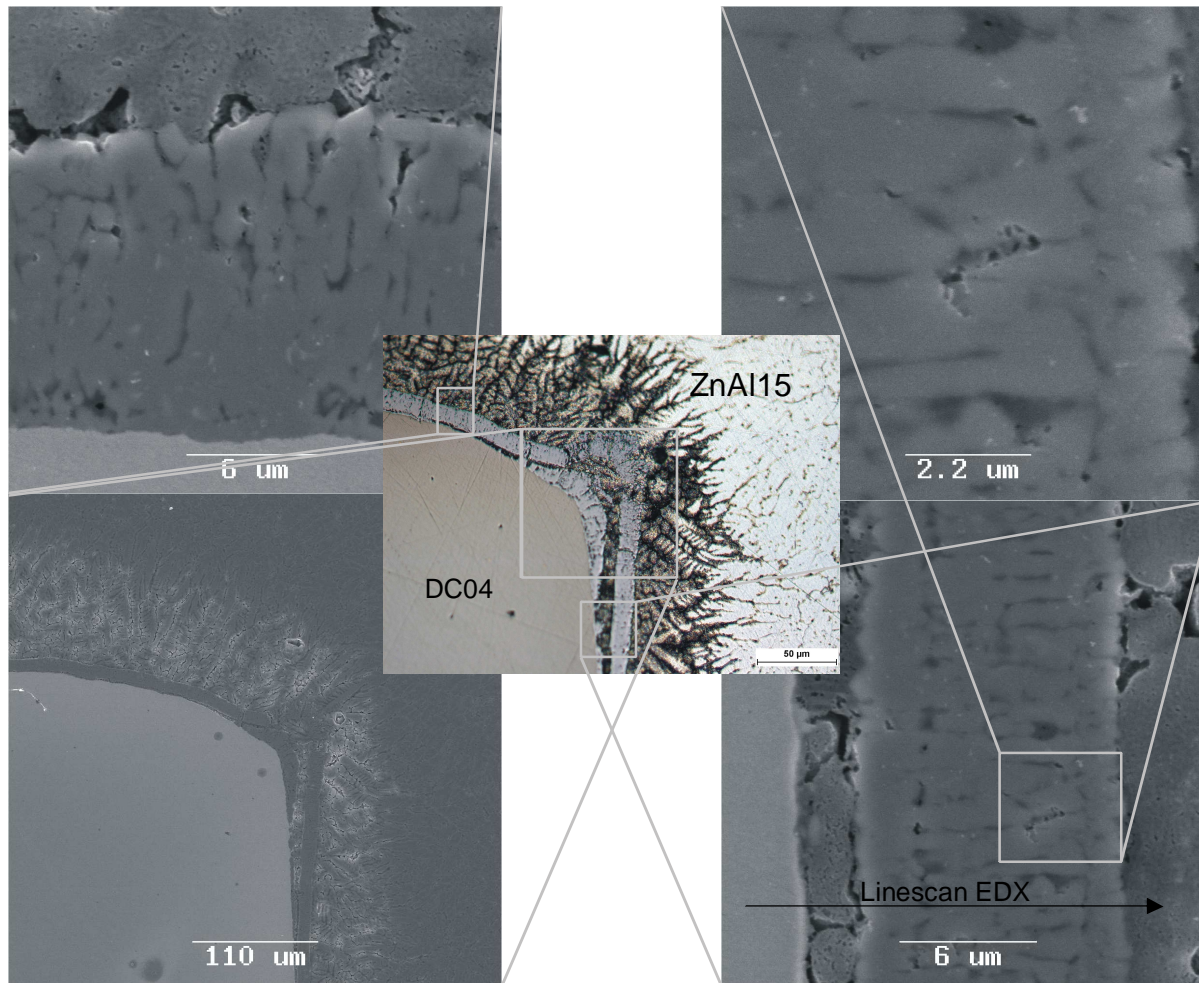
©LZH

Abbildung 42: Querschliff einer Lötung mit ZnAl15 ($v_f = 2 \text{ m/min}$; $P_L = 3 \text{ kW}$)

Da sich die Phasensäume in ihrer Morphologie im Schlibbild unterscheiden, wurden REM-Untersuchungen durchgeführt, hierbei soll eine genauere Bestimmung der Phasenstruktur und der Ausrichtung erfolgen. Durch die EDX-Analyse kann außerdem eine Elementverteilung ermittelt werden. Die Bestimmung des Phasensaumes erfolgt an zwei unterschiedlichen EDX-Linescans.

In Abbildung 43 sind die Phasensäume vergrößert dargestellt, um eine Bewertung des Aufbaus der Struktur vornehmen zu können. Die Phasensäume wachsen in das Lot hinein, was zu unterschiedlichen Bereichen in der Phasensaumausprägung führt. Die Phasensäume zeigen im Bereich der Kontaktfläche der Zinkschicht des Stahlwerkstoffes eine homogene Zone, die einen gleichmäßig festen Verbund aufweist. Es ist über den gesamten Kontaktbereich eine homogene Ausprägung des Phasensaumes zu detektieren. Die Zinkschicht dient in diesen Bereichen als Diffusionshemmer und bewirkt ein konstantes Anhaften des Phasensaums. Der Phasensaum an der Stoßkante des Stahlblechs, welches durch den mechanischen Zuschnitt nicht mit einer Zinkschicht bedeckt ist, weist Ablösungen des Phasensaums auf. Diese Ablösungen sind auch im Bereich des Auftreffpunktes des Laserstrahls an der oberen Stoßkante des Stahlblechs zu finden. Im Bereich der oberen Kante kommt es durch die direkte Einkopplung des Laserstrahls zu einer lokalen Überhitzung und damit einhergehend zu einer Aufschmelzung der Zinkschicht, die

auch schon bei der visuellen Begutachtung detektiert wurde. Im mittleren Bereich der Stoßkante ist ein Wachsen des Phasensaums in Richtung des Lotes zu erkennen, in dem sich Fehlstellen und Einschlüsse befinden. Diese sind in Erstarrungsrichtung ausgeprägt und deuten somit eine Schwachstelle in Krafterleitungsrichtung quer zur Erstarrungsrichtung an. Im Kontaktbereich des Phasensaumes mit dem Lot ist wieder eine feste Schicht im Phasensaum zu erkennen, welche nur geringe Fehlstellen aufweist. Dieses ist ein Indiz für das Wachsen und anschließende Ablösen des Phasensaumes in Abhängigkeit der Temperatur und der Zeit. Es ist davon auszugehen, dass bei einer ungeschützten – nicht verzinkten – Stahlkante die Diffusionsprozesse ungehindert ablaufen können und dadurch das Phasensaumwachstum deutlich stärker stattfindet, als bei einer verzinkten Oberfläche. Die Instabilität des Phasensaumes wird durch die Morphologie der Saumstruktur unterstrichen. Sie deutet auf eine kurzzeitige Stabilität des Phasensaumes hin, der sich durch die thermischen Prozesse im Bereich des flüssigen bzw. teilerstarrten Lotes ablöst und sich bei ausreichender Energie (Temperatur) die Bildung eines neuen Phasensaumes anschließt. Auch die oben erwähnten sprunghaften Morphologieänderungen weisen auf dieses Verhalten hin, welches bei einem Lötprozess mit geringem Aluminiumanteil beobachtet wurde. Diese ist ein Indiz für eine feine Verteilung im Lot durch thermisch angeregte Ablösungserscheinungen.

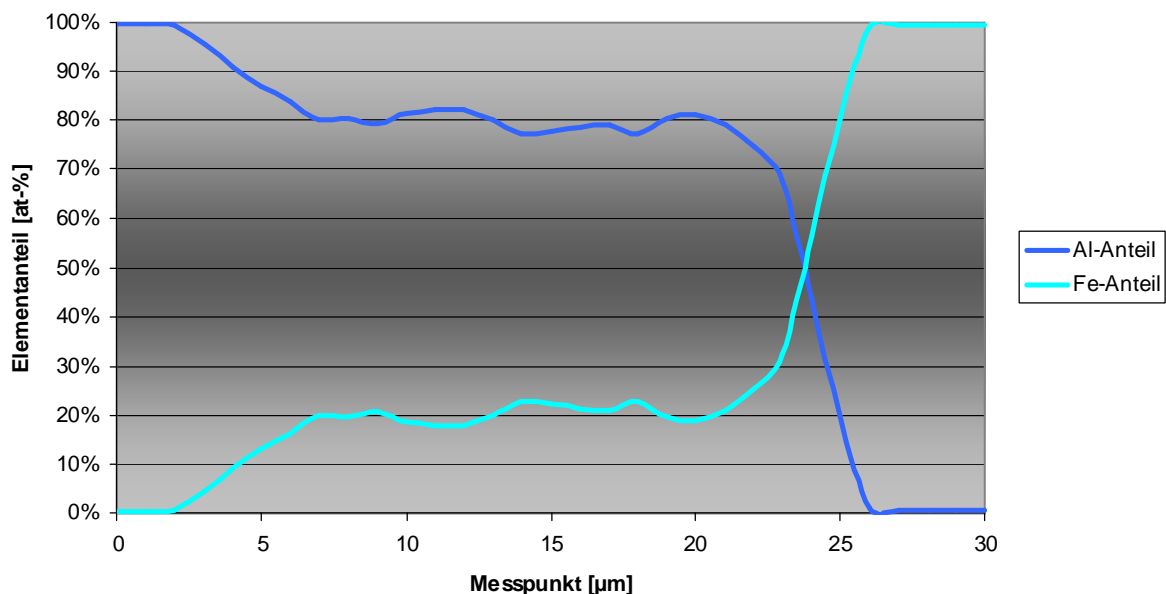


©LZH

Abbildung 43: REM-Untersuchungen an einer ZnAl15-Lötung

Anhand eines EDX-Linescans im Bereich des Phasensaums wurde die genaue Zusammensetzung des Phasensaums analysiert. Entlang einer Geraden aus dem Stahlgrundwerkstoff über die Diffusionszone in das Lot hinein wurden Messwerte ermittelt. Diese geben Aufschluss über die Elementverteilung von Eisen und Aluminium, welche anschließend ins Verhältnis gesetzt werden. Hierdurch kann eine Aussage über die vorhandenen Phasensaumstrukturen getroffen werden. Der Verlauf des EDX-Scans ist in Abbildung 44 dargestellt und umfasst den Bereich an der Stirnkante des Stahlblechs bis ins Lot. Aufgrund der Zusammensetzung von einem Verhältnis von ca. 78 % Aluminium zu 22 % Eisen kann in erster Näherung auf FeAl_3 geschlossen werden. Das deckt sich mit den Erkenntnissen aus /117/ und /118/, wonach die am häufigsten detektierten Phasenstrukturen die FeAl_3 (25 % - 75 %) und die Fe_2Al_5 -Phasen (28,5 % - 71,5 %) sind. Es wurde beobachtet, dass

sich die Fe_2Al_5 -Phase im Bereich der stärkeren Erhitzung bildet, also im Bereich der strahlzugewandten Oberseite des Stahlblechs und nicht im Bereich der Fügezone.



©LZH

Abbildung 44: EDX-Linescan an dem Phasensaum aus Abb. 41 unten rechts

Zink-Silberlote

Zur Vermeidung der Bildung von intermetallischen Phasen wurde ein Lot auf Basis des Legierungssystems Zink-Silber eingesetzt. Hierbei kommt kein flüssiges Aluminium mit Eisen in Kontakt. Das Lot weist jedoch im Vergleich zu den Lotten auf Basis von Zink-Aluminium einen höheren Arbeitsbereich auf (ca. 520°C). Es ist somit zu untersuchen, ob sich ein reiner Lötprozess einstellen lässt.

Bei der Begutachtung der Löt Nähte konnte eine gute Verarbeitbarkeit und ein akzeptable Spaltfüllung festgestellt werden. Die Proben hielten der mechanischen Probelastung stand und ließen sich im Nahtbereich umformen.

In der Begutachtung der Schliffbilder konnte jedoch eindeutig festgestellt werden, dass es sich aufgrund der erhöhten Arbeitstemperatur des Zink-Silber-Lotes nicht um einen reinen Lötprozess handelt, sondern um einen Schweißlötprozess. Es ist deutlich zu sehen, dass das Aluminiumblech aufgrund der Hitzentwicklung durch das Laserstrahllöten in einem Bereich von 45° zur Stirnkante aufgeschmolzen ist (Abbildung 45).

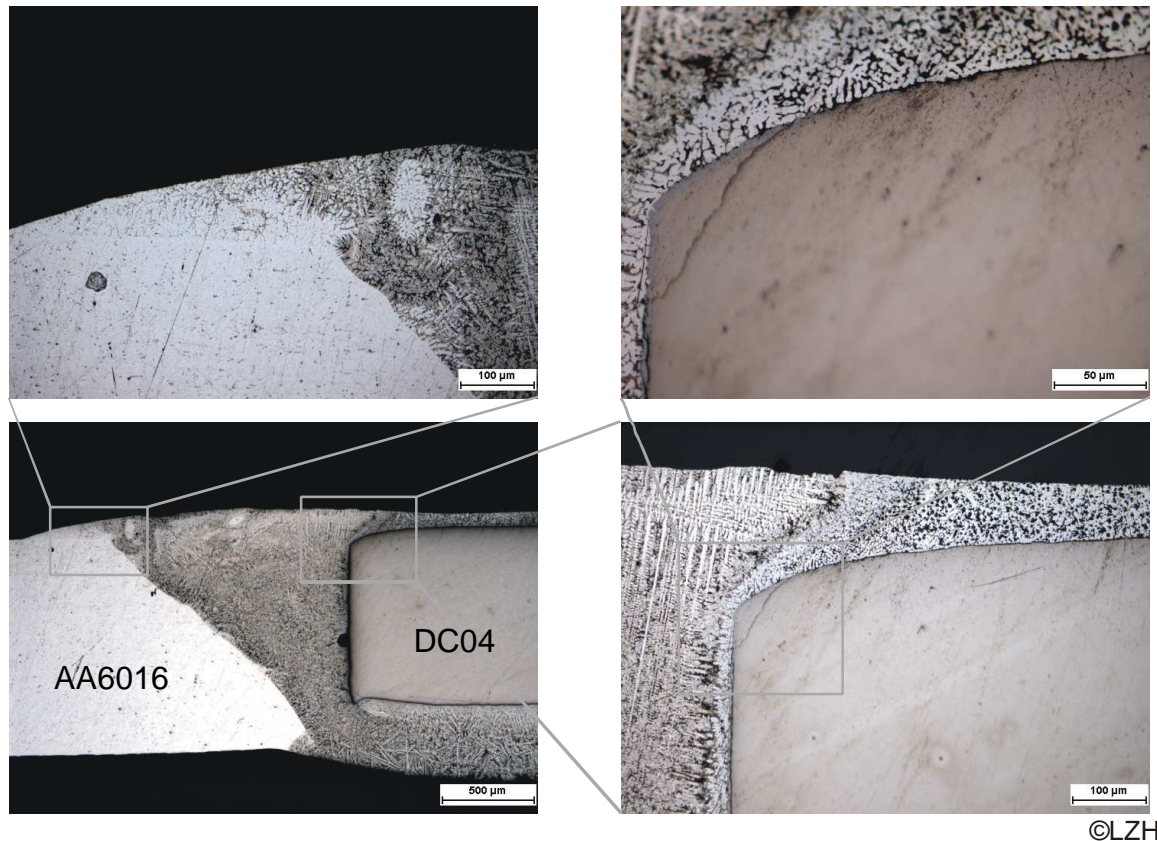


Abbildung 45: Querschliff einer Lötung mit ZnAg_{12} ($v_f = 1,5 \text{ m/min}$; $P_L = 3,6 \text{ kW}$)

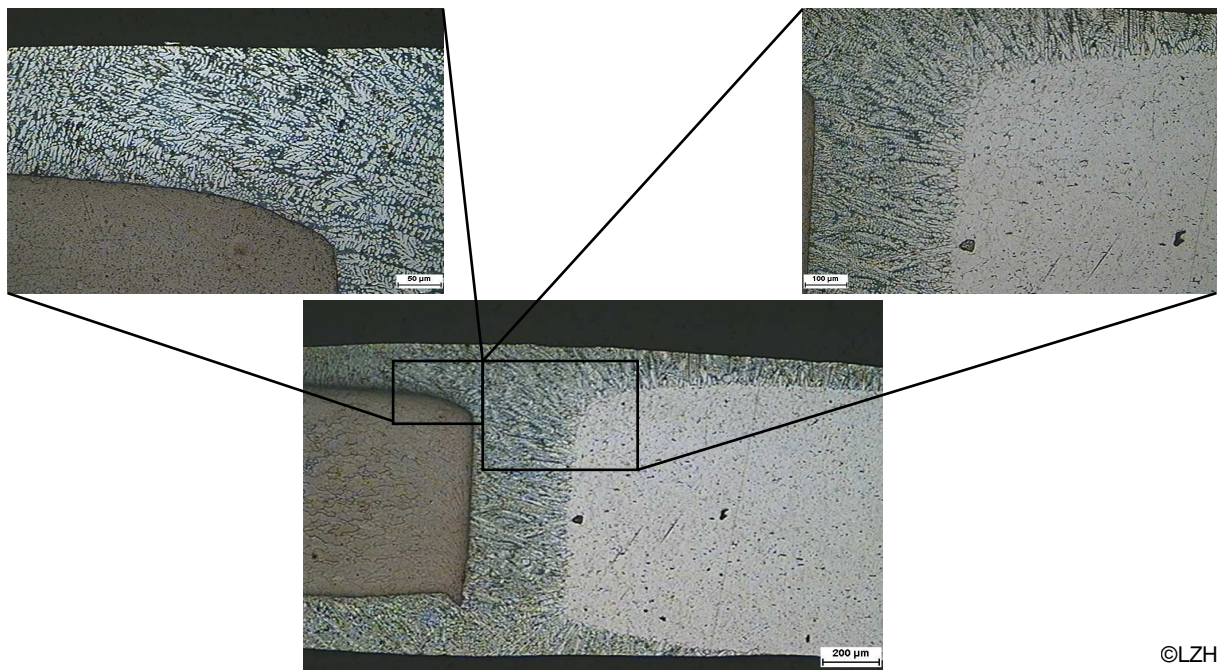
Obwohl sich dieses Lot nicht zur Herstellung gelöteter Stahl-Aluminium-Mischverbindungen eignet, kann anhand der Querschliffe in Abbildung 45 erkannt werden, dass sich kein Phasensaum auf dem Stahlblech gebildet hat. Eine Untersuchung im Zugversuch soll im Folgenden aufzeigen, ob sich diese Art der Verbindung ggf. für die Herstellung von Verbindungen eignet, die nicht umgeformt sondern nur im Einsatz belastet werden.

Aluminiumlote

Durch die Verwendung von Aluminiumbasisloten des Systems AlSi_{10+X} soll eine Steigerung der Festigkeit der Verbindung angestrebt werden, ohne ein Anschmelzen der Grundwerkstoffe herbeizuführen. Hierfür wurden Lotmuster eines 4-elementigen Lotsystems ($\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,3}\text{Ag}_{3,7} - 86/10$) und eines 5-elementigen ($\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{6}\text{Sn}_{2}\text{Mg}_{0,5} - 82/10$) Lotsystems verwendet, welche sich durch Arbeitstemperaturen unterhalb derer von AlSi_{12} auszeichnen und somit für das Laserstrahllöten als geeignet eingestuft werden können. Das Lotsystem 86/10 zeichnet sich durch ein geringes Schmelzintervall aus, welches bei ca. 555°C liegt. Dieses Lot sollte sich durch gute Fließigenschaften auszeichnen. Bei der Legierung 82/10 ist das Schmelzintervall ca. 60°C groß, wobei es bei 503°C beginnt. Es ist

somit von einem schlechteren Fließen des Lotes auszugehen, da ein langsames Übergehen von der festen in die flüssige Phase zu erwarten ist. Der Prozess sollte jedoch hinsichtlich Überhitzung und damit Anschmelzung des Grundwerkstoffes unempfindlicher sein, da die Prozessparameter mehr Schwankungen erlauben.

Bei den Fügeversuchen mit dem Lot 86/10 wurden Löt Nähte hergestellt, die ein gleichmäßiges Umfließen des Werkstoffes aufweisen und damit auf eine gute Benetzung der Grundwerkstoffe hindeuten. Bei der Analyse der Verbindungseigenschaften wurde in den Querschliffen eine deutliche Trennung des Lotes und der Grundwerkstoffe detektiert. Es kam nicht zu einer Anschmelzung der Grundwerkstoffe. Deutlich ist die Erstarrungsrichtung des Aluminiumlotes vom Aluminiumgrundwerkstoff in die Fügezone hinein zu erkennen. Der Wärmeabtransport durch das Aluminiumblech scheint deutlich größer zu sein, als durch das Stahlblech. Dadurch ist das dendritische Erstarren des Lotwerkstoffes auf der Al-Seite zu erklären. In Abbildung 46 ist ein Querschliff einer Fügestelle zu sehen, die keinen Phasensaum aufweist.



©LZH

Abbildung 46: Schliffbild einer Lötprobe mit AlSi10Cu6Sn2Mg0,5 ($v_f = 2 \text{ m/min}$; $P_L = 3,2 \text{ kW}$)

Bei einer Analyse der Stahlblechoberseite und der Stoßkante im Kontaktbereich mit dem Lot ließ sich kein Phasensaum feststellen. Somit wird keine Auswirkung auf die resultierenden Festigkeiten erwartet. Trotz des höheren Aluminiumanteils in der Schmelze, der für die Bildung der energetisch günstigen Phasensäume vorhanden

ist, bilden sich diese nicht wie bei den Zinkloten aus. Es ist zu untersuchen, ob die Komplexität des Legierungssystems des Lotes einen Einfluss auf die Phasensaumbildung hat. Der in Abbildung 47 dargestellte Phasensaum hat eine Dicke von ca. 1 μm .

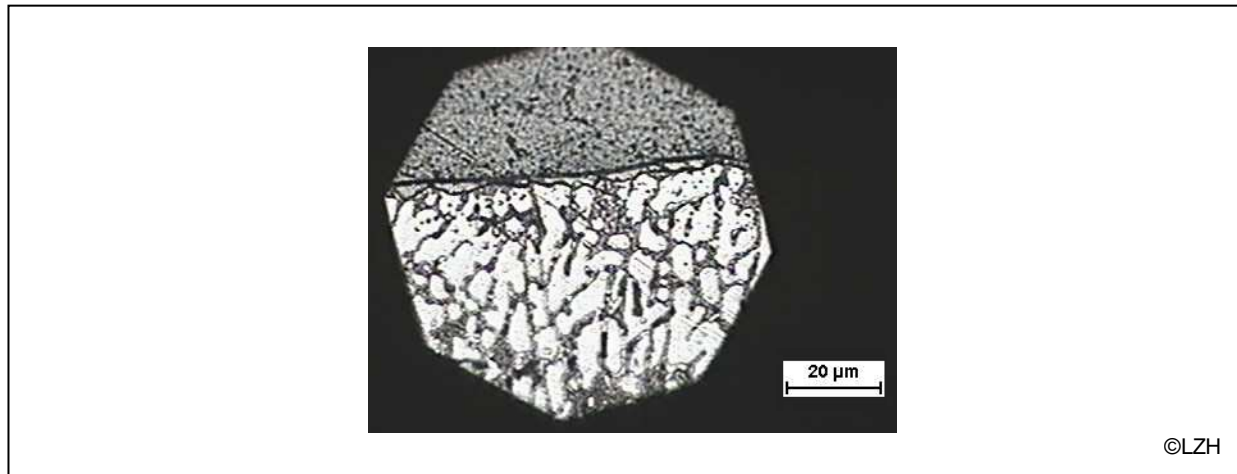


Abbildung 47: Phasensaum zwischen Lot und Stahl oberseite (oben DC04; unten AlSi10Cu6Sn2Mg0,5)

Bei den Laserlötungen mit dem Lot 82/10 wurden ebenfalls Lötungen durchgeführt, die auf eine gute Benetzung hindeuteten, die sich aber während des Prozesses durch eine stärkeres Prozessleuchten aufgrund der höheren Arbeitstemperatur von den Lötungen mit dem Lot 86/10 unterscheiden. Die visuelle Begutachtung deutet im Bereich der Unterseite des Bleches auf ein Anschmelzen der Grundwerkstoffe hin. Im Querschliff konnte eine deutliche Verschmelzung des Lotes mit dem Aluminiumgrundwerkstoff festgestellt werden. Durch diese Verschmelzung kommt es zu einer Veränderung des Legierungssystems des Lotes und damit auch zu einem Umschmelzen des Aluminiumgrundwerkstoffes im Bereich der Fügezone.

Im Schliffbild in Abbildung 48 ist die Vermischung der Grund- und Zusatzwerkstoffe gut zu erkennen. Durch die Überhitzung während des Fügeprozesses kommt es zu einem turbulenten Vermischen des verflüssigten Grundwerkstoffes und dem Lotwerkstoff, der in einem primären Gussgefüge erstarrt.

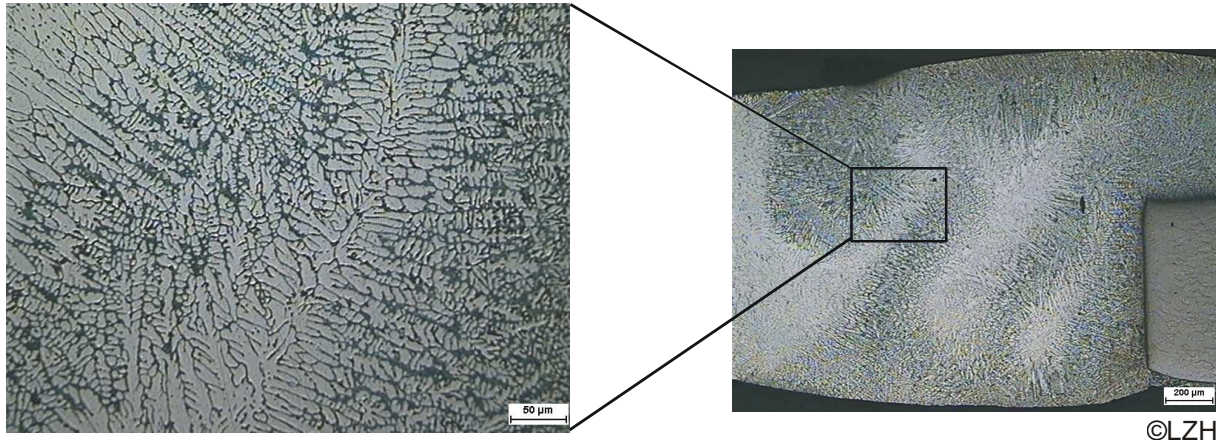


Abbildung 48: Schlichtbild einer Probe mit AISi10Cu1,3Ag3,7 ($v_f = 1,5 \text{ m/min}$; $P_L = 3,4 \text{ kW}$)

Es ist jedoch anzumerken, dass auch bei dieser hohen Prozesstemperatur, die zum Anschmelzen des Aluminiumgrundwerkstoffes ausreichte, und es nicht zur Bildung intermetallischer Phasen gekommen ist. Das deutet darauf hin, dass die Elemente in den Lotlegierungen zu einer Phasensaumbeeinflussung führen.

7.5 Zugversuche zur Bestimmung der maximalen Kraftaufnahme

Für die Verifizierung der maximalen Kraftaufnahme der Lötproben wurden Zugversuche nach DIN EN 10 002 durchgeführt, hierfür wurden Blechplatinen mit einer Lötnahtlänge von 300 mm gelötet. Aus diesen Platinen wurden nach visueller Begutachtung mittels Laserstrahlschneiden Probenkörper herausgetrennt, um diese anschließend durch mechanische Bearbeitung auf die exakte Normgröße zu bringen. Diese mechanische Nachbearbeitung erfolgt, um die durch das Laserstrahlschneiden rauhe Kante kerbfrei zu gestalten. In einer Zugprüfmaschine MTS 810 der Firma MTS wurde die kerbfreie Probe auf Zug belastet, bis ein Versagen eintritt. Zum Zeitpunkt des Versagens wird die maximale Kraft, die von der Maschine aufgebracht wurde, im Speicher abgelegt. Mittels dieser Kraft kann über den Querschnitt der Versuchsprobe die Spannung ermittelt werden, die von dieser Probe bis zum Versagen ertragen wurde.

Durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Grundwerkstoffen (Aluminium und Stahl), welche sich in den Materialdicken unterscheiden, ist es notwendig, eine Bezugsgröße für die Spannung festzulegen. Die Kraft kann auf den Querschnitt des Stahlblechs (20 mm x 1 mm) oder auf den des Aluminiumblechs (20 mm x 1,15 mm)

bezogen werden. Diese Darstellung mit Bezug auf beide Querschnitte ermöglicht einen einfacheren Vergleich mit Ergebnissen aus der im Stand der Technik.

Die Zugversuche wurden für die verschiedenen Lotlegierungen durchgeführt, um eine Auswirkung der unterschiedlichen Legierungssysteme und der damit einhergehenden Temperaturführung auf die resultierende Festigkeit genau zu verifizieren. In Kombination mit den vorangegangenen metallographischen Untersuchungen können Rückschlüsse auf die Eignung der Lotlegierungen für die Herstellung von hybriden Platinen und deren Umformvermögen gezogen werden.

In einer ersten Versuchsreihe wurden Zinklote der Legierung ZnAl₂ und ZnAl₄ untersucht, da diese aufgrund ihrer geringen Arbeitstemperatur (ca. 400°C) die Herstellung von reinen Lötverbindungen ermöglichen.

Diese Lote zeigten schon bei der Verarbeitung einen gleichmäßigen Lötprozess, der auch im metallographischen Schliff bestätigt werden konnte. Durch diesen gleichmäßigen Prozess und die Arbeitstemperatur, die deutlich unterhalb der Schmelztemperatur des Aluminiums liegt, können gezielt optimale Nahtquerschnitte eingestellt werden. Dieses zeigt sich in den Ergebnissen der Zugversuche, die alle auf einem ähnlichen Niveau bei ca. 70 % der Festigkeit des schwächeren Grundwerkstoffes liegen. Es sind keine deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Lotsystemen zu erkennen (siehe Abbildung 49).

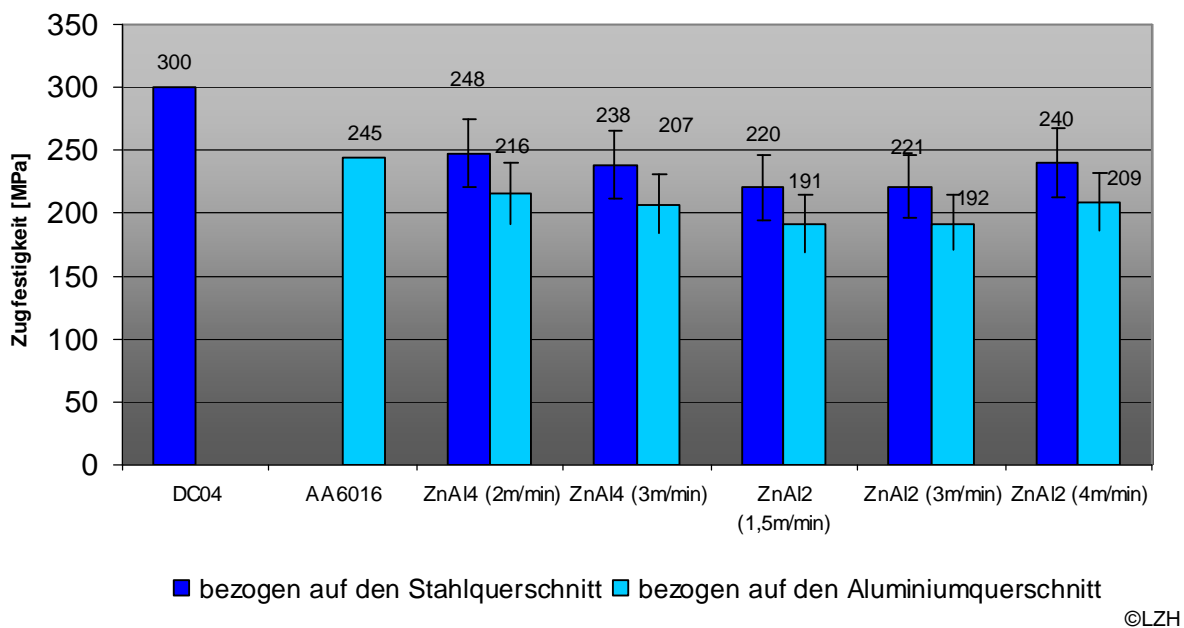
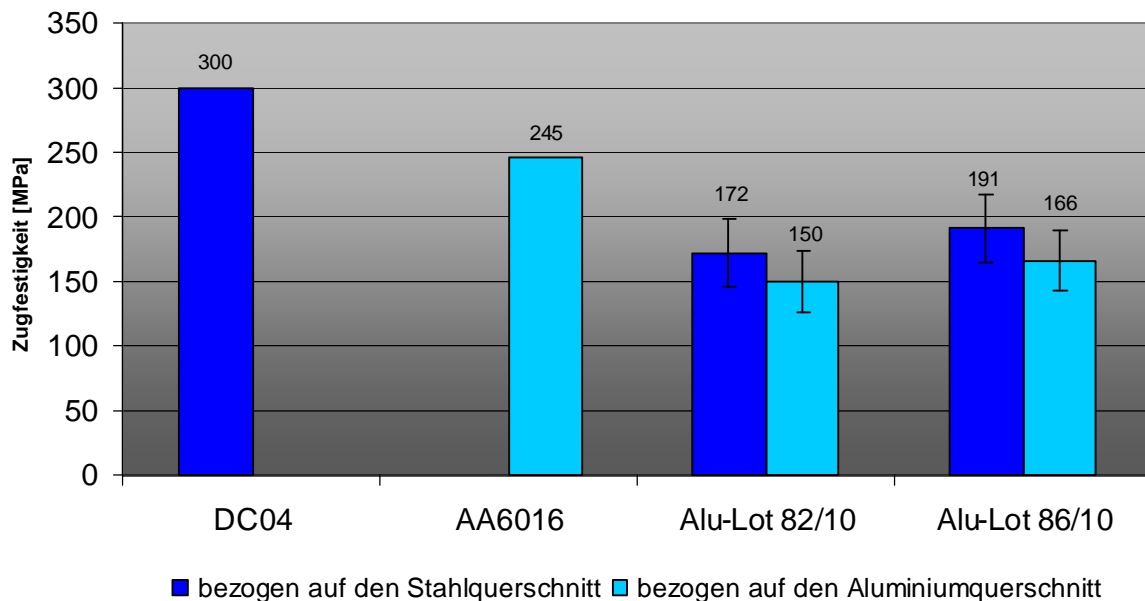


Abbildung 49: Übersicht der Ergebnisse der Zugfestigkeiten bei Verwendung von Zinkloten

Lediglich die Streuung der Festigkeitswerte ist auffällig. Hier kommt es zu einer Erhöhung der Streuung bei Lötungen mit ZnAl₂ Loten und geringerer Geschwindigkeit, diese ist auf die Robustheit des Prozesses bei geringeren Geschwindigkeiten zurückzuführen. Kommt es zu geringen Störungen im Prozessablauf, so sind diese optisch bei einer Kontrolle der Proben nicht zu detektieren und werden nicht als fehlerhaft erkannt. Bei hohen Prozessgeschwindigkeiten kommt es durch kleine Störungen im Prozessverlauf zu visuell detektierbaren Fehlstellen, die zur Entfernung der Platinen aus der Gesamtheit der Proben führt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die modifizierten Aluminiumlote hinsichtlich ihrer Festigkeit untersucht. Da Aluminium bei diesen Loten das Hauptlegierungselement bildet, ist von einer guten Kraftaufnahme auszugehen, welche durch die - im Vergleich zu zweielementigen Zinkloten - hohe Elementanzahl reduziert werden könnte.

Die Zugversuche zeigen deutlich, dass die Verbindungen mit den Aluminiumloten nur ca. 50% der Zugfestigkeiten des schwächeren Grundwerkstoffes aufweisen. Dieses zeigt nicht die erwartete Festigkeitssteigerung durch die Verwendung der AlSi10+X Lot. Die Absenkung der Arbeitstemperatur ist bei der Entwicklung dieser Lote gelungen, jedoch reicht diese noch nicht aus, um einen reinen Lötprozess für das Laserstrahllöten einzustellen. Somit kommt es gerade bei dem Aluminiumlot 86/10 aufgrund der hohen Arbeitstemperatur zu einer An- bzw. Verschmelzung des Aluminiumgrundwerkstoffes mit dem Lot. Durch den engen Schmelzbereich kommt es zu einem guten Verschießen des Lotes, was zu einer guten Benetzung der Spaltinnenseiten führt. Hingegen zeigt das Lot 82/10, welches über einen größeren Schmelzbereich von ca. 50°C verfügt, auch im Prozess schon ein teigiges Fließen, was zu einer verschlechterten Benetzung im Spaltbereich und damit zu einer reduzierten Festigkeit führt. In Abbildung 50 ist die Übersicht der Ergebnisse der Zugversuche mit Aluminiumloten zusehen.



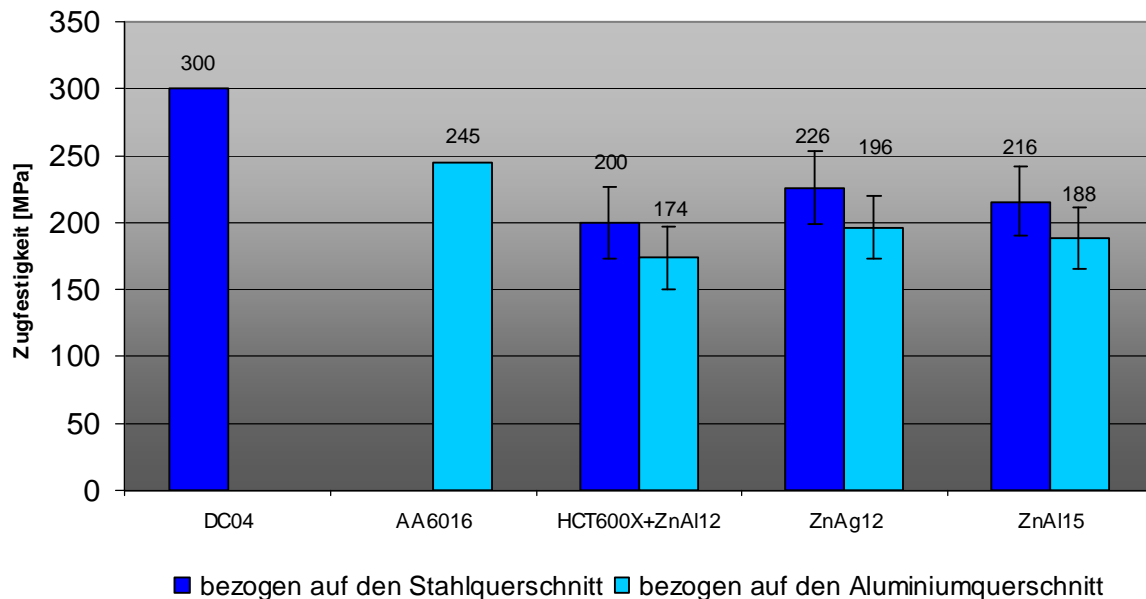
©LZH

Abbildung 50: Übersicht der Ergebnisse der Zugfestigkeiten bei Verwendung von modifizierten Aluminiumloten

Im Vergleich der beiden Lotlegierungen mit den Basiselementen Zink und Aluminium lässt sich erkennen, dass die Platinen mit Aluminiumloten auf einem niedrigeren Niveau der Zugfestigkeiten liegen als die mit Zinkloten hergestellten Platinen. Das mehrelementige Aluminium-Silizium-Basislot zeigte eine verringerte Kraftaufnahmemöglichkeit aufgrund seiner herabgestuften Duktilität durch die komplexere Gitterstruktur. Auch die oben nachgewiesene Eingrenzung des Prozessfensters oder die Möglichkeit, dass nur ein Schweißlötprozess eingestellt werden konnte, zeigt deutlich, dass diese Lotlegierungen für die Herstellung von hybriden Verbindungen genutzt werden können. Die zu erzielenden Festigkeiten sind aber geringer als bei der Verwendung von Zink-Aluminiumloten.

Des Weiteren wurden Zugversuche mit Lotlegierungen, bei denen teilweise kein reiner Lötprozess sondern nur ein Schweißlötprozess eingestellt werden konnte, vorgenommen. Hierfür kamen Zink-Silber-Lote und ein Zink-Aluminiumlot mit 15 m% Aluminium zum Einsatz. Um erste Aussagen über die Übertragbarkeit auf einen anderen Stahlwerkstoff zu testen, wurden Lötungen an einem Dualphasenstahl HCT600X vorgenommen. Die Lötungen erwiesen sich als durchführbar, wiesen aber im Vergleich zu den übrigen Lötungen mit DC04 keine deutliche Festigkeitssteigerung auf. Hier ist der limitierende Faktor die Fügeverbindung und der Aluminiumgrundwerkstoff. Bei den anderen Fügeverbindungen zeigen sich

Festigkeitswerte auf ähnlichem Niveau, die aber im Vergleich zu den Festigkeiten mit ZnAl2 und ZnAl4 geringere Werte aufweisen (siehe Abbildung 51).



©LZH

Abbildung 51: Übersicht Zugversuche mit verschiedenen Lotlegierungen

Die Streuung der einzelnen Zugversuchsproben zeigt ein einheitliches Muster, welches für eine Untersuchung im Labor als hinnehmbar eingestuft wurde. Durch die aufwendige händische Spannung der Bauteile und der teilweise notwendigen Neujustage der Drahtposition kommt es zu einer leichten Variation des Prozesses und damit einhergehend zu einem Verschieben der maximalen Zugfestigkeit in einem Toleranzfenster. Es ist davon auszugehen, dass bei einer industriellen Applikation eine deutliche Verringerung der Streuung der Ergebnisse erzielt werden kann. Eine Optimierung der Medienzuführung sollte weitere Prozessstabilität mit sich bringen.

Grundlegend ist festzuhalten, dass durch die Variation der Vorschubgeschwindigkeiten bei gleichen Lotwerkstoffen keine signifikanten Veränderungen bei den erreichten Zugfestigkeiten detektierbar waren. Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten wurde eine Verengung des Toleranzbandes festgestellt, welches auf das kleinere Prozessfenster zurückzuführen ist. Dieses kleine Prozessfenster bewirkt bei minimalen Störungen im Prozessverlauf das optische Erkennen von Fehlstellen durch den Anlagenbediener, der sofort eine Anpassung des Prozesses vornehmen kann. Der robustere Prozess ist hinsichtlich seiner Ausbringung deutlich besser, weist aber eine höhere Streuung auf. In Abbildung 52 ist eine Gesamtübersicht der ermittelten Zugfestigkeiten dargestellt.

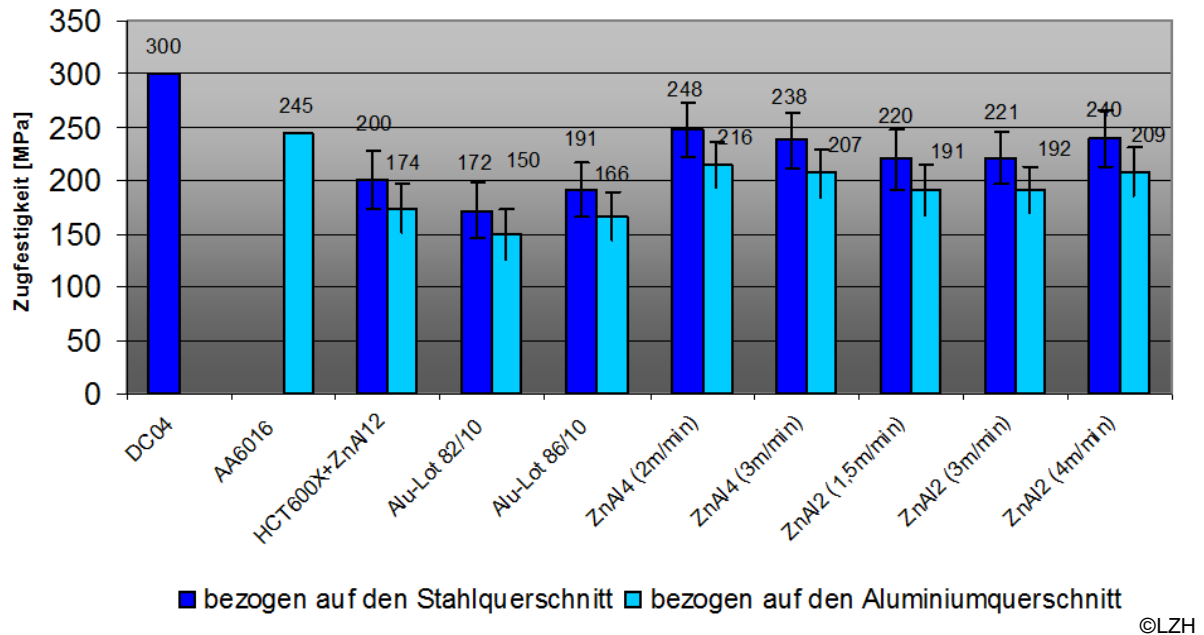


Abbildung 52: Gesamtübersicht der Zugversuche zum Vergleich der Auswirkung der verschiedenen Lotlegierungen und Vorschubgeschwindigkeiten

Eine genaue Auswertung der Bruchflächen soll Aufschluss über das Versagensverhalten der Zugversuchsproben geben. Hierfür wurden die getesteten Proben hinsichtlich ihrer Bruchflächen charakterisiert und einer Analyse unterzogen. Durch diese Analyse der Bruchflächen konnten zwei unterschiedliche Brucharten, die bei den gleichen Lötparametern auftraten, qualifiziert werden, die sich im Erscheinungsbild signifikant unterscheiden. Die Entstehung dieser beiden unterschiedlichen Bruchbilder deutet auf variierende thermische Zustände während des Laserstrahl-lötprozesses hin. Hierbei kann es zu unterschiedlichen Einkoppelbedingungen während des Prozesses gekommen sein, da die Zuführung der Medien (Lot und Flussmittel) im Versuchsstand nicht den einer Serienfertigung entsprechen.

Das erste der beiden Bruchbilder weist ein Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone des Aluminiumblechs auf (siehe Abbildung 53). Deutlich ist zu erkennen, dass im oberen Bereich des Lötspaltes ein Versagen durch den Grundwerkstoff hin zum Lot beginnt. Im weiteren Verlauf des Bruches tritt ein Versagen entlang des Lotes auf. Bei einer Vergrößerung des unteren Versagensbereiches sind Reste des Aluminiumwerkstoffes, die am Lot anhaften, zu detektieren. Diese wurden durch eine EDX-Analyse als Grundwerkstoff des

Aluminiumblechs charakterisiert. Somit sind diese Brucharten als ein Versagen im Grundwerkstoff bzw. der Wärmeeinflusszone zu klassifizieren.

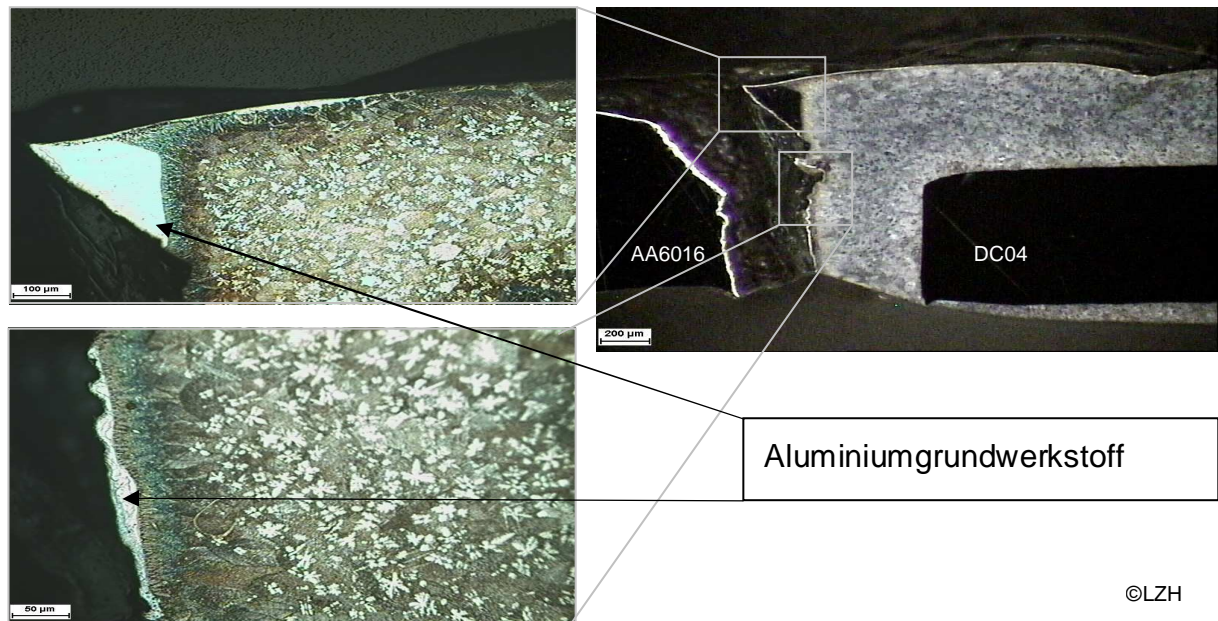


Abbildung 53: Analyse der Bruchflächen an der Versagensart 1 ($v_f = 3$ m/min; $P_L = 3,1$ kW, Lotwerkstoff: ZnAl2)

Das zweite Bruchbild zeigt einen glatten Bruch entlang der Stahlkante und dem Lot. Auffällig ist jedoch, dass im Bereich der Lötnahtoberraupe ein rauhes Bruchbild zu erkennen ist. Dieses deutet auf ein Versagen entlang der Korngrenzen hin. Bei einer genaueren Analyse der Bruchflächen wurden geringste Anhaftungen von intermetallischen Phasensäumen am Lot detektiert. Der Bruch wurde durch die geringere Dehnung der intermetallischen Phasen eingeleitet, wobei sich diese von der zinkfreien Stahlstirnseite lösen (siehe Abbildung 54).

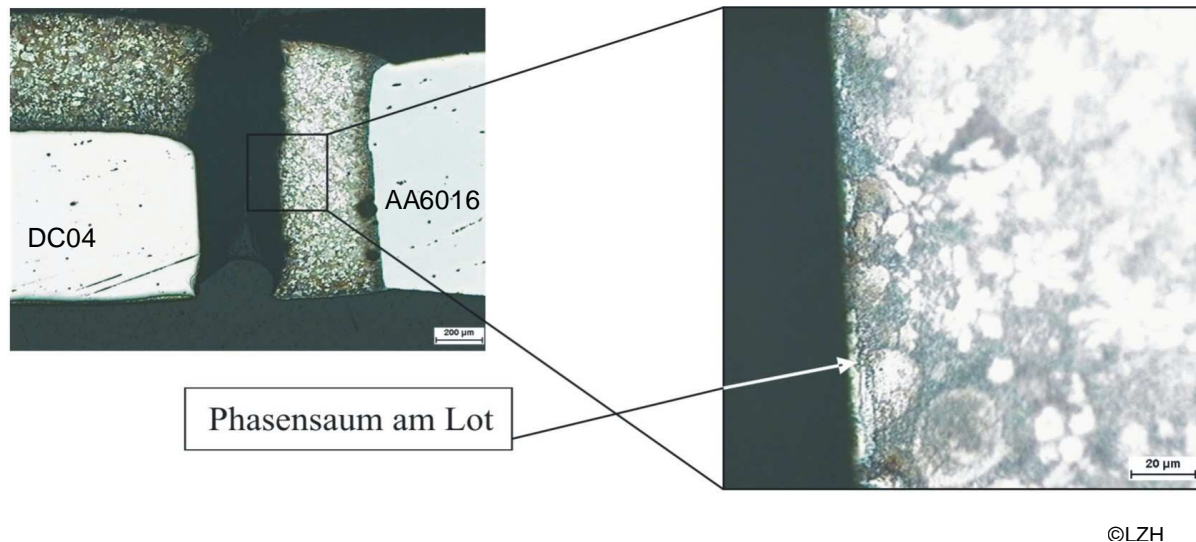


Abbildung 54: Analyse der Bruchflächen an Versagensart 2 ($v_f = 3 \text{ m/min}$; $P_L = 3,1 \text{ kW}$, Lotwerkstoff: ZnAl2)

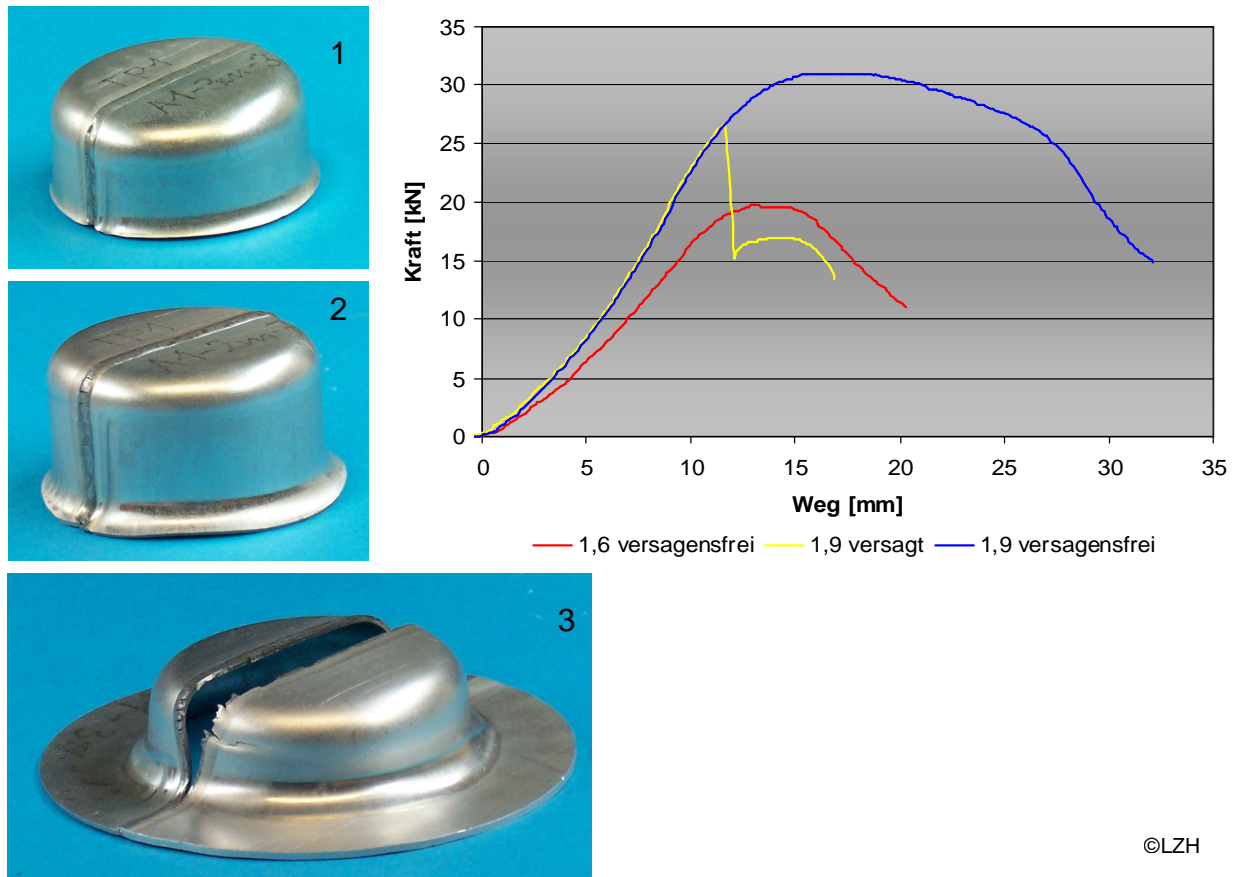
Diese Versagensart kann mit der in der metallurgischen Untersuchung detektierten Struktur erklärt werden. Durch das Verändern der Morphologie, das Ablösen und Hineinwandern in das Lot entstehen Schwachstellen im Bereich der Stoßkante des Stahlblechs. Diese sind als metallurgische Kerben zu werten, welche einen behinderten Kraftfluss im Bereich des Phasensaums zur Folge haben. Es ist jedoch festzustellen, dass sich die beiden Brucharten in ihrer erreichten Festigkeit nicht signifikant unterscheiden. Der Laserstrahlötprozess kann somit hinsichtlich der zu erzielenden Festigkeiten als robust gegenüber leichten thermischen Prozessschwankungen eingestuft werden. Somit ist nachgewiesen, dass hinsichtlich der statischen Festigkeit ein Phasensaum in geringer Ausprägung ($<7 \mu\text{m}$) toleriert werden kann und nicht zu Festigkeitseinbußen führt. Hierzu werden im Folgenden Untersuchungen zur Duktilität der Löt Nähte vorgenommen, um die Umformeigenschaften der hergestellten hybriden Platinen genauer zu qualifizieren.

7.6 Bestimmung des Tiefziehverhältnisses

Für die Herstellung von Tailored Hybrid Blanks ist die Umformbarkeit der gefügten Platine ein wichtiges Kriterium zur Bewertung des mechanisch-technologischen Eigenschaften. Um diese Eigenschaften genauer zu charakterisieren, wurden Tiefziehprüfungen in Anlehnung an den Nöpfchenversuch nach Swift durchgeführt, welche häufig zum Vergleich von Werkstoffchargen herangezogen werden.

Zur Untersuchung der maximalen Tiefziehverhältnisse der gelöteten Proben wurden aus Blechplatten, die aus AA6016 und DC04 mit unterschiedlichen Lotlegierungen gelötet wurden, Ronden angefertigt. Mit diesen Ronden wurden Tiefziehversuche in Anlehnung an den Näpfchenversuch nach Swift (s.o.) durchgeführt. Es wurden Untersuchungen mit Rondendurchmesser $B = 80$ mm für das Tiefziehverhältnis $\beta = 1,6$ und mit $B = 95$ mm für $\beta = 1,9$ durchgeführt. Die Ronden werden mit einem hydraulischen Stempel mit einem Stempelradius von 10 mm in eine Matrize gedrückt und der Kraft-Weg-Verlauf wird aufgezeichnet.

Die Ronden, die mit Zinkloten (ZnAl₂) hergestellt wurden, konnten sowohl mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,6$ als auch mit $\beta = 1,9$ versagensfrei tiefgezogen werden. Sie zeichnen sich durch eine Kraftaufnahme von ca. 20 kN bei $\beta = 1,6$ und von ca. 31 kN bei $\beta = 1,9$ aus. Bei einigen Proben mit dem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$ kommt es zum Versagen der Proben bei den Umformversuchen. Dieses Versagen zeichnet sich durch einen charakteristischen Abfall des Kraft-Weg-Verlaufs bei Erreichen der Berstkraft aus. In der in Abbildung 55 dargestellten Probe 3 liegt diese Berstkraft bei ca. 25 kN. Durch das Aufreißen der Probe im Napfboden kommt es zu einem sprunghaften Abfall der benötigten Kraft, da während des Aufreißen der Probe kaum Kraft aufgenommen werden kann. Nach dem charakteristischen Kraftabfall wird die Presse angehalten, so dass nicht der gesamte benötigte Tiefziehweg ausgefahren wird.



©LZH

Abbildung 55: Fotos und Kraft-Weg-Verlauf von Tiefziehproben mit ZnAl₂-Loten ($v_f = 3$ m/min; $P_L = 2,8$ kW)

Die Kraft-Weg-Verläufe bei den Ronden, die mit Aluminiumbasisloten hergestellt wurden, weisen den gleichen charakteristischen Verlauf auf wie die Zinklotproben. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Aluminiumlotproben nicht mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$ versagensfrei tiefgezogen werden konnten. Die Komplexität der Gitterstruktur der 4- bzw. 5-elementigen Lotlegierungen lassen eine Umformung in diesem Bereich nicht mehr zu. Deutlich zeichnen sich Querrisse auf der Lotoberseite der umgeformten Proben ab, die auf eine mangelnde Duktilität des Lotes hindeuten.

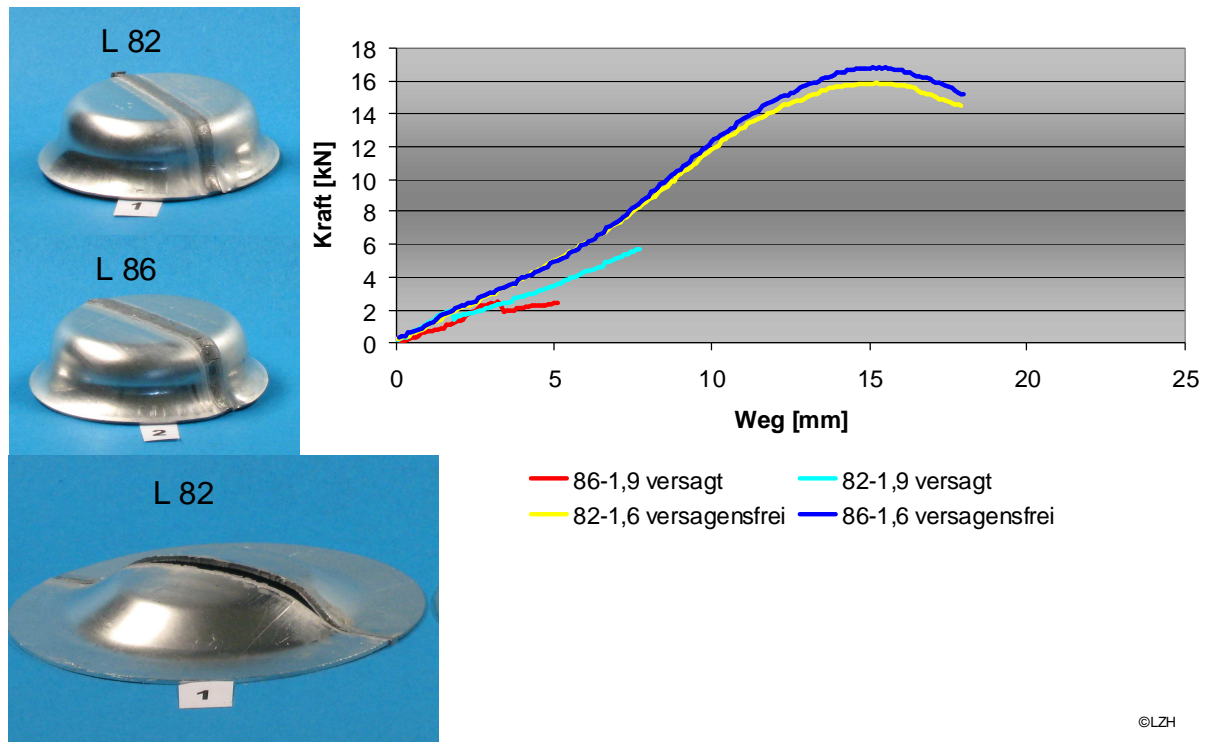
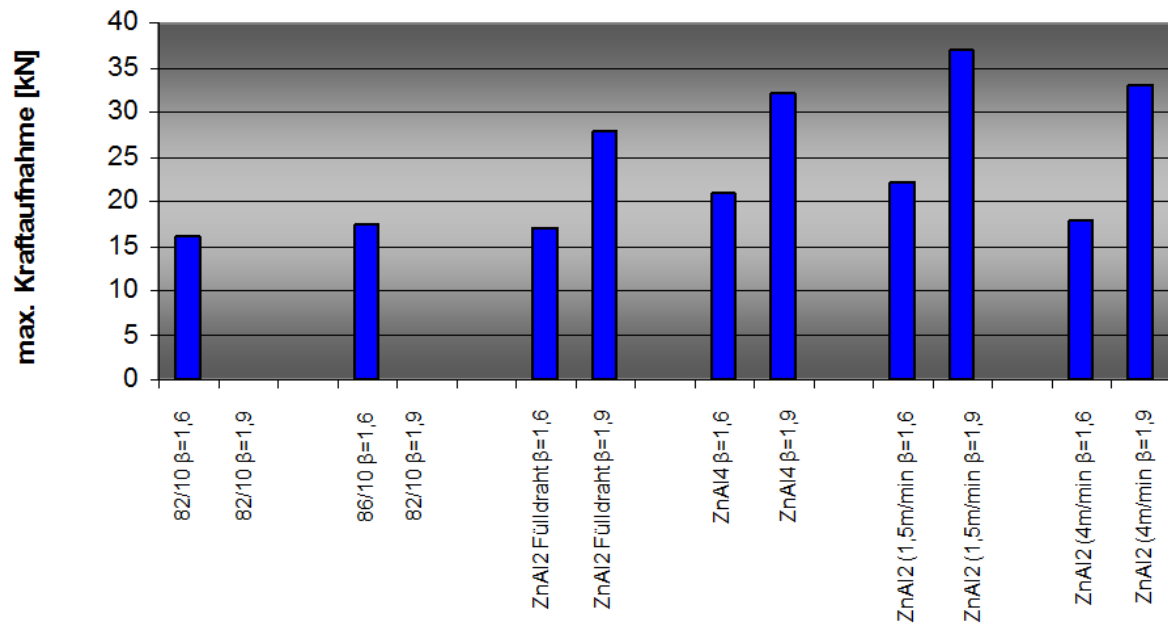


Abbildung 56: Fotos und Kraft-Weg-Verlauf von Tiefziehproben mit Aluminiumloten ($v_f = 2 \text{ m/min}$; $P_L = 3,2 \text{ kW}$)

Die Analyse der maximalen Kraftaufnahme der Proben ergab, dass die Proben, welche mit Aluminiumloten gelötet wurden, auf einem deutlich niedrigeren Kraftniveau liegen als die Proben, die mit Zinkloten hergestellt wurden. Die Aluminiumlotproben weisen eine Kraftaufnahme von 15 bis 16 kN bei einem $\beta = 1,6$ auf, wohingegen die Zinklotproben zwischen 19 und 22 kN aufnehmen können. Dieses deutet auf eine Schwächung in den Aluminiumlotproben hin, die sich bei den versagten bzw. teilversagten Proben in Querrissen auf der Lotoberseite zeigten. Diese Querrisse weisen auf eine Reduzierung der Festigkeit der Proben hin, die sich in einem geringeren Widerstand gegenüber der Umformkraft widerspiegelt. Des Weiteren wird bei der Umstellung des Fügeprozesses vom Arbeiten mit Fülldrahtloten bis hin zu der Bearbeitung mit Flussmittelsprühauftrag in Kombination mit dem Strahlpendeln eine Steigerung der Kraftaufnahme erreicht. Durch die geänderte Prozessführung und die damit einhergehende geringere thermische Belastung der Grundwerkstoffe kommt es zu einer verbesserten Kraftaufnahme durch die Umformproben. Es zeigt sich deutlich, dass die Proben ein um ca. 25 % gestiegenes Kraftaufnahmevermögen aufweisen. In Abbildung 57 sind die maximalen Kraftaufnahmen nach den Lotlegierungen, den Prozessgeschwindigkeiten und den Ziehverhältnissen aufgezeigt.



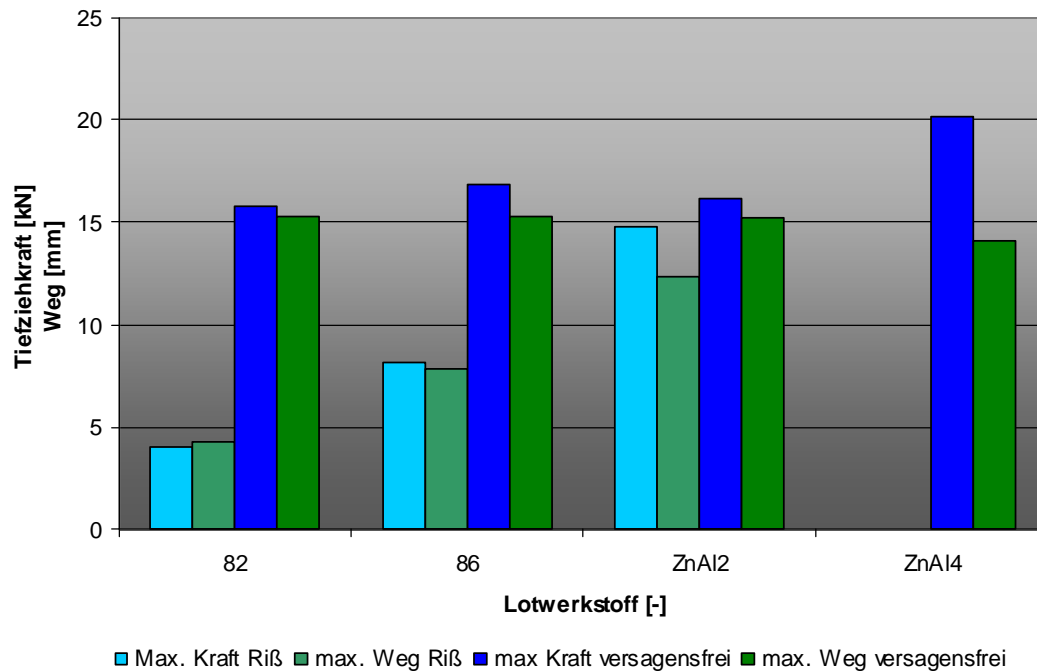
©LZH

Abbildung 57: Analyse der Kraftaufnahmen bei unterschiedlichen Loten und Vorschüben

Die Untersuchungen der Aluminiumlote ergab, dass eine Umformung nur erschwert möglich ist. Um ein vertieftes Verständnis für die Versagensmechanismen zu erlangen, wurde eine Analyse der Kraft-Weg-Verläufe vorgenommen. Hierbei wurde ein Vergleich der maximalen Wege und der Kraftaufnahmen durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass bei versagten Proben der Aluminiumlegierungen die maximale Kraftaufnahmen und auch der erreichte Tiefungsweg deutlich von den versagensfreien Proben abweichen. Dies deutet auf eine Prozessstörung oder Diskontinuität im Prozessverlauf beim Laserstrahllöten mit Aluminiumloten hin. Durch das enge Prozessfenster kann es bei minimalen Prozessschwankungen zu einer Veränderung des Lotgefüges und der Phasensaumstruktur kommen und somit zu einem verfrühten Versagen der Probe.

Die Lötproben mit Zinkloten zeigen hingegen eine ähnliche Kraftaufnahme und einen ähnlichen Tiefungsweg bei den versagten und den versagensfreien Proben. Dieses weist darauf hin, dass die Ronden bei geringeren Tiefziehverhältnissen versagensfrei hätten gezogen werden können. Die Ausbringung von Tiefziehbauteilen mit geringen Tiefziehverhältnissen wäre somit deutlich höher als bei der Bestimmung der Grenzen des Prozesses. Eine Übersicht der Kraft- und Weg-Maxima gibt Abbildung 58. Zu erwähnen ist, dass bei den Proben mit ZnAl₄-Loten (10 Stück) keine versagte Probe vorhanden war und der Vergleich somit nicht durchgeführt werden konnte. Das

Nichtauftreten von fehlerhaften Proben deutet auf eine Ausschussrate unterhalb von 10 % hin, was mit einer höheren Anzahl an Proben genauer unter Serienbedingungen untersucht werden sollte.



©LZH

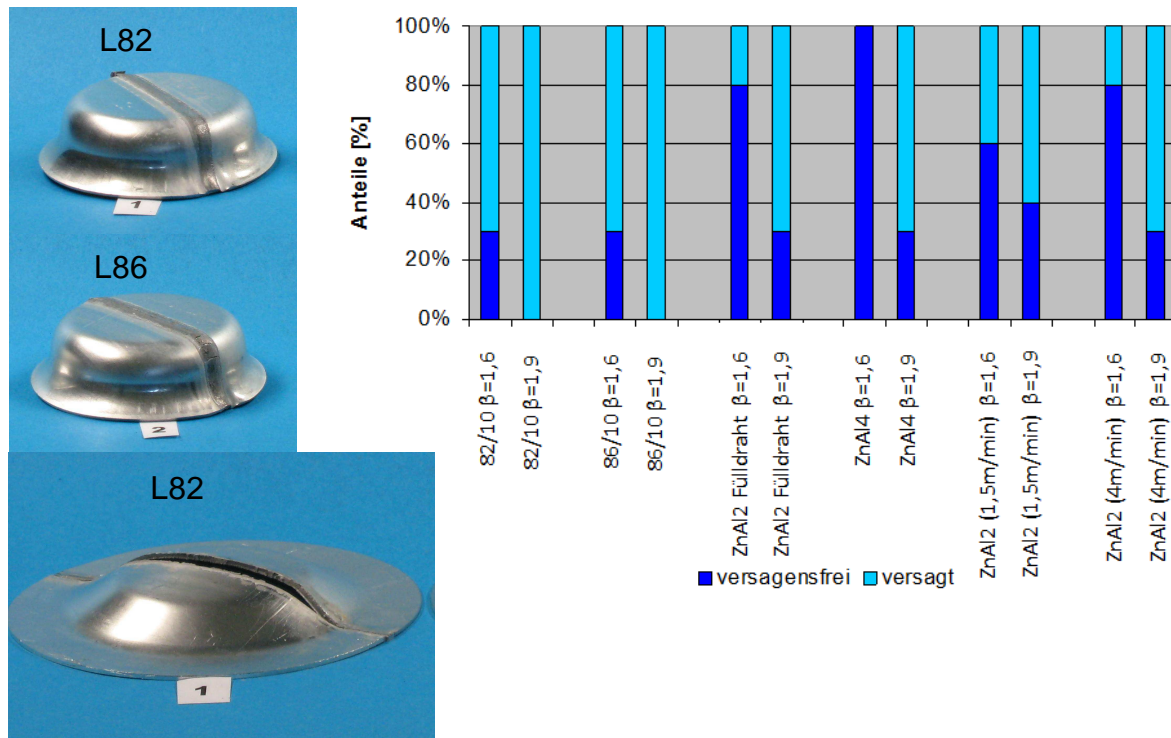
Abbildung 58: Maximalwerte der Weg- und Kraftverläufe

Abschließend zu den Untersuchungen der Tiefziehverhältnisse wurde eine Auswertung der Schadensraten vorgenommen, um erste Aussagen über die Stabilität der Prozesse unter Laborbedingungen treffen zu können. Für die Auswertung der Proben wurden Lötungen mit zwei Zink-Aluminium- und zwei Aluminium-Silizium-Loten verglichen. Zusätzlich wurde bei den Zink-Aluminiumloten noch ein Fülldrahtlot verwendet, welches im Kern das verwendete Flussmittel beinhaltet.

Es wird deutlich, dass sich die Lötungen mit den Aluminium-Silizium-Loten nur schlecht umformen lassen. So war es nicht möglich Proben mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$ herzustellen. Auch die Versuche mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,6$ zeigten, dass nur jede vierte Probe versagensfrei umgeformt werden konnte. Dieses ist auf die oben bereits erwähnte komplexe Gitterstruktur der Lotlegierung und auf die hohe Arbeitstemperatur zurückzuführen.

Unter Verwendung von Zink-Aluminium-Loten kann eine deutliche Verbesserung der Umformbarkeit festgestellt werden. Es ist möglich Proben mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$ herzustellen, wobei die beste Ausbringung im

Laborversuch mit 10 Platinen bei 40 % lag. Bei der Analysereihe mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,6$ konnten gute Ausbringungen erzielt werden. Die Ausbringungen liegen alle oberhalb von 60 %, ebenfalls bei einer Stichprobengröße von 10 Platinen. Eine Übersicht über die einzelnen Ausbringungen gibt Abbildung 59.

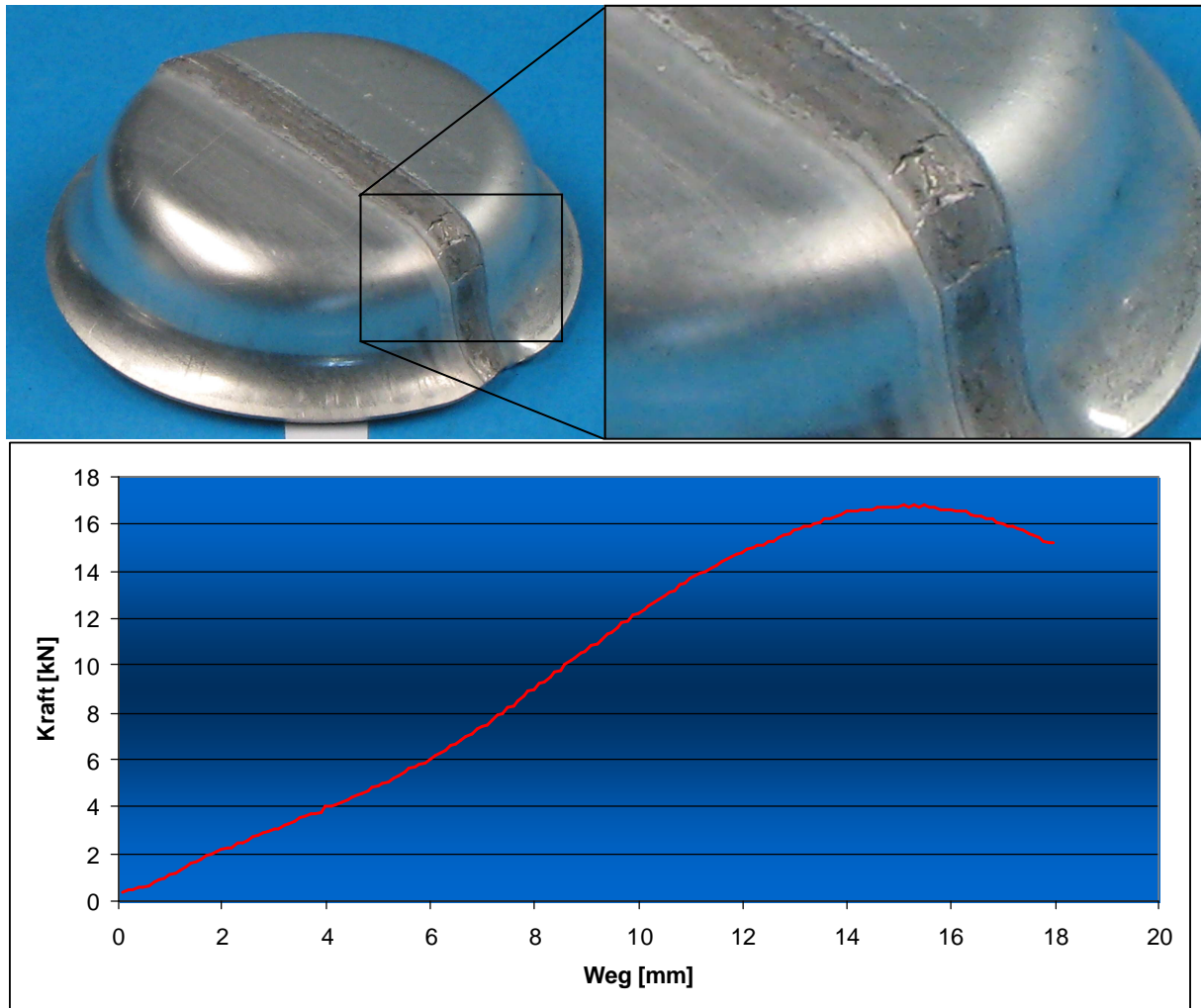


©LZH

Abbildung 59: Ausbringung von versagensfreien Proben nach Lotarten

Nach der Auswertung der Ausbringung wurde eine Analyse der Versagensmechanismen durchgeführt. In den Tiefziehuntersuchungen an laserstrahlgelöteten THBs konnten unterschiedliche Schadensfälle detektiert werden.

Ein Fehlermerkmal sind im Bereich des Ziehradius auftretende Querrisse, die auf eine geringe Duktilität des Lotwerkstoffes schließen lassen. Eine Begründung hierfür ist die Gitterstruktur des Zinkes, welche als hexagonal dichteste Packung über weniger Gleitebenen verfügt als bspw. das kubischflächenzentrierte Aluminium, was auch in /120/ als Begründung für die geringe Duktilität der Zinklotnaht angegeben wird. Im Kraft-Weg-Verlauf sind diese Querrisse im Lot nicht zu detektieren, die Umformung wird durch diese Risse also nicht signifikant hinsichtlich der Umformkräfte beeinflusst (Abbildung 60).



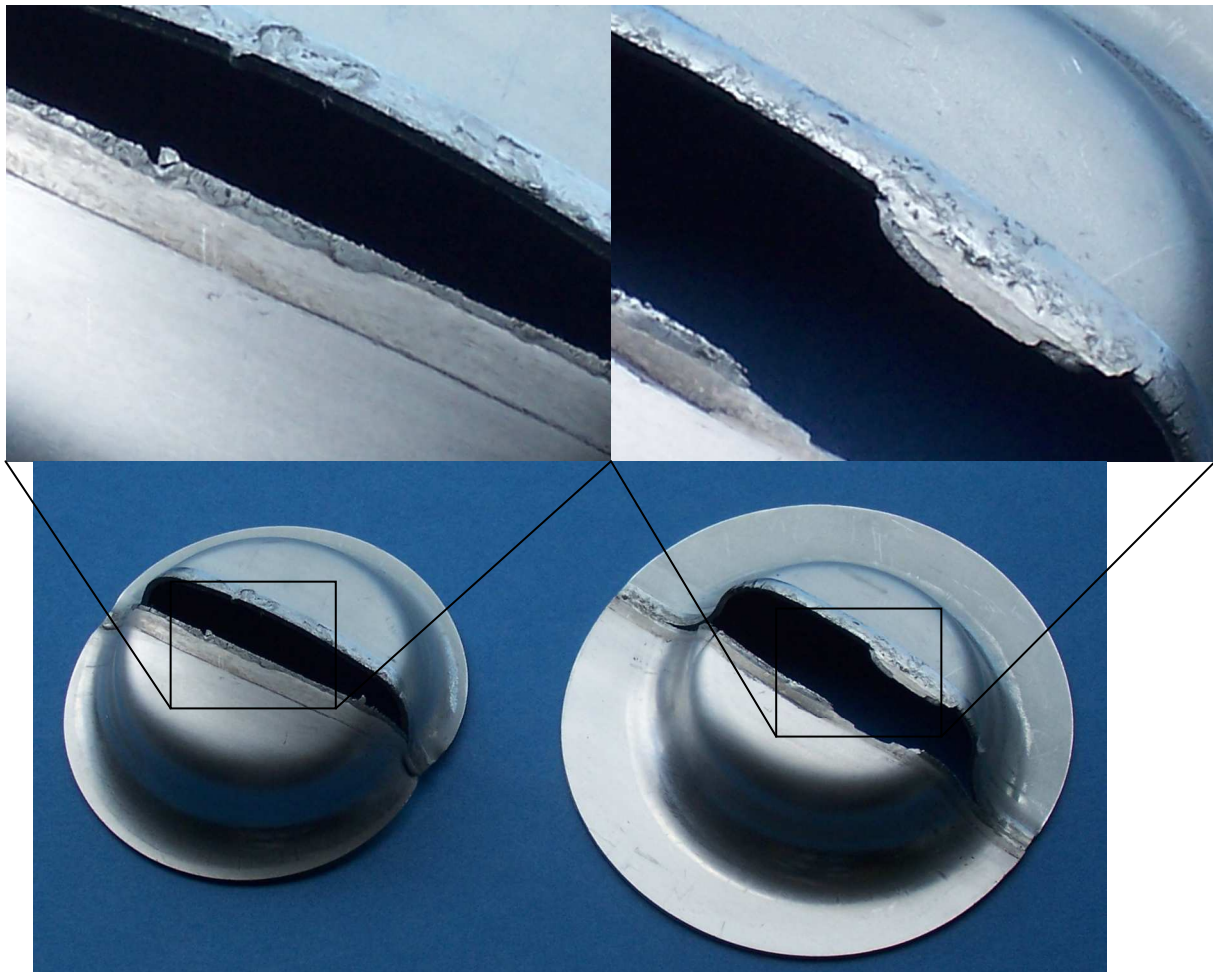
©LZH

Abbildung 60: Kraft-Weg-Verlauf an einer Probe mit Querrissen

Ein weiteres Fehlermerkmal ist das Kompletversagen im Bereich der Lötnaht, welches sich über den gesamten Bereich der Umformung zieht. Dieses lässt sich auch in einem ruckartigen Abfall der Stempelkraft wiederfinden und beweist, dass die gesamte Lötnaht gleichzeitig versagt. Die Kraft nimmt über den Weg nach dem Versagen zwar wieder zu, erreicht aber nicht das Niveau vor dem Bruch, da sie nur noch benötigt wird, um den abgeplatzen Tiefziehnapf auseinander zu drücken.

Ein drittes Schadensbild stellen die Mischbrüche dar. Hierbei versagt ein Teil der Lötnaht ähnlich wie im oben beschriebenen Kompletversagen, was auch anhand der Kraft-Weg-Verläufe festgestellt wurde. Allerdings gibt es in Bereichen der Lötnaht Stellen, an denen eine Kraftübertragung noch möglich ist. In diesen Bereichen kommt es zu einer plastischen Verformung des Aluminiumgrundwerkstoffes, welches anhand von Schlibbildern belegt werden konnte. Es kam zu einer Einschnürung des Aluminiumgrundwerkstoffes im Bereich hinter der Wärmeeinflusszone. Für diese

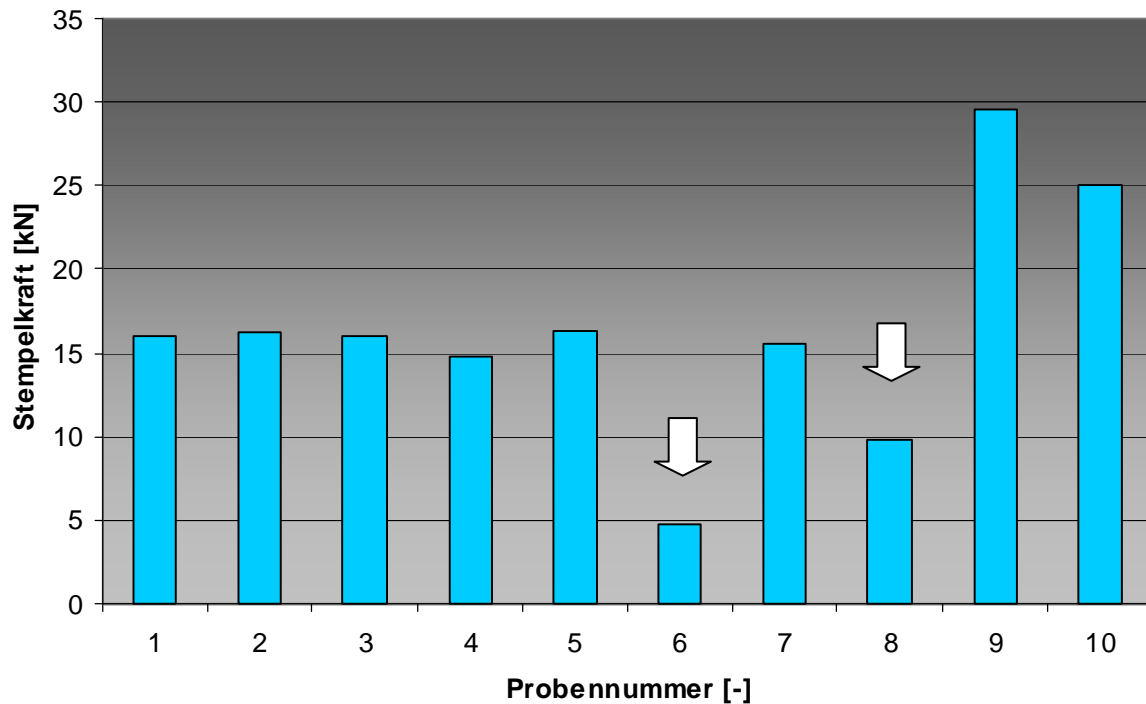
Verformung bedarf es einer ausreichenden Kraft, wie sie im Kraft-Weg-Verlauf erkennbar ist. Nach einem ruckartigen Abfall stieg die Kraft wieder auf ein Niveau an, welches dem vor dem ersten Versagen entsprach. Bei einem zu geringen Querschnitt versagte dieser Bereich durch die Ausdünnung des Werkstücks. In diesem Bereich ist eine optimale Verbindung zwischen den beiden Fügepartnern hergestellt. Eine Übersicht über Versagensfälle gibt die Abbildung 61.



©LZH

Abbildung 61: Schadensbilder an ausgewählten Umformproben

Ebenfalls konnte eine Auswirkung der Richtung, aus der die Kraft aufgebracht wird, festgestellt werden. Bei der Auswertung der Stempelkräfte unterschiedlicher Proben konnte analysiert werden, dass bei den Zinklotproben 6 und 8 die Stempelkräfte aus dem Gesamtbild herausfallen (siehe Abbildung 62). Die Proben wiesen Stempelkraftwerte von weniger als 10 kN auf, wobei einer der Werte sogar kleiner 5 kN ist. Die Proben 9 und 10 zeigen Stempelkräfte bei einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$ dar.



©LZH

Abbildung 62: Übersicht der Stempelkraftwerte bei Zinkloten

Bei visueller Betrachtung der Proben konnte festgestellt werden, dass die Proben mit der Lotoberraupe Richtung Stempel in das Umformwerkzeug gelegt wurden. Die Durchsicht aller Proben ergab, dass lediglich eine Probe auf diese Einlegeart versagensfrei umgeformt werden konnte. Die geometrischen Unterschiede dieser Probe zu den anderen beiden Proben bestanden in der unterschiedlichen Benetzungslänge auf der Blechunterseite der Probe. Bei der versagensfreien Probe ist diese wesentlich länger als bei den anderen Proben. Es ist folglich auf eine gleichmäßige Benetzung auf der Ober- und Unterseite zu achten, um ein möglichst symmetrisches Werkstoffverhalten zu erlangen.

Zur genauen Charakterisierung der Bruchflächen und zur Analyse der Versagensfälle sind aus den Proben Stücke entnommen worden, die metallographisch untersucht wurden.

Das Versagen im Bereich des Lotes beginnt am Phasensaum und geht entlang der Stirnkante des Stahlbleches. Am Lot anhaftend konnte ein Phasensaum gefunden werden, der in Teilen auch an der Stahlkante gefunden wurde. Hier lässt sich ein Rückschluss auf die Ergebnisse der Zugversuche ziehen, die eine ähnliche Versagensart aufwiesen. Auch im Bereich oberhalb des Stahlblechs konnte ein Phasensaum gefunden werden. Die Dicke des Phasensaumes konnte mit ca. 4-6 μm

im Bereich der Stirnfläche und mit ca. 3-4 μm im Bereich der Blechoberseite gemessen werden (siehe Abbildung 63). Mit Hilfe eines EDX-Scans wurde die atomare Verteilung von Aluminium und Eisen festgestellt, um die Zusammensetzung des Phasensaumes zu bestimmen. Es handelt sich, wie bei den Zugproben, um einen Fe_2Al_5 -Phasensaum.

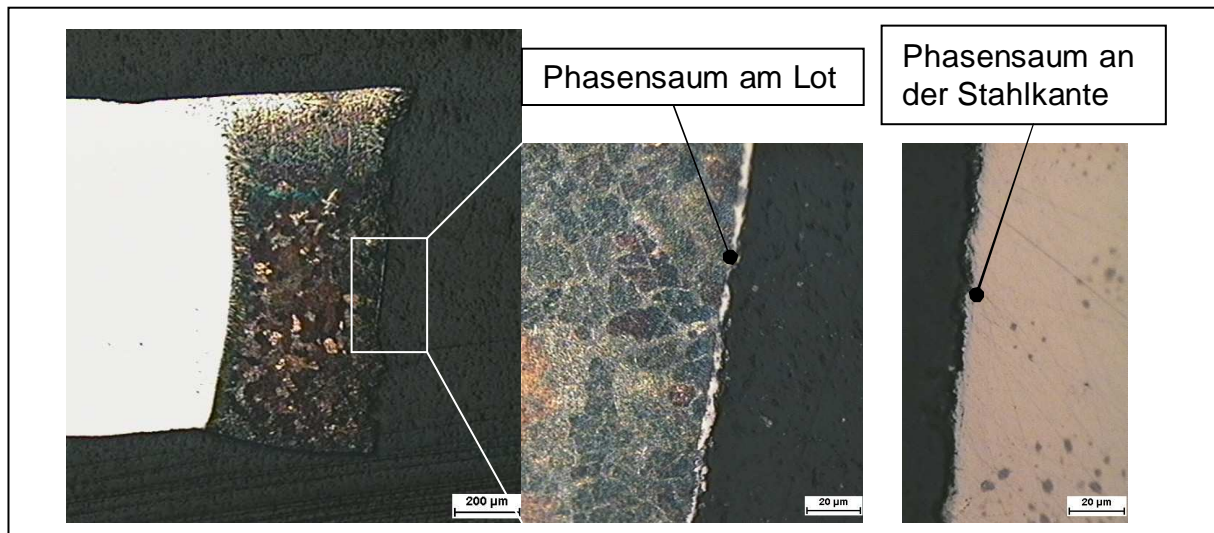


Abbildung 63: Phasensaum am Lot anhaftend und an der Stahlkante

Bei dem Mikroschliff der Probe, bei der das Versagen in der Wärmeeinflusszone stattfand, konnte ein Fließen aus der Materialdicke festgestellt werden, da ein Ausdünnen des Materials nachweisbar war. Bei näherer Analyse der Fügestelle konnten Unterschiede zu den Proben, welche im Bereich der Lötnaht versagen, festgestellt werden. Somit ist ein weiteres Indiz dafür gefunden worden, dass sich der Phasensaum, der in diesen Untersuchungen detektiert wurde, auf die Umformbarkeit der Lötverbindung, jedoch nicht auf die resultierenden Festigkeiten auswirkt.

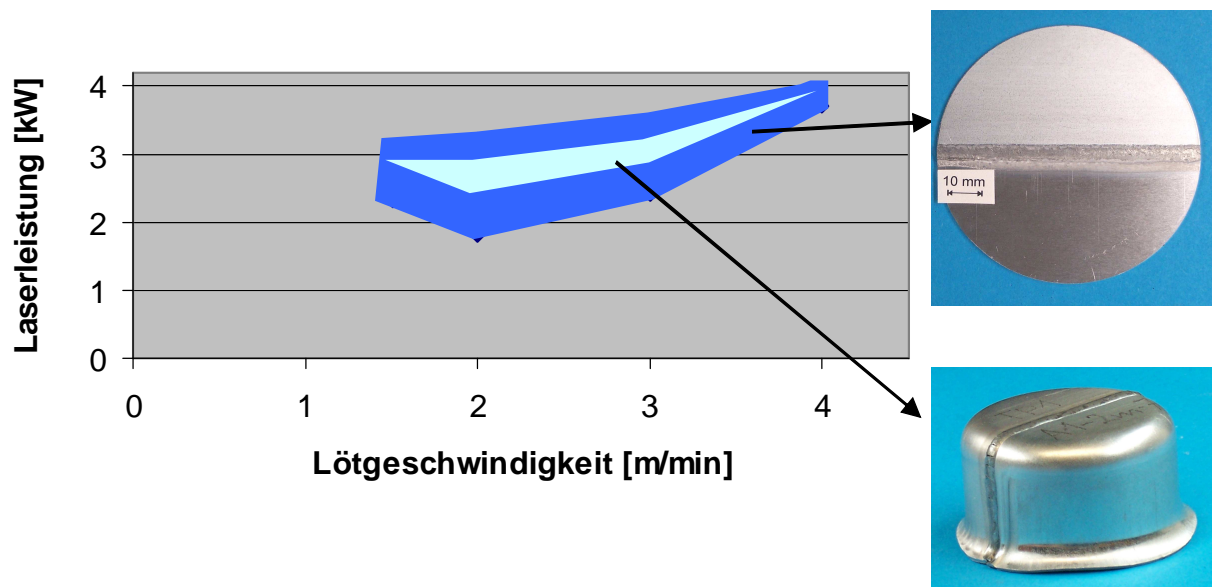
7.7 Ermitteltes Prozessfenster

Anhand der erzeugten Proben mit Zinkloten wird exemplarisch ein Prozessfenster ermittelt. Das Prozessfenster wird in der Ebene der Haupteinflussparameter Laserleistung und Prozessgeschwindigkeit aufgespannt.

Das gefundene Prozessfenster lässt sich in zwei Bereiche einteilen, wobei es einen inneren und einen äußeren Bereiche gibt. Der äußere Bereich kennzeichnet den Bereich, in dem hybride Platinen generell hergestellt werden können. Diese Proben zeichnen sich durch schlanke Nähte, wie bei den optischen Begutachtungen beschrieben, aus. Sie weisen gute Festigkeitseigenschaften bei gleichmäßigem

Nahtbild auf. Der innere Bereich des Prozessfensters zeigt an, in welchem Bereich der Parametervariation eine Herstellung von umformfähigen Tailored Hybrid Blanks möglich ist. Diese Proben erlauben eine Umformung mit einem Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$. Im Bereich der hergestellten Proben außerhalb des inneren Fensters sind teilweise Tiefziehverhältnisse von $\beta < 1,6$ möglich, werden aber in dieser Betrachtung nicht näher berücksichtigt.

Das beschriebene Prozessfenster ist in Abbildung 64 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Prozessfenster in einem Bereich von 2 bis 3 m/min Prozessgeschwindigkeit als relativ robust und damit wenig anfällig gegenüber Prozessschwankungen zeigt. Steigert man die Prozessgeschwindigkeit auf bis zu 4 m/min wird das Fenster weiter eingengt. Dieses führt in der Regel zu einem instabileren Prozess und damit zu einer erhöhten Ausschussrate. Auffällig ist, dass sich die Leistung nicht wie zu erwarten mit der Prozessgeschwindigkeit linear erhöht, sondern durch einen geringen Anstieg gekennzeichnet ist. Dies lässt sich durch die Trägheit der Wärmeleitung erklären, da bei höheren Prozessgeschwindigkeiten die Wärme nicht sofort in die Bauteilbreite abfließt. Sie staut sich im Bereich der Lötnaht kurzfristig auf und verbessert dadurch das Schmelzen des Lotes und die Benetzung der Grundwerkstoffe.



©LZH

Abbildung 64: Detektiertes Prozessfenster für Zinklote

7.8 Korrosionsuntersuchungen

Die Korrosionsuntersuchungen sollen Aufschluss über die Korrosionsneigung der Mischverbindung aus Stahl und Aluminium geben. Hierfür wurden 12 Proben aus DC04 und AA6016 mit einem ZnAl₂-Lot hergestellt. Um diese Neigung unter realen Bedingungen zu testen, wurden hybride Platinen hergestellt und diese anschließend definiert umgeformt. Diese Umformung soll eine Belastung für die Bleche und insbesondere der Lötnaht nachstellen, wie sie bei der Herstellung von Tiefziehteilen vorkommt. In diesen Versuchen wurden die Proben um einen definierten Radius von $r = 10$ mm gebogen, um eine L-förmige Struktur entstehen zu lassen. Diese Struktur zeichnet sich dadurch aus, dass keine Flüssigkeit im anschließenden Korrosionstest in Sicken oder Vertiefungen über längere Zeit gehalten wird.

Nach der Umformung wurden die Proben mit einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) überzogen, wie es in der Automobilindustrie Stand der Technik ist. Hierdurch wird eine Trennung der Metalle vom Elektrolyten angestrebt, die durch ein späteres Lackieren noch verstärkt wird. Die verwendete KTL-Beschichtung wurde anschließend sowohl quer als auch längs zur Lötnaht eingeritzt, um einen Korrosionsangriff zu ermöglichen. Bei dieser Einritzung ist darauf zu achten, dass die Beschichtung bis auf den Grundwerkstoff geschädigt wird.

Nach dem ersten Zyklus wurden die Proben entnommen und eine KTL-beschichtete Probe mit einer Referenzprobe, die unbeschichtet ist, verglichen. In der Fotodokumentation waren keine charakteristischen Merkmale von Korrosionsschäden an den beschichteten Proben zu erkennen (Abbildung 65). Die weißen Ablagerungen sind verfahrensbedingte Salzablagerungen, die sich im Zyklusverlauf ablagerten. Diese Ablagerung ist vornehmlich im Bereich von Unebenheiten oder Oberflächenveränderungen, wie sie die eingeritzten Bereiche der Proben darstellten, zu erkennen. Sie wurden nach den einzelnen Zyklen nicht entfernt.

Zum Vergleich ist bei der unbeschichteten Referenz-Probe zu erkennen, dass schon nach dem ersten Zyklus erste Korrosionsschäden auftreten. Deutlich zu erkennen sind die ersten Eisenoxide auf der Stahlseite und die Verfärbung am Aluminiumblech.

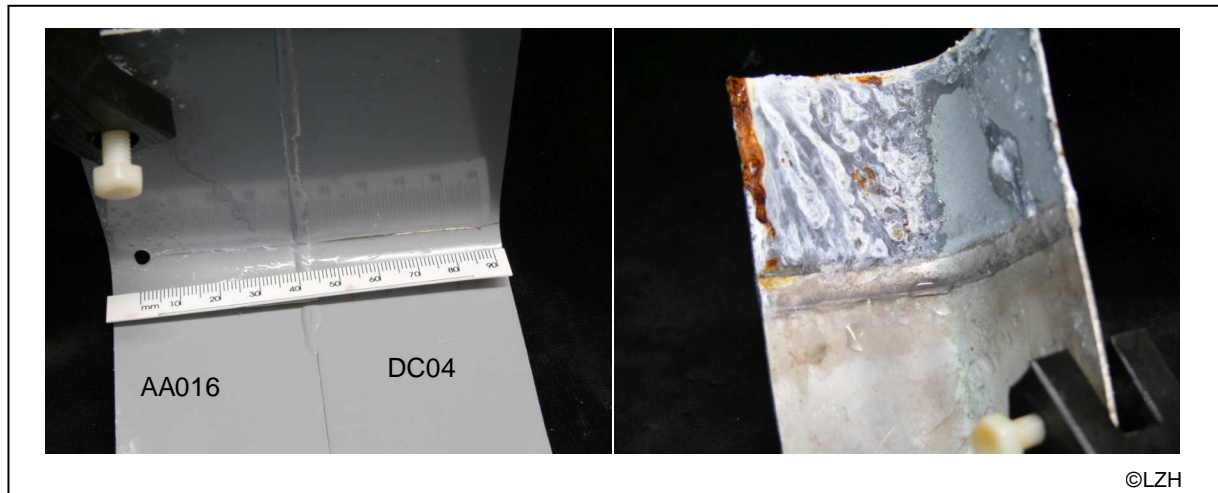


Abbildung 65: Korrosionsprobe nach Zyklus 1 links: KTL-beschichtet rechts: unbeschichtet (DC04, AA6016 mit ZnAl₂; $v_f = 3$ m/min; $P_L = 2,8$ kW)

Durch einen Vergleich mit einer unbeschichteten Probe kann der ungehinderte Korrosionsangriff erkannt werden. Es konnten bei einer Referenzprobe deutliche Korrosionserscheinungen detektiert werden, die bei den beschichteten Proben nicht auffindbar waren. Im Bereich der äußeren Schnittkanten des Stahlblechs sind einige Korrosionserscheinungen zu erkennen, die sich durch Stoßschäden beim Transport erklären lassen. Im Bereich der mechanisch geschnittenen Stahlkanten ist, wie oben erwähnt, die Zinkauflage nicht vorhanden und somit ein Schutz gegenüber Korrosion nicht gegeben. An der beschichteten Probe waren lediglich weitere Anhaftungen der Testflüssigkeit zu finden (Abbildung 66).

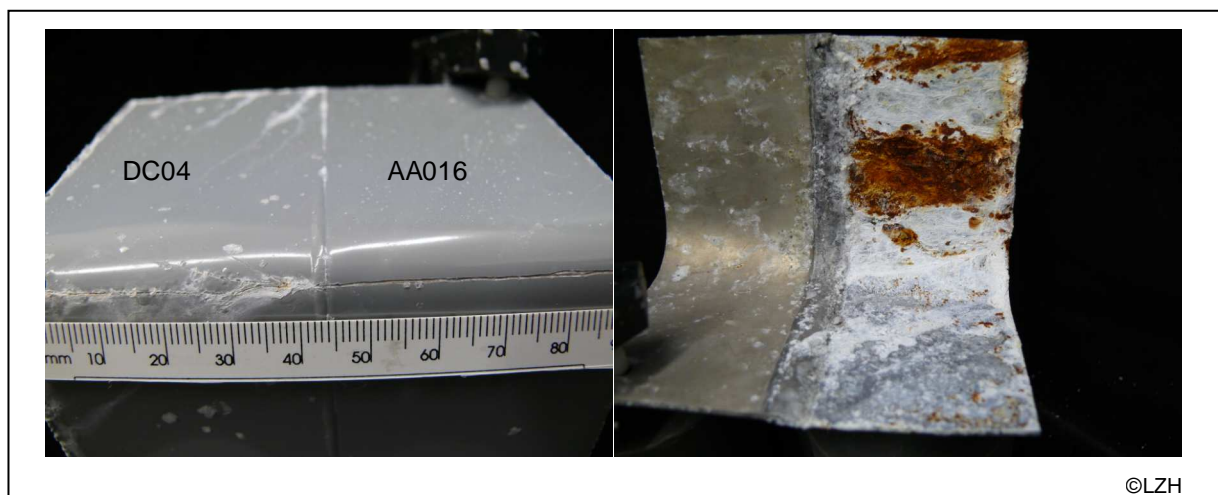


Abbildung 66: Korrosionsprobe nach Zyklus 5 links: KTL-beschichtete rechts: unbeschichtet (DC04, AA6016 mit ZnAl₂; $v_f = 3$ m/min; $P_L = 2,8$ kW)

Nach einer gesamten Testzeit von 10 Wochen wurden die Proben bewertet und erneut mit der unbeschichteten Referenzprobe verglichen (siehe Abbildung 67). Es ist deutlich zu erkennen, wie die Referenzprobe durch den Klimawechseltest beansprucht wurde. Durch den aggressiven Einfluss der Testflüssigkeit und der Temperaturschwankungen wurde das Stahlblech massiv korrodiert und die Oberflächenstruktur des Aluminiumblechs optisch deutlich verändert. Bei den unbeschichteten Proben ist eine erste Bildung von Rotrost und Aluminiumoxid nachzuweisen.

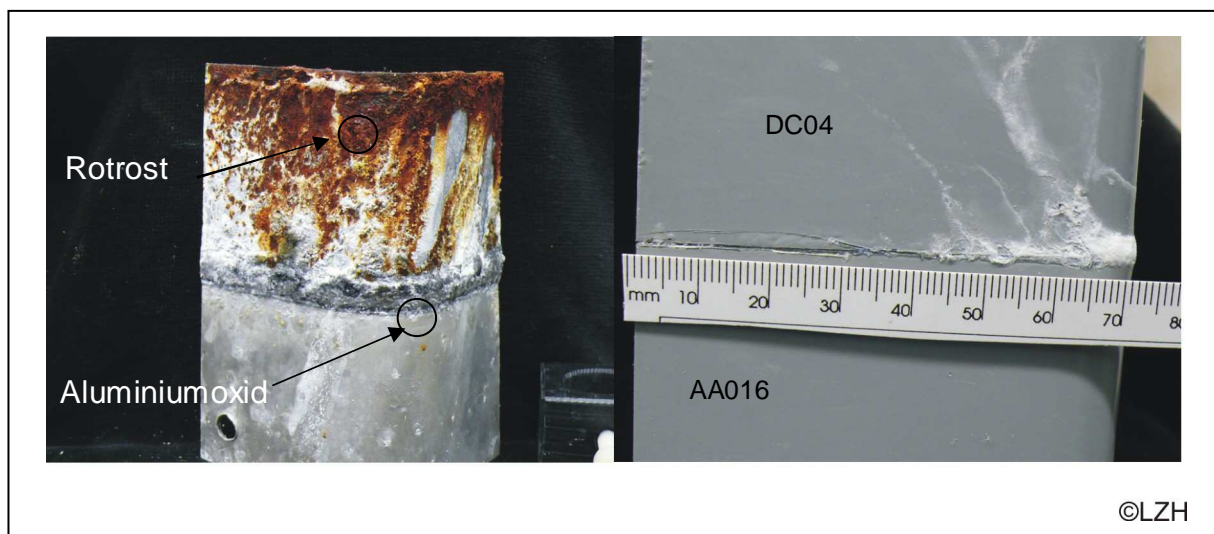


Abbildung 67: Korrosionsproben unbeschichtet (links) und beschichtet (rechts) nach Zyklus 10 (DC04, AA6016 mit ZnAl2; $v_f = 3$ m/min; $P_L = 2,8$ kW)

Diese Untersuchungen zeigen eindeutig, dass ein deutliches Korrosionspotential von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen bei unbeschichteten Proben vorhanden ist. Jedoch ist zu beobachten, dass eine Beschädigung der Zinkauflage auf dem Stahlblech einen deutlicheren Korrosionsangriff aufweist als die Kontaktstelle zwischen Stahl- und Aluminiumwerkstoff. Das detektierte Korrosionspotential ist somit ähnlich wie das von unbeschichteten Stahlblechen einzustufen. Durch die Untersuchungen mit KTL-Beschichtungen konnte nachgewiesen werden, dass der Korrosion mit Mitteln, die in der Industrie Stand der Technik sind, entgegengewirkt werden kann.

7.9 Demonstratorbleche für das Innenhochdruckumformen

Zur Betrachtung der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit soll ein Demonstrator mittels Innenhochdruckumformen hergestellt werden, hierfür werden hybride Blechplatinen hergestellt. Diese Platinen haben eine Abmessung von

je 200 mm x 400 mm und werden mittels einer Lötnaht von 400 mm zu einer quadratischen Platine gefügt. Aus diesen Platinen wird mittels Laserstrahlung ein Blechrondenzuschnitt (siehe Abbildung 68) als Ausgangsmaterial für die Umformversuche gefertigt. Im Bereich der Lötnaht ist die Platine je Seite 20mm breiter, um eine größere Dichtfläche im Bereich der Lötnaht und damit einhergehend im Bereich des Materialdickensprungs zu erzielen.

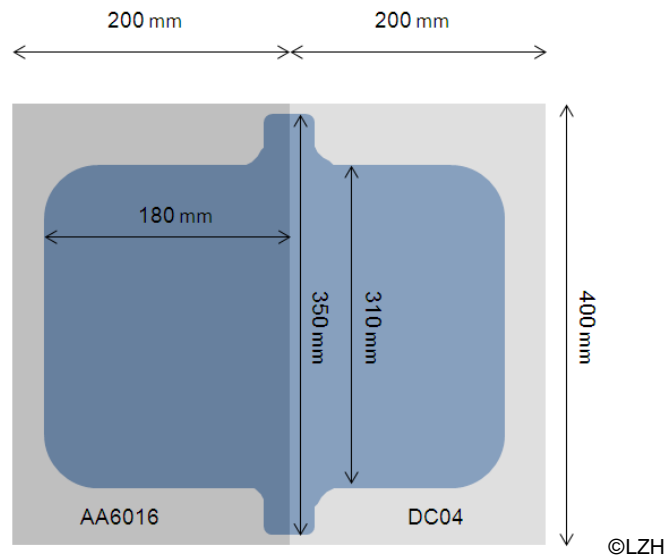


Abbildung 68: Platine für die Innenhochdruckumformversuche, Blechrondenzuschnitt (blau unterlegt)

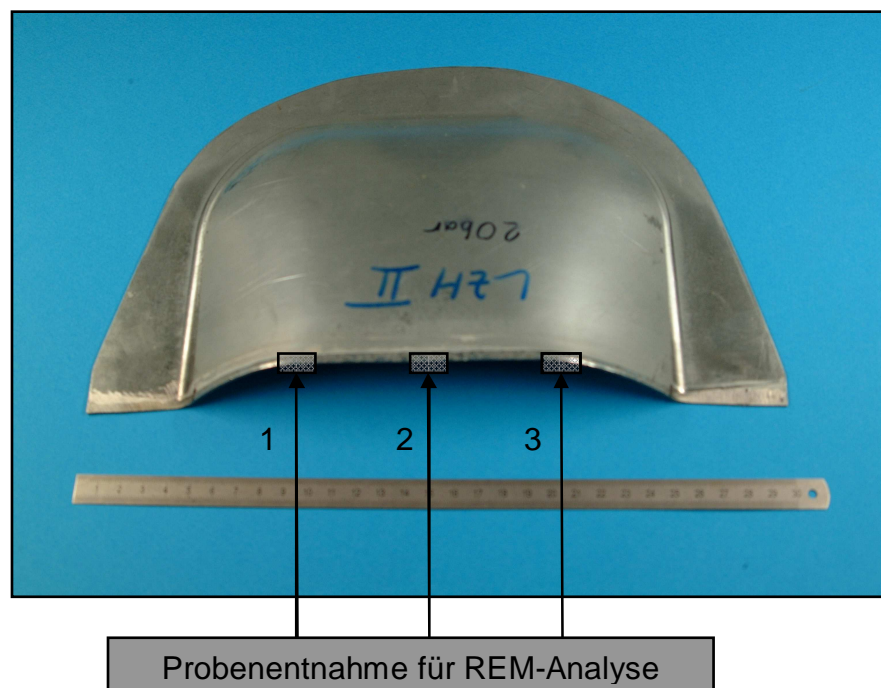
In einer Innenhochdruckpresse wurde dieser Zuschnitt mittels Öl mit Druck beaufschlagt und wird hierdurch in eine Matrize gepresst. Dieser Fertigungsverfahren wird in einer Stufe ausgeführt, wobei die Umformung des Blechs in zwei Schritten erfolgt. Zu Beginn der Umformung wird das Blech frei umgeformt, bis es an der Matrize anliegt. Darauf folgend wird die Feinausprägung durch Erhöhung des Drucks erzielt, indem sich die Platine an die Matrize anlegt und so die Kontur dieser übernimmt. Für diese Untersuchungen wurde für die Vorformphase ein Druck von 60 bar bei einer Niederhalterkraft von 140 kN eingestellt. Hierdurch soll eine möglichst hohe Formänderung erzielt werden. Bei der anschließenden Phase der Kalibrierung wurde der Druck gesteigert, wobei die Niederhalterkraft auf 2000 kN erhöht wurde. Für die vollständige Ausprägung der angedachten Struktur wäre basierend auf Simulationen der Umformtechniker ein Innendruck von 180 bar notwendig.

Für die Versuche ist eine Mediendichtheit der Naht unbedingt erforderlich, um die benötigten Drücke in der Presse aufbauen zu können. Besonders auf die gleichmäßige Ausprägung der Lötnaht ist hierbei zu achten. Durch eine

ungleichmäßige Lotober- oder -unterraupe kommt es zu einer ungleichmäßigen Verformung der Blechplatine und damit einhergehend zu einem verschobenen Belastungsfall im Nahtbereich. Es kann somit zu Belastungsspitzen, die zu einem Versagen der Lötnaht vor dem Fertigstellen der Feinausprägung führen, kommen.

Die Blechplatinen wurden mittels $ZnAl_2$ Loten hergestellt, da dieses in den Tiefziehversuchen in Anlehnung an den Näpfchenversuch nach Swift die besten Ergebnisse bezüglich der Duktilität der Lötnaht aufwies.

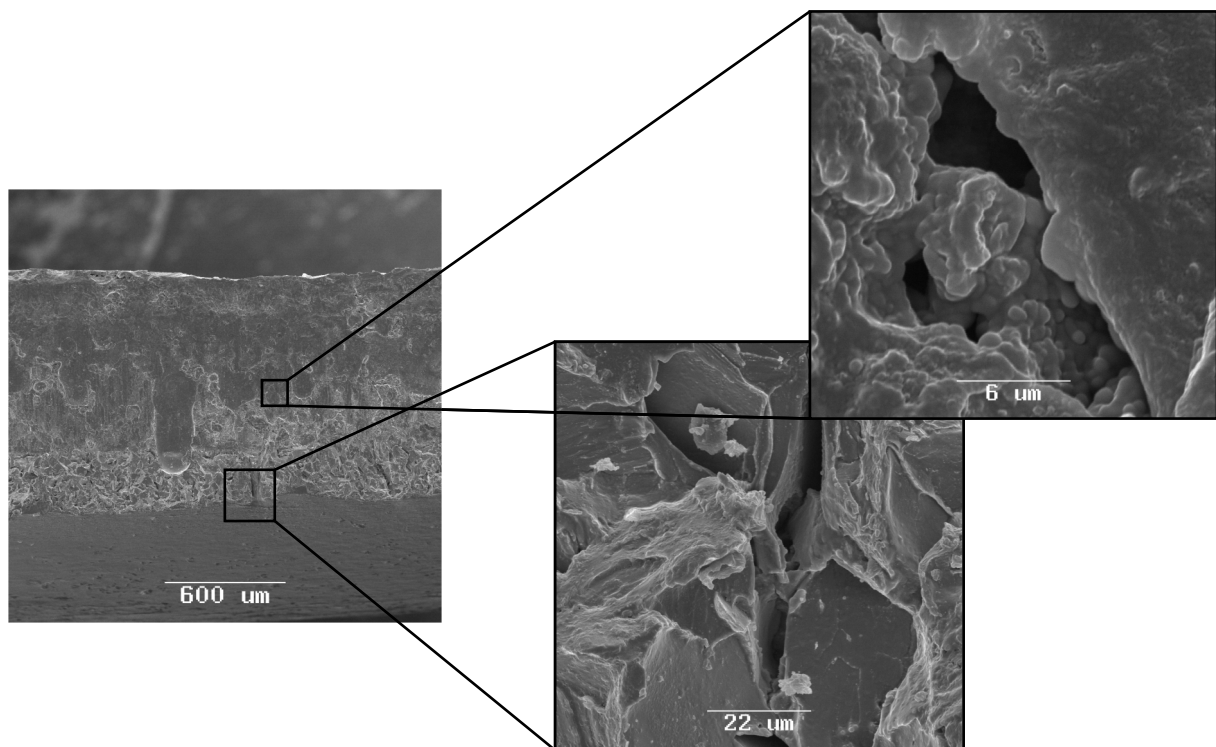
Bei den ersten Umformversuchen wurde ein maximaler Innendruck von 20 bar erreicht. Bei diesem Druck kam es zu einer Leckage im Bereich der Fügezone, welche als Anrisskante für das Versagen der Blechplatine verantwortlich ist. Die Platine ist entlang der Fügezone aufgerissen, wobei ein Versagen nur im Bereich des Lotes zu detektieren ist. Um diese Versagensstellen genauer zu analysieren, wurde einem Demonstratorblech an verschiedenen Stellen Proben für eine REM-Untersuchung entnommen. Die Entnahmestellen sind in Abbildung 69 zu sehen. Durch die Entnahme aus unterschiedlichen Bereichen der Fügezone sollen zusätzlich weitere Informationen über den Prozessverlauf entlang der Naht generiert werden.



©LZH

Abbildung 69: Entnahmestellen aus dem Demonstrator (zum Vergleich ein 30 cm Stahlruler) nach Zerstörung im IHU-Test (DC04, AA6016 mit $ZnAl_2$; $v_f = 3$ m/min; $P_L = 2,8$ kW)

Die Bruchflächen wurden in einem Rasterelektronenmikroskop hinsichtlich ihrer Bruchbilder untersucht, um Aufschluss über die Versagensformen zu erlangen. In der Entnahmestelle 1 konnte eine gleichmäßige Bruchfläche detektiert werden. Es ist eine gleichmäßige Anbindung zwischen Lot und Grundwerkstoff vorhanden, was für eine ausreichende Diffusion zwischen den beiden Fügepartnern spricht. Die Bruchfläche weist zwei unterschiedliche Bruchbilder auf. Im oberen Bereich der Probe zeigt sich ein Bruchbild, das durch feinste Strukturänderungen entlang der Körner geprägt ist. Im unteren Bereich der Versagenszone ist ein massiveres Bersten der Blechplatine zu erkennen. Dieses ist in der Abnahme der Kraftaufnahmefähigkeit bei Fortlaufen des Versagens begründet, so dass es zum Ende des Umformtests zu einem gewaltsamen Restbruch kommt. Es ist deutlich zu erkennen, dass größere Bereiche des erstarrten Lotes auseinander gerissen wurden (siehe Abbildung 70).



©LZH

Abbildung 70: REM-Aufnahme der Entnahmestelle 1 mit Detailvergrößerungen

An der Entnahmestelle 2 wurden die gleichen REM-Untersuchungen durchgeführt, um den Verlauf des Prozesses entlang der Fügegeometrie zu analysieren. Hierbei konnte ein sich unterscheidendes Bruchbild detektiert werden. Die Bruchfläche lässt sich in zwei Bereiche einteilen, die sich signifikant unterscheiden. Im oberen Bereich der Bruchfläche kann ein Aufbrechen der Kornstrukturen innerhalb des Lotes detektiert werden. Dahingegen ist im unteren Bereich der Bruchfläche ein Versagen

der Lötnaht im Bereich der Adhäsionsflächen zu erkennen. Dieses spricht für eine zu geringe Temperatur für eine vollständige Diffusion zwischen dem Lot und dem Grundwerkstoff, wodurch es nur zu einer Anhaftung des Lotwerkstoffes aber nicht zu einer Durchdringung auf atomarer Ebene kommt. An diesen Stellen der Lötnaht ist visuell eine intakte Lötung zu detektieren, da ein Fließen des Lotes stattfindet und dadurch eine Benetzung der Grundwerkstoffe im sichtbaren Bereich erfolgt. Auch die Lötnahtoberfläche weist ein intaktes Bild auf. Lediglich im inneren Bereich des Lötspaltes reichen die Temperaturen nicht aus, um die notwendigen Benetzungs- und Diffusionsvorgänge durchzuführen, wodurch es bei mechanischer Belastung zum Versagen der Probe kommt. Die als „kalte Lötstellen“ bezeichnete Fehlstelle im Bereich der Lötnaht erweist sich als mechanische Kerbe, da durch die mangelnde Diffusion eine Verringerung des tragfähigen Querschnitts erfolgt (siehe Abbildung 71).

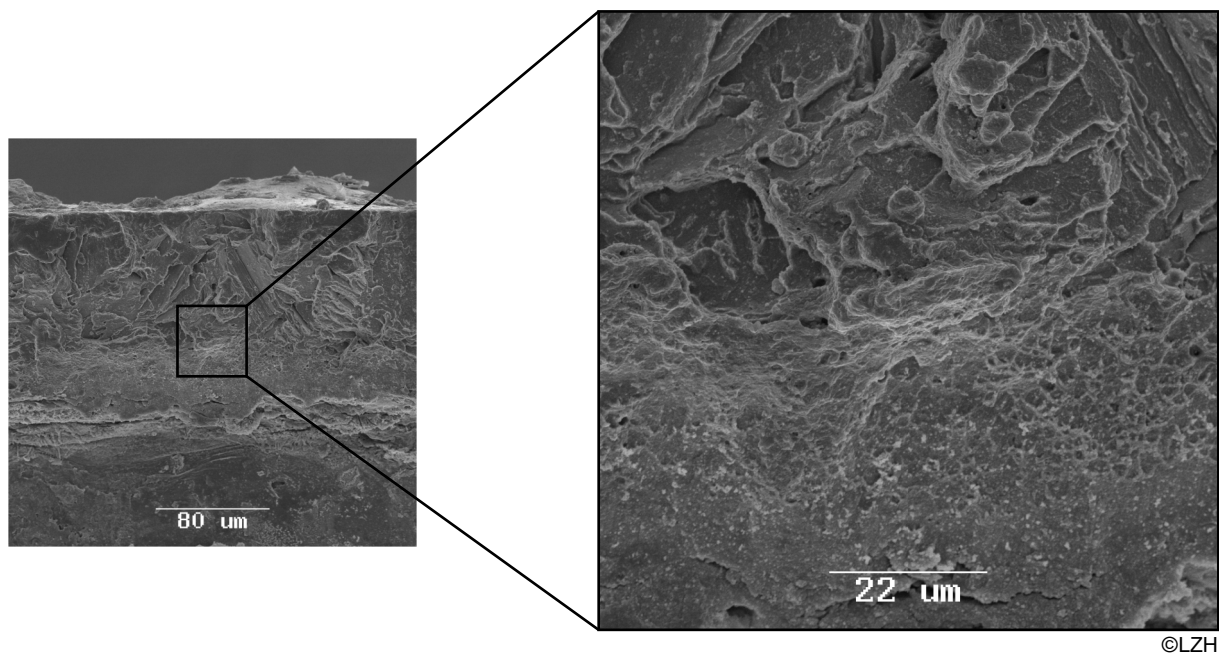


Abbildung 71: REM-Aufnahme der Entnahmestelle 2 mit Detailvergrößerungen

Um eine weitere Verbesserung des Prozesses zu ermöglichen, muss eine gleichmäßige und über die gesamte Nahtlänge mediendichte Lötnaht hergestellt werden, die einem Beaufschlagungsdruck von mindestens 80 bar standhält. Hierfür bedarf es einer weiteren Iteration im Prozessablauf.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Prozessführung optimiert, um eine bessere Anbindung des Lotes an die Stirnseiten der Grundwerkstoffe zu erzielen. Durch eine schleppende Drahtzufuhr konnten gleichmäßigere Lötnahte gefertigt werden. Bei den IHU-Versuchen konnte eine deutliche Verbesserung der Umformeigenschaften

detektiert werden. Die Löt­nähte konnten alle mit mindestens 20 bar Druck beaufschlagt werden, bis es zu Leckagen kam. Die Leckagen liegen bei den Proben, die bei 20 bar versagen, in der Nahtmitte, was auf die Ausprägung während des Umformens zurückzuführen ist. Zu Beginn treten die größten Kräfte im Zentrum der Blechplatte auf. In Abbildung 72 ist eine Probe zu sehen, die in der Nahtmitte längs gerissen ist. Durch die hohen Kräfte bei der Ausprägung wird durch eine geringe Fehlstelle oder eine sprunghafte Änderung des Phasensaumes eine Kerbe erzeugt, die zu einem Einreißen der Probe entlang der Schwachstelle führt. Da im Bereich der Fügezone durch den Materialdickensprung der Kraftpfad variiert, wird hier das Versagen eingeleitet.

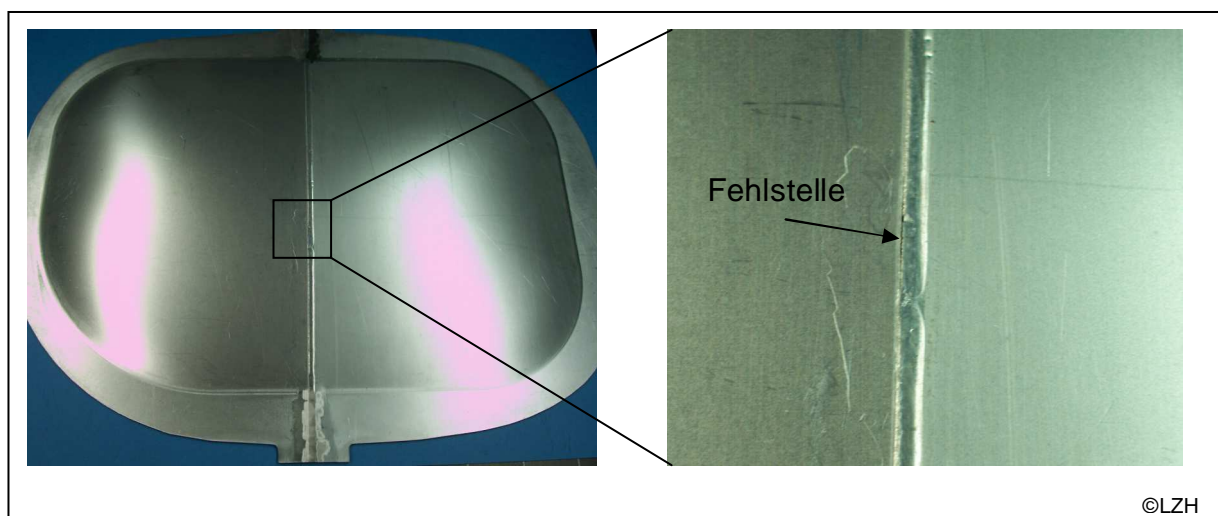
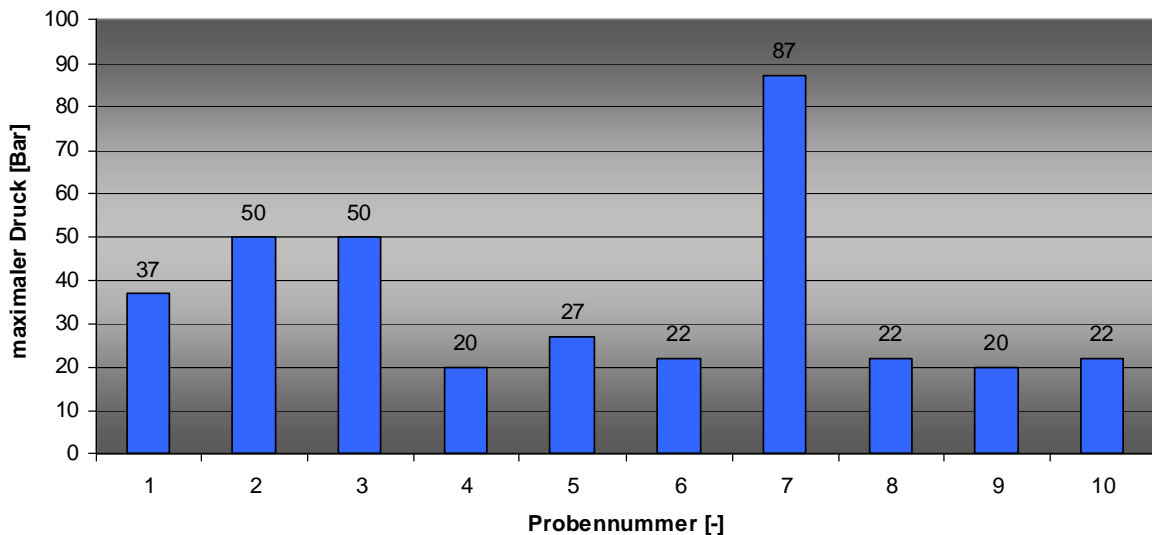


Abbildung 72: IHU-Probe mit Leckage im Nahtbereich (Löt­nahtlänge 300 mm)

Einige Proben konnten mit 50 bar, eine einzelne Probe sogar mit 87 bar beaufschlagt werden. Bei diesen Proben wurde ein Kontakt des Blechbodens mit der Matrize erreicht, was einer Ausprägungstiefe von 38 mm entspricht. Das Versagen der Proben ist im Bereich der Radien zu finden. Mit diesen Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich diese Technologie auch für Medientumformung eignet und Fügeverbindungen mit einer Nahtdichtheit von 20 bar sicher herstellen lassen. In Abbildung 73 sind die maximalen Drücke der einzelnen Proben dargestellt, wobei der Mittelwert bei 35,7 bar liegt.



©LZH

Abbildung 73: Übersicht der maximalen Drücke der zweiten IHU-Versuche

Die Proben der IHU-Versuche, die den Druckbereich von 37 bar und mehr erreichen, werden vollständig ausgeformt und erreichen die maximale Tiefung mit Ausprägung des Bodenbereichs. Durch eine nicht durchgeführte Modifikation des Umformwerkzeuges wurde ein Ausprägen der Seitenteile durch einen bestimmten Radius nicht untersucht. Der Seitenbereich wurde, da keine Anlegegeometrie vorhanden war, mit einem unendlich kleinen Radius ausgeformt, was nur theoretisch möglich ist. Durch diese Versuchsanordnung wird ein Versagen nach der Ausprägung des Bodens im Bereich der Seitenradien auftreten, was selbst bei dem maximalen Druck von 87 bar nicht aufgetreten ist. In Abbildung 74 ist die Probe mit dem maximalen Druck dargestellt. Deutlich sind der ausgeprägte Boden und die Konturen der Seitenrahmenstruktur zu erkennen.

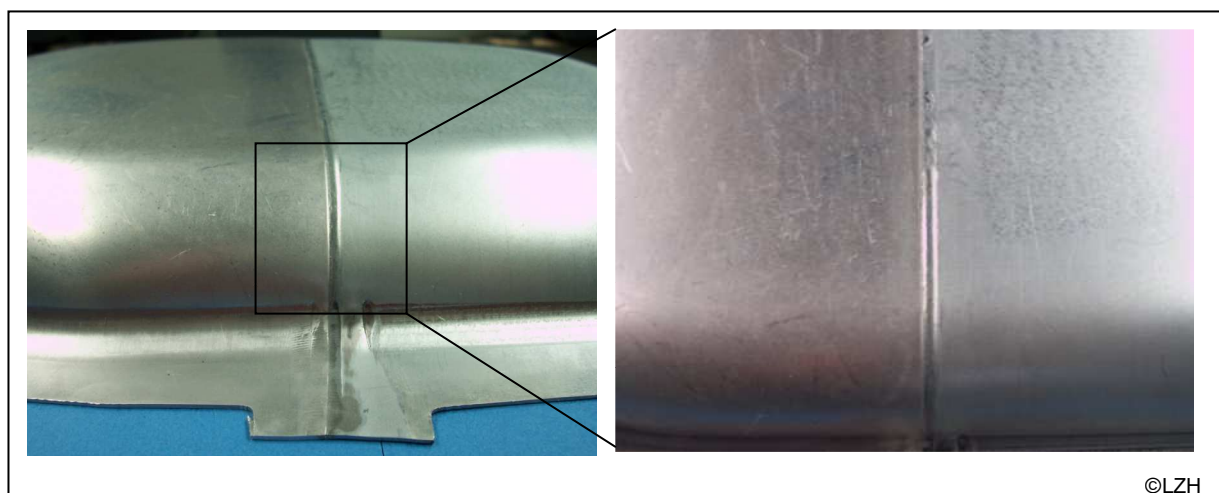


Abbildung 74: IHU-Demonstrator nach vollständiger und versagensfreier Umformung; rechts Detail des Umformradius und der Lötnaht

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Herstellung von hybriden Platinen für die Mischbauweise untersucht. Um dem Streben nach leichten und belastungsangepassten Strukturen gerecht zu werden, wurden Mischverbindungen aus Stahl- und Aluminiumwerkstoffen mittels Laserstrahllöten hergestellt. Bisher werden für solche Mischverbindungen mechanische Fügeverfahren oder so genannte Schweißlötverfahren verwendet (vgl. Kapitel 2.2 und 2.4). Hierfür wurden Erkenntnisse aus Lötprozessen, die mittels Fülldrähten eine Einbringung von Zusatzwerkstoffen erzielen, weiterentwickelt und dadurch eine Prozessgeschwindigkeitssteigerung bei gleichzeitiger Verbesserung der Prozessstabilität erzielt. Durch eine metallographische Herausarbeitung der dominanten Prozesskenngrößen und Analyse des Einflusses auf die Entstehung von Phasensäumen zwischen Eisen und Aluminium konnte eine Verbesserung der Prozesstechnik und der -führung erzielt werden. So konnte durch das Laserstrahlpendeln eine Verdopplung der Vorschubgeschwindigkeit (maximal $v_f = 4$ m/min) bei gleich bleibenden Festigkeiten erzielt werden.

Die Entstehung von Phasensäumen kann durch die Prozessführung beeinflusst werden, wobei die Auswahl der Lotlegierung ein entscheidendes Kriterium darstellt. So werden bei Al-Si-Basisloten durch den Siliziumanteil geringere Phasensäume als bei Zn-Al-Basisloten erzielt. Die Al-Si-Lote führen jedoch zu einer höheren thermischen Schädigung des Aluminiumgrundwerkstoffs und damit zu geringeren Festigkeiten. Die maximale Phasensaumdicke sollte unter 7-10 μm liegen, da bei diesen Ausprägungen gute bis sehr gute Festigkeiten und Umformwerte erzielt wurden.

Die Herstellung von hybriden Platinen zu Untersuchung von mechanischen Kennwerten sowohl im quasistatischen Zugversuch als auch im Tiefziehtest wurde ermöglicht. Hierbei konnte im quasistatischen Zugversuch ca. 70 % der Festigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs erreicht werden. In den Umformversuchen wurde erstmalig das Tiefziehverhältnis der hybriden lasergelöteten Platinen getestet. Mit der optimalen Kombination aus Lot, Werkstoffen und Prozesstechnik konnte ein maximales Tiefziehverhältnis von $\beta = 1,9$ erzielt werden. Diese wurde unter Verwendung von 2,8 kW und einer Prozessgeschwindigkeit von 3 m/min hergestellt.

Als optimale Lotauswahl konnten Lotlegierungen des Systems Zn-Al mit einer Arbeitstemperatur von 381 bis 420°C herausgearbeitet werden.

Um Aussagen über eine spätere industrielle Umsetzung und die Nahtdichtheit geben zu können, wurden Innenhochdruckumformversuche durchgeführt. Hierbei wurde eine an eine Rahmenstruktur einer Automobiltür angelehnte Struktur ausgeprägt. Weitere Erkenntnisse konnten über die Belastbarkeit der Lötnaht gesammelt werden. Die Dichtheit der Lötnaht wurde nachgewiesen, da diese ein Ausprägen der Struktur bis zum vollständigen Kontakt mit der Matrize ermöglichte.

Um der häufig erwähnten Korrosionsneigung Rechnung zu tragen, wurden abschließend Korrosionstests nach der VDA-Norm durchgeführt und eine Bewertung der Probenkörper vorgenommen. Hierbei konnte herausgearbeitet werden, dass mit bekannten Mitteln des Korrosionsschutzes eine Konservierung der hybriden Platinen und damit eine Minimierung der Korrosion erfolgen kann.

In weiteren Untersuchungen sollten die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf zusätzliche Stahl- und Aluminiumwerkstoffe getestet werden, um einen universellen Einsatz der laserbasierten Füge-technik vorzubereiten.

Die angestrebte Möglichkeit des flussmittelfreien Lötens von Aluminium sollte weiterverfolgt werden, um eine einfachere Prozesstechnik auch für die Herstellung von hybriden Platinen zu ermöglichen. Mit den Erkenntnissen der verbesserten Benetzung könnte eine bessere Energiebilanz des Fügeprozesses erzielt werden, wodurch der industrielle Einsatz kostengünstiger wird.

Durch neue Diodenlaserstrahlquellen kann die Möglichkeit einer weiteren Reduzierung der Kosten für die Prozesstechnik entstehen. Es ist daher zu prüfen, wie sich die dargestellten Ergebnisse unmittelbar oder mittelbar auf die Verwendung eines Diodenlasers übertragen lassen und sich die zu erwartenden Kostenvorteile ergeben.

9 Literaturverzeichnis

- /1/ Niemeyer, M.; Wilde, H.-D.; Fischer, M. et.al.: Karroserie – Rohbau, Werkstoff, Fertigung; Sonderausgabe ATZ und MTZ Audi A4; September 2007; Seite 166-171
- /2/ Drewes, E.: Höchstefeste Stahlwerkstoffe für den automobilen Leichtbau - Werkstoffeigenschaften und Einsatzmöglichkeiten. In: Neue Lösungen mit Stahl im Automobilbau, Frankfurt a.M.
- /3/ Mann, K.: Neue Perspektiven in der Entwicklung von Lasersystemen für den Karosseriebau. In: Zweites Industriekolloquium SFB362, Clausthal-Zellerfeld; Seite 60-68
- /4/ Behr, F.; Flöth, T.; Paton, A.: Die Auslegung der Toleranzkette des NSB (NewSteelBody) zum Laserstrahlschweißen. In: Werkstoffe und Komponenten für den Fahrzeugbau, SFU, 11. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg
- /5/ N.N.: Weniger Karosseriemasse durch Edelstahl, ATZ 11/2007, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH; Seite 40
- /6/ N.N.: Kraftstoff einsparen mit Aluminium. In: ATZ 109 (2007) 03, Seite 212
- /7/ N.N.: Karosserie/ Exterieur. In: ATZ Sonderheft „neue C-Klasse (2007), Seite 40
- /8/ N.N.: Aluminiumfront verringert Gewicht und Emissionswerte; Bleche Rohre Profile; 2007 Heft 4
- /9/ N.N.: Modulares Druckgusskonzept, Automotive Materials November 07, Geisel Verlag GmbH, 2007
- /10/ <http://www.thyssenkrupp-steel.com/auto/de/produkte/tailoredproducts.jsp>, 8.Mai 2008
- /11/ Hilfreich, E.; Maas, J.; Flöth, T.; Vergleich und Optimierung von Fahrzeugtüren, ATZ 06/2007, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH
- /12/ N.N.: Crashesicherheit und Leichtbau im Einklang, Automotive Materials November 07, Geisel Verlag GmbH, 2007

- /13/ Prange, W., Schneider, C., Selige, A.-J.: Application of laser-beam-welded sheet metal. Anwendung laserstrahlgeschweißter Stahlbleche im Automobilbau; SAE-Papers, Seite 1-12; 1989
- /14/ Zimmer, E.: Tailored Blanks mit Laserschweißen, die maßgeschneiderte Platine und ihre Anwendung für die Leichtbauweise im Karosseriebau; Praxis-Forum, Karosserie-Rohbau Band 96/14 (1996) Seite 97,99-110 Berlin: Technik + Kommunikation 1996
- /15/ Pircher, H.; Prange, W.; Kawalla, R.; Klein, R., Nagel, M., Polzin, R.: Lasergeschweißte Verbindungselemente aus Aluminium und Stahl Maschinenmarkt, Würzburg * Band 102 (1996) Heft 15, Seite 76-78; 1996
- /16/ Thomy, C., Wagner, F., Vollertsen, F., Wirth, A., Kreimeyer, M.: Laser-MIG-Hybridfügen von Aluminium-Stahl Leichtbaustrukturen; Laser Technik Journal 2007
- /17/ Merklein, M.; Giera, A.; Staud, D.; Geiger, M.: Reibrührschweißen - ein innovatives Schweißverfahren für Hybridstrukturen mit hohem Umformpotential. In: Congress Intelligente Leichtbau Systeme 2005; Seite 36-40
- /18/ Andrew, D. R.: Joining Aluminium to mild Steel by Argonarc Welding. Brit. Welding 1962, Heft 12, S. 650 - 658
- /19/ Capa, M., Gülec, S.: Widerstandspunkt-Diffusionsschweißen von Aluminium und feuerverzinktem Stahl. Schweißen und Schneiden, Heft 2, DVS-Verlag (1979), Seite 73-74
- /20/ Anik, S., Dorn, L.: Metallische Vorgänge beim Schweißen unterschiedlicher Werkstoffe – Verbindungen von Stahl mit verschiedenartigen Metallen
- /21/ Aichle, G.: Stahl und Aluminium – thermisch gefügt; Stahlmarkt 05/2008
- /22/ Reinhold, B.; Angermann, K.: Werkstoffverbunde im Automobilbau. In: DGM-Tagung Verbundwerkstoffe, Bayreuth; Seite 27-38
- /23/ Appel, L.: Reibschweißen von Mischverbindungen; Seminarberichte IWB Band 64; Utz-Verlag München; 2003; Seite 691-695

- /24/ Bobzin, K.; Lugscheider, E.; Ernst, F. et al.: Laserstrahllöten von Leichtmetallen. Schweißen und Schneiden 2005, DVS-Berichte Band 237, Düsseldorf, 2005, Seite 160-162
- /25/ Jüttner, S. u. Andere; Fügen von Aluminium-Stahl-Verbindungen mittels Lichtbogenverfahren; <http://www-home.fh-lausitz.de/~rwinkelm/gst2003.pdf>
- /26/ Radscheidt, C.; Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl; Dissertation Uni Bremen; Verlag BIAS; 1997
- /27/ Jacome, L. A.; Weber, S.; Leitner, A.; Arenholz, E.; Bruckner, J.; Pyzalle, A. R.: Influence of Filler Composition on the Microstructure and mechanical Properties of Steel-Aluminium Joints produced by Metal Arc Joining. In: Advanced Engineering Materials 11 (2009) 5, S. 350-358
- /28/ Cramer, H.; Appel, L.: Plastisches Fügen von Mischverbindungen mit speziell konturierter Kegelgeometrie; Schweißen und Schneiden 60 (2008); Seite 691-695
- /29/ Wilden, J.; Jahn, S.; Tkachenko, V.: Entwicklung einer Füge-technologie zum Herstellen von Mischverbindungen mit Titanwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen. In: Schweißen und Schneiden 61 (2009) 8, S. 419-420
- /30/ Zerner, I.: Prozessstabilisierung und Ergebnisse für das Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Mischverbindungen; Strahltechnik Bd. 16; Bremen BIAS Verlag 2001
- /31/ Appel, L.; Cramer, H.: Plastisches Fügen von Mischverbindungen mit speziell konturierter Kegelgeometrie. In: Schweißen und Schneiden 60 (2008) 12, S. 691-695
- /32/ Ozaki, H.; Kutsuna, M.: Laser Rolle Welding of dissimilar metal joint of zinc coated steel to aluminium alloy; ICALEO Proceedings 2006, Seite 298 - 302
- /33/ Ryabov, V.R.: Welding of Aluminium alloys to steel, Welding and Surfacing Reviews, Vol 9. 1998
- /34/ Hackenberg, U.; Dick, M.; Isgen, D.: Der Audi R8. In: ATZ (2007) 2, S. 98 - 113
- /35/ Venier, F.: Innovative Karosserie-Mischbauweise beim neuen Audi TT. In: Aluminium Praxis 1-2 (2007), S. 6 - 7

- /36/ Bauer, C.: Handbuch der Verbindungstechnik. Hrsg.: Bauer, C., München - Wien : Hanser, 1991,ISBN 3-446-14609-1, Seite 179
- /37/ Regener, D.; Göllner, J.; Hahn, O.; Hußmann, D.: Füge- und Korrosionsuntersuchungen an Stanznietverbidnung aus Chrom-Nickel-Stahl und oberflächenveredelten Feiblechen. Hannover : Druckteam GmbH, 2007 ISBN 978-3-86776-295-3
- /38/ DIN8593
- /39/ <http://de.wikipedia.org/wiki/Durchsetzf%C3%BCgen>, Mai 2009
- /40/ Schmid, G.; Wetter, h.: Stanzniet- und Hybridfügeverfahren im Karosseriebau. In: Join-tec 2005, Halle (Saale)
- /41/ [http://de.wikipedia.org/wiki/Falz_\(Fertigungstechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Falz_(Fertigungstechnik))
- /42/ Matthes, K.-J.; Riedel, F. : Fügetechnik: Überblick, Löten, Kleben, Fügen durch Umformen; Fachbuchverlag Leipzig; Seite 247-250; ISBN 3-446-22133-6
- /43/ DIN 8593-8
- /44/ Beitz, W., Grote, K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer Verlag; 19. Auflage Seite G26
- /45/ http://de.wikipedia.org/wiki/Kleben_März2011
- /46/ Haberhauer, H., Bodenstein, F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung, Springer-Verlag, 11. Auflage, Seite 104
- /47/ Killing, R.; Killing, U.: Kompendium der Schweißtechnik. 2. Düsseldorf : DVS_Verlag, 2002 ISBN 3-87155-205-4
- /48/ Bethke, U.: Fügetechnik im Umbruch. In: Lösung für die Verarbeitung moderner Blechwerkstoffe, März 2004, Fellbach bei Stuttgart; Seite 7
- /49/ Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung. 2. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009 ISBN 978-3-8351-0005-3
- /50/ U. Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, 3.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- /51/ R. Poprawe: Lasertechnik für die Fertigung, Springer-Verlag Heidelberg 2005

- /52/ Trumpf GmbH & Co. KG: Laserbearbeitung: TLF-Laser - Grundlagen, Aufbau und Einsatz, Technische Information der Trumpf GmbH & Co. KG, Ausgabe 10/2000, Ditzingen: Trumpf GmbH & Co. KG, 2000
- /53/ W. Danzer, F. Dausinger: Gaseinfluss beim Schweißen mit Scheibenlaser und Faserlaser, Linde AG; IFSW Universität Stuttgart, SLT '03
- /54/ DIN 8585 Teil1; Mai 1979
- /55/ Beitz, W., Grote, K.-H.; Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau; 19. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997
- /56/ Böge, A.; Das Techniker Handbuch; 15. Auflage; Vieweg Verlagsgesellschaft Braunschweig; 1999
- /57/ www.brazetec.com/brazetec/content/pdf/loetverfahren.pdf; 02.08.06
- /58/ Bargel, H.-J., Schulze, G.; Werkstoffkunde; 7.Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2000, Seite 85
- /59/ Bargel, H.-J., Schulze, G.; Werkstoffkunde; 7.Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2000, Seite 26
- /60/ Kreuzburg, K.: Aspekte des Laserstrahlötens von metallischen und keramisch-metallischen Verbindungen; Fortschrittsberichte VDI-Reihe 2 NR. 421, VDI-Verlag Düsseldorf 1997
- /61/ Fritz, A.-H., Schulze, G.: Fertigungstechnik; Springer Verlag Heidelberg, 2006; Seite 210-221
- /62/ Rudnik, Y.; Weichlöten in der Elektronik – Anweisungen zum Praktikum; Oktober 2004
- /63/ Müller, W.; Metallische Lotwerkstoff – Arten, Eigenschaften, Verwendungen; DVS-Verlag Düsseldorf; 1990
- /64/ Bargel, H.-J., Schulze, G.; Werkstoffkunde; 7.Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2000, Seite 86
- /65/ Petrunin, I.E.; Handbuch Löttechnik; Verlag Technische GmbH Berlin; 1991
- /66/ Dorn, L. u.a.: Hartlöten-Grundlagen und Anwendungen; Kontakt und Studium, Band 146, Expert Verlag 1985; Seite 59-74

- /67/ Kellein, N.; Herstellung von Hybridverbindungen aus nicht artgleichen Feinblechwerkstoffen mittels Laserstrahl-löten, Diplomarbeit IW Hannover; November 2003
- /68/ Schoer, H.; Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen; DVS-Verlag Düsseldorf; 2002
- /69/ Zaremba, P.: Hart- und Hochtemperaturlöten; Die Schweißtechnische Praxis Band 20, DVS-Verlag Düsseldorf; 1988
- /70/ Haferkamp, H.; Kaschner, M.: Handbuch der Verbindungstechnik. Hrsg.: Bauer, C., München - Wien : Hanser, 1991.
- /71/ FOR505; Hochleistungsfügetechnik für Hybridstrukturen; TP1; Zwischenbericht 2005
- /72/ Kreimeyer, M., Wagner, F., Vollertsen, F.: Einfluß von Zinkschichten beim Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Überlappverbindungen; Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, Aachen, DVS-Berichte Band 231, Seite 223-227; 2004
- /73/ Aichle, G.: Verschweißen von Aluminium mit Stahl. In: Industriebedarf 5-6 (2009), Seite 14-16
- /74/ Grund, T.; Trommer, F.; Wielage, B.: Entwicklung eines „Controlled-Atmosphere-Brazing“-Verfahrens zum Fügen von Aluminiumguss- und Aluminiumknetlegierungen; Schweißen und Schneiden 58 (2006) Heft 11; Seite 608-613
- /75/ Lau, K.; Jäger, S.; Bach, F.-W.: Elektronenstrahlfügen an Atmosphäre von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen; DVS Berichte Band 244 Seite 112–118. 2007
- /76/ Suslov, A. A.: Using metallic coatings for brazing aluminium alloys. In: Welding international 10 (1996) 7, S. 563-564
- /77/ Bügrel, R.: Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik Band 2; Vieweg und Teubner-Verlag, 2005, Seite 56
- /78/ Klocke, F., Senster, P.: Laserstrahl-löten von Aluminiumlegierungen; Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen DVS-Berichte Band 231; DVS-Verlag Düsseldorf 2004

- /79/ Beitz, W., Grote, K.-H.; Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau; 19. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997
- /80/ Böge, A.; Das Techniker Handbuch; 15. Auflage; Vieweg Verlagsgesellschaft Braunschweig; 1999
- /81/ Klein, R., Abram, L.; Flussmittelarmes Laserhartlöten von Karosseriewerkstoffen; Abschlusspräsentation des Verbundprojekts „Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern (Fügen)“ am 20.03.1996, Hrsg. VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf, 1996
- /82/ N., N.: Branchentreffen - Boom der Aluminium 2008. In: Automotive Materials (2008) 05, Seite 40-41
- /83/ VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien: Fügen mit Festkörperlasern, Laser in der Materialbearbeitung; Laser in der Materialbearbeitung, Band 6; VDI; Düsseldorf; 1996
- /84/ Hannebuth, H.: Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik. Erlangen : Meisenbach Verlag Bamberg, 1996 ISBN 3-87525-074-5
- /85/ Albert, F.; Grimm, A.; Kageler, A.; Kageler, C.; Schmidt, M.: Laser-based welding and brazing in automotive production investigations to reduce failures and imperfections. In: 3rd Laser Technologies in Welding and Materials Processing, 2007, Kiev
- /86/ Bethke, U.; Gigengack, T.: Fügetechnik im Umbruch: Neue Blechwerkstoffe und Karosseriekonzepte und ihre Auswirkungen auf die Fügetechnik im Automobilbau. In: Lösung für die Blechverarbeitung moderner Blechwerkstoffe, EFB-Kolloquium. 24
- /87/ Hornig, H.: Praxis des Laserstrahlhartlötens im Fahrzeugbau. In: 5. Laser-Anwenderforum`06, 2006, Bremen
- /88/ Poprawe, R.: Lasertechnik in der Fertigung. Berlin : Springer, 2005 ISBN 3-540-21406-3
- /89/ Förster, D.; Müller, W.: Laser in der Materialbearbeitung. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig, 2001

- /90/ Lau, K.: Nonvakuum-Elektronenstrahlfügen von beschichteten Stahlfeinblechen und Stahl-Aluminium-Mischverbindungen. Garbsen : PZH Verlag, 2006 ISBN 3-939026-15-8
- /91/ Laukant, H.: Laserschweiß-Löten von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: Mechanisch-technologisches Eigenschaftsprofil und mikrostrukturelle Charakterisierung. Berlin : Verlag Dr. Köster, 2007 ISBN 978-3-89574-613-4
- /92/ Reisgen, U.; Steiners, M.: Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: Schweißen oder Löten? Die Kombination zweier etablierter Fügetechnologien macht Unmögliches möglich; Schweißen und Schneiden 62 (2010) Heft 5; Seite 278-284
- /93/ Staubach, M.; Jüttner, S.; Füssel, U.; Dietrich, M.: Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen mit energiereduziertem MSG-Verfahren und Zusatzwerkstoffen auf Aluminium- und Zinkbasis; Schweißen und Schneiden 59 (2007) Heft 6; Seite 302-313
- /94/ Kammer, C.: Aluminium-Taschenbuch. 15. Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 1998 ISBN 3-87017-241; Seite 158
- /95/ Achar, D. R. G. et. al.: Verbinden von Aluminium mit Stahl, besonders durch Schweißen; Aluminium 56, Heft 2–4; 1980
- /96/ Eichhorn, F.; Emonts, M.; Leuschen, B.: Widerstandspunktschweißen der Werkstoffkombinationen Aluminium-Stahl; Schweißen und Schneiden, Heft 1, DVS-Verlag (1982) Seite 15-20
- /97/ Geberhardt, E.; Obrowski, W.: Reaktionen von festem Eisen mit Schmelzen aus Aluminium und Aluminiumlegierungen; Zeitschrift für Metallkunde, Band 44 (1953), Seite 154-160
- /98/ Radscheidt, C.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl; Dissertation Uni Bremen; Verlag BIAS; 1997
- /99/ Wagner, F.; Zerner, I.; Kreimeyer, M.; Sepold, G.: Phasenbildung beim Laserstrahlfügen von Fe/Al-Verbindungen; DVS-Berichte Band 212; 2001; Seite 93-98

- /100/ Agudo, L.; Eyidi, D.; Schmaranzer, C. H.; Arenholz, E.; Jank, N.; Bruckner, J.; Pyzalla, A. R.: Intermetallic FeAl-phases in a steel/Al-alloy fusion weld. In: Journal Material science 42 (2007), Seite 4205-4214
- /101/ Bruckner, J., Himmelbauer, K., Hackel, H.: Der CMT-Prozess und seine Möglichkeiten, im speziellen das Fügen von Stahl und Aluminium; Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, Aachen, DVS-Berichte Band 231, Seite 201-204; 2004
- /102/ Ozaki, H.; Kutsuna, M.: Laser roll welding of dissimilar metal joint of zinc coated steel and aluminium alloy. In: ICALEO 2006; Seite 298-302
- /103/ Braumöller, J.: Beitrag zum flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten von Aluminiumwerkstoffen. , 2000
- /104/ N.N.: Umfangreiches Bearbeitungsspektrum, Automotive Materials November 07, Geisel Verlag GmbH, 2007
- /105/ N.N.: Aluminium-Taschenbuch – Band1: Grundlagen und Werkstoffe, Aluminium-Verlag Düsseldorf 15.Auflage 1995
- /106/ Nielsen, H.: Aluminium-Taschenbuch; 13. Auflage; Aluminium-Verlag Düsseldorf; 1975; ISBN 3-87017-106-5
- /107/ Bergmann, W.: Werkstofftechnik. 5. München : Carl Hanser Verlag, 2005 ISBN 3-446-22576-5; Seite 183-186
- /108/ Bargel, H.; Schulze, G. 8.: Werkstoffkunde. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004 ISBN 3-540-40114-8, Seite 58
- /109/ Bergmann, W.: Werkstofftechnik. 5. München : Carl Hanser Verlag, 2005 ISBN 3-446-22576-5; Seite 200
- /110/ Reinhold, B.: Oberflächenschutz im automobilen Leichtbau. In: Oberflächentage 2003. Bremen, 2003. S. 41-47
- /111/ Reinhold, B.; Strobel, C.: Vermeidung von Kontaktkorrosion an Leichtmetallen. In: 25. Ulmer Gespräche 2003; Seite 35-48
- /112/ Ream, Stanley; High-Speed Fiber Laser Welding for Fuel Cell Components, ICALEO 2006 Congress Proceedings, Paper 1302

- /113/ Schöndorf, P.: Lotentwicklung für das Niedertemperatlöten von Aluminium, Stahl und Kupfer. In: 2. Werkstofftechnisches Kolloquium Chemnitz, Chemnitz. S. 124-138
- /114/ Quadackers, W. J.: Konstruktion von Aluminiumbasissystemen - Grundlagen für Verfahren und Lotentwicklung zum Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen. Aachen : RWTH Aachen, 1981
- /115/ Schöndorf, P.: Lotentwicklung für das Niedertemperatlöten von Aluminium, Stahl und Kupfer. In: 2. Werkstofftechnisches Kolloquium Chemnitz, Chemnitz. S. 124-138
- /116/ Kötzing, B.: Entwicklung niedrigschmelzender Aluminiumbasislote zum Fügen höherlegierter Aluminiumwerkstoffe. Aachen: RWTH Aachen, 1996 ISBN 3-89653-136-0
- /117/ Wagner, F.; Zerner, I.; Kreimeyer, M.; Seefeld, T.; Sepold, G.: Characterization and Properties of Dissimilar Material Combinations. In: ICALEO 2006
- /118/ Kostka, A.; et. al.,: Charakterisierung der Mikrostruktur und Verformung in Stahl-Aluminium-Reibrührschweißverbindungen. In: Umformtechnik im Spannungsfeld zwischen Plastomechanik und Werkstofftechnik. Hrsg.: Steinhoff, K., Bad Harzburg, 2008; Seite125-131
- /119/ Doege, E.; Behrens, B.: Handbuch der Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen. 1.:Springer-Verlag, 2006 ISBN 3-540-23441-1; Seite 262
- /120/ Laukant, H.; Wallmann, C.; Korte, M.; Glatzel, U.: Flux-less joining technique of aluminium with zinc-coated steel sheets by a dual spot laser. In: Advanced Materials Research (2005) 6-8, S. 163-170
- /121/ Laukant, H.; Wallmann, C.; Korte, M.; Glatzel, U.: Fluxless laserbeam joining of aluminium with zinc coated steel. In: Science and technologie of welding and Joining 10 (2005) 2, S. 219-226

Lebenslauf

Name: von der Haar, geb. Becker
Vorname: Christian
Geburtsdatum: 01. Juli 1982
Geburtsort: Münster
Familienstand: verheiratet

Wissenschaftlicher Werdegang:

Assistent der Werkleitung bei der Pro Beam KG a.A. in Braunschweig
(Dezember 2009 - heute)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Fügetechnik am Laser Zentrum
Hannover e.V. (Dezember 2006 – November 2009)

Studentische Hilfskraft am Laser Zentrum Hannover e.V.
(Mai 2003 – November 2006)

Schulischer Werdegang:

Studium: 9 Semester Grund- und Hauptstudium Maschinenbau an der Leibniz
Universität Hannover (Oktober 2002 – November 2006)

Schulbesuch: 13 Jahre Grundschule und Gymnasium in Greven
(Herbst 1988 – Sommer 2001)

Pflichtdienst:

Panzerartilleriebataillon 205 in Dülmen
(September 2001 – Mai 2002)

Betriebspraktika:

Gebr. Echterhoff GmbH & Co. KG, Westerkappeln
(Juni 2002 – August 2002, September 2003)

SAM Stahlurm- und Apparatebau Magdeburg, Magdeburg
(September 2004 – Oktober 2004)

Robert Bosch GmbH, Bamberg
(April 2006 – Juni 2006)

Liste der persönlichen Veröffentlichungen

- [1] Kallage, P.; Haar, C. von d.; Barcikowski, S.; Kracht, D.; Haferkamp, H.: Verifikation verschiedener Lotlegierungen für das Laserstrahllöten von umformfähigen Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium. In: *LÖT 2010* Bd. DVS Berichte 283. Aachen, 15-17. Juni 2010
- [2] Bach, F.-W.; von der Haar, C.: Endbericht der FOR505; PZH-Verlag; ISBN 978-3-94141-35-2
- [3] Stahlhut, C.; Haar, C. von d.; Kallage, P.; Herzog, D.; Haferkamp, H.; Bach, F. W.; Reimche, W.; Zwoch, S.: Wirbelstromtechnik - ein neues Verfahren zur Detektion von Nullspaltfugen beim Laserstrahlschweißen. In: *Schweißen & Schneiden* 61 (2009), Nr. 9, S. 520–527
- [4] Stahlhut, C.; Haar, C. von d.; Kallage, P.; Herzog, D.; Haferkamp, H.; Bach, F.-W.; Reimche, W.; Zwoch, S.: Eddy current technology - a new procedure for the detection of zero-gap grooves during laser welding. In: *Welding and Cutting* 8 (2009), Nr. 6, S. 358–364
- [5] Stahlhut, C.; Haar, C. von d.; Kallage, P.; Herzog, D.; Haferkamp, H.; Zwoch, S.; Reimche, W.; Bach, F.-W.: Wirbelstromsensortechnik als Nahtverfolgungssystem zum Laserstrahl-fügen von Blechen im Stumpfstoß mit technischem Nullspalt. In: *Große Schweißtechnische Tagung*. Essen, 14.-19. September 2009, S. 81–86
- [6] Haar, C. von d.; Engelbrecht, L.; Meier, O.; Ostendorf, A.; Haferkamp, H.: Tailored hybrid blank production - New joining concepts using different solders. In: *Journal of Laser Applications* 20 (2008), Nr. 5, S. 224–229
- [7] Meier, O.; Kallage, P.; Haar, C. von d.: Laserschweißen kombiniert mit Wirbelstromtechnik. In: *Laser Technik Journal* (2008), Nr. 2, S. 35–37
- [8] Becker, C.; Engelbrecht, L.; Meier, O.; Ostendorf, A.; Haferkamp, H.: Laser beam brazing of steel-aluminium-connections - a step towards tailored hybrid blank fabrication. In: *2007 International Automotive Body Congress*. Berlin, 17.-19. Juni 2007, S. 156–160

- [9] Becker, C.; Engelbrecht, L.; Meier, O.; Ostendorf, A.; Haferkamp, H.: Prozessvarianten zum Laserstrahllöten von umformfähigen Tailored Hybrid Blanks aus Stahl und Aluminium. In: *Konferenz der Hart- und Hochtemperaturlöttechnik - LÖT* Bd. DVS-Berichte 243. Aachen, 19.-21. Juni 2007, S. 183–189