

Diplomarbeit

von

Kemal Mucić

Verbinden von Li-Ionen Zellen für Automotive Batteriepakete

erstellt am:

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

in Zusammenarbeit mit:

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG,
Graz.

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Vallant

Dipl.-Ing. Dr.techn. Milan Pudar

Graz, Dezember 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am.....

.....
(Kemal Mucić)

Aus der vorliegenden Diplomarbeit ist der folgende wissenschaftliche Beitrag im Tagungsband der JOIN- EX 2010 (Internationaler Fachkongress der Schweiss- und Verbindungstechnik) veröffentlicht:

[1] Mucic, K.; Pudar, M.; Enzinger, N.; Vallant, R.; Pasic, H.; Trummer, W.:
„Verbinden von Li-Ionen Zellen für Automotive Batteriepakete“, Tagungsband der JOIN- EX 2010, S. 13/1 - 13/13.

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand in enger Zusammenarbeit des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der Technischen Universität Graz und der MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei den Personen bedanken die mir die Möglichkeit gaben ein sehr interessantes Themengebiet kennenzulernen, mich während dieser Zeit motivierten sowie tatkräftig unterstützten:

Bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch, der mir die Durchführung dieser Diplomarbeit seitens der Technischen Universität Graz genehmigt und umfangreiche Untersuchungen ermöglicht hat.

Meinen Betreuern Dipl.-Ing. Dr.techn. Milan Pudar und Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Vallant, gilt mein besonderer Dank für Ihre ständige Bereitschaft mich in meiner Arbeit zu unterstützen, fördern und motivieren.

Bedanken möchte ich mich auch bei dem gesamten Team der Werkstofftechnik - Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG unter Leitung von Dipl.-Ing Josef Neges, das mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Insbesondere möchte ich mich dabei bei Dipl.-Ing. Wilhelm Trummer bedanken der mir das detaillierte Untersuchen von Problemstellungen mittels der statistischen Versuchsplanung näherbrachte.

Mein Dank gilt auch Dipl.-Ing. Haris Pasic für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und Anregungen.

Ein herzliches Dankeschön an die Firmen IPG Laser GmbH, Burbach, Deutschland, Branson Ultrasonidos S.A.E., Barcelona, Spanien und Fronius International GmbH, Wels, Österreich für die Unterstützung bei den durchgeführten Schweißversuchen.

Abschließend gebührt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern, meiner Schwester und meiner Freundin, die mir während des Studiums immer zu Seite standen und mich finanziell und in jeder anderen Art und Weise unterstützt haben.

Kemal Mucić

Kurzfassung

Hohe Energiedichte, lange Lebensdauer sowie die sehr gute Überwachbarkeit durch das Batterie-Management-System, sind Eigenschaften die Li-Ionen Zellen zu dem Energiespeicher für zukünftige Hybrid- und Elektrofahrzeuge prädestinieren.

Das Verbinden der Zellen innerhalb eines Modules und das Verbinden der Module zu einer Batterieeinheit wird durch die begrenzte Zugänglichkeit, den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe, die eingeschränkte zulässige Wärmeeinbringung sowie geringe Blechdicken stark erschwert.

In der vorliegenden Arbeit wurde unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) die Eignung von Ultraschall- und Laserschweißen zum Fügen von oben genannten Elementen untersucht. Dünnscheiben (Blechdicke $\leq 0,5\text{mm}$) aus Aluminium, Bronze und vernickeltem Kupfer wurden ultraschall – und lasergeschweißt. Es wurden detaillierte metallographische, licht- und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur Charakterisierung der Verbindungsqualität durchgeführt. Die statischen Festigkeitseigenschaften der Verbindungen wurden quantifiziert, und mit der Statistiksoftware Minitab 15 ausgewertet. Dabei wurden die signifikanten Einflussfaktoren der angeführten Schweißverfahren festgestellt, sowie die optimalen Schweißereinstellungen, die eine hohe Qualität und Reproduzierbarkeit der Schweißverbindung für den Serienprozess liefern, bestimmt.

Abstract

Li ions cells are predestine to the energy accumulator for future hybrid vehicles and electro mobiles due to their qualities like: high energy density, long life span, as well as very good monitoring by the battery management system. The bonding of the cell within a module and the bandaging of the modules to a battery unit is strongly complicated by the limited accessibility, the application of different materials; the limited allowed heat input as well as low metal-thickness. In the present work the suitability of ultrasonic and laser welding for joining from above called elements was examined by the application of the Design of Experiment (DoE) method. Thin sheets (metal thickness $\leq 0,5\text{mm}$) of aluminum, bronze and nickel-plated copper were ultrasonic and laser welded. Detailed microscopic and SEM investigations were carried out to characterize the joint quality. The tensile strength of the joint was tested and evaluated with the statistics software Minitab 15®. In addition, the significant factors of the cited welding processes were ascertained and the optimum welding parameters which deliver a high quality and ability for repeatability of the welding joint for the serial production were determined.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	5
1 Einleitung	9
2 Aufgabenstellung	10
3 Li-Ionen Batterie	11
3.1 Das Prinzip der Li-Ionen Batterie	11
3.2 Das Batteriemanagementsystem (BMS)	13
3.3 Verbinden der Li-Ionen Batterie mit dem Batteriemanagementsystem	14
4 Untersuchte Werkstoffe	15
4.1 Aluminium	15
4.2 Kupfer	17
4.3 Zinnbronze (CuSn6)	18
5 Schweißverfahren	19
5.1 Ultraschallschweißen	19
5.1.1 Ultraschalltechnik	19
5.1.2 Geschichte des Ultraschallschweißens	19
5.1.3 Einordnung des Verfahrens	19
5.1.4 Aufbau und Wirkungsweise einer Ultraschallschweißmaschine	20
5.1.5 Schweißparameter	22
5.1.6 Prozess der Verbindungsbildung	24
5.1.7 Vor und Nachteile des Verfahrens	26
5.1.8 Verwendete Anlage	27
5.2 Laserschweißen	28
5.2.1 Lasertechnik	28
5.2.2 Geschichte des Laserschweißens	28
5.2.3 Einordnung des Verfahrens	29
5.2.4 Aufbau und Wirkungsweise eines Faserlasers	29
5.2.5 Prozess der Verbindungsbildung	32
5.2.6 Schweißparameter	33
5.2.7 Vor- und Nachteile des Verfahrens	35
5.2.8 Verwendete Anlage	36
6 Angewendete Prüfverfahren	37
6.1 Sichtprüfung	37
6.2 Funkenspektralanalyse	37
6.3 Härtemessung	38
6.4 Statischer Zugscherversuch	39
6.4.1 Probengeometrie für den statischen Zugscherversuch	39
6.5 Metallographische Untersuchungen	41
6.6 Rasterelektronenmikroskopie	42
7 Statistische Versuchsplanung	43
7.1 Geschichte und Entwicklung der statistischen Versuchsplanung	43

7.2	Grundlegende Prinzipien und Begriffe der statistischen Versuchsplanung	43
7.3	Vorgehensweise bei der statistischen Versuchsplanung	44
8	Ergebnisse der Zugscherversuche für das Ultraschallschweißen-statistische Versuchsplanung	48
8.1	Screeningversuch	48
8.1.1	Zielgrößenbestimmung	48
8.1.2	Einflussgrößen bestimmen	49
8.1.3	Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen	51
8.1.4	Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen	52
8.1.5	Versuchsdurchführung	53
8.1.6	Auswertung und Ergebnisse	53
8.1.7	Signifikate Versuchsfaktoren	55
8.1.8	Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße	57
8.2	Hauptversuch	58
8.2.1	Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen	58
8.2.2	Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen	58
8.2.3	Versuchsdurchführung	58
8.2.4	Auswertung und Ergebnisse	59
8.2.5	Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße	61
8.3	Bestätigungsversuch und Schlussfolgerung	63
9	Ergebnisse der Zugversuche für das Laserschweißen -statistische Versuchsplanung	66
9.1	Screeningversuch	66
9.1.1	Zielgrößenbestimmung	66
9.1.2	Einflussgrößen bestimmen	66
9.1.3	Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen	68
9.1.4	Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen	69
9.1.5	Versuchsdurchführung	69
9.1.6	Auswertung und Ergebnisse	70
9.1.7	Signifikante Versuchsfaktoren	72
9.1.8	Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße	73
9.2	Hauptversuch	77
9.2.1	Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen	77
9.2.2	Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen	77
9.2.3	Auswertung und Ergebnisse	79
9.2.4	Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße	82
9.3	Bestätigungsversuch und Schlussfolgerung	84
9.4	Weitere Untersuchungen der Laserschweißverbindungen	87
9.4.1	Einfluss des Fügespaltes	87
9.4.2	Herstellung der Schweißverbindung durch Steps	90
9.4.3	Härteprüfung	92
9.4.4	REM Untersuchungen	95
10	Zusammenfassung und Ausblick	97
11	Anhang	98
11.1	Chemische Analysen zu den verwendeten Grundwerkstoffen	98
11.1.1	Aluminium	98
11.1.2	CuSn6	99
11.1.3	Cu(Ni)	100
11.2	Zugversuche	102
11.2.1	Zugversuche des Grundwerkstoffes	102

11.2.2	Zugversuche des Screeningversuchs für das Ultraschallschweißen (Al-Al)	105
11.2.3	Zugversuche des Screeningversuchs für das Ultraschallschweißen (CuSn6-Cu(Ni))	107
11.2.4	Zugversuche des Hauptversuches für das Ultraschallschweißen (Al-Al)	109
11.2.5	Zugversuche des Hauptversuchesversuchs für das Ultraschallschweißen (CuSn6-Cu(Ni))	111
11.2.6	Zugversuche des Bestätigungsversuchs für das Ultraschallschweißen (Al-Al)	113
11.2.7	Zugversuche des Bestätigungsversuchs für das Ultraschallschweißen (CuSn6-Cu(Ni))	114
11.2.8	Zugversuche des Screeningversuchs für das Laserschweißen (Al-Al)	115
11.2.9	Zugversuche des Screeningversuchs für das Laserschweißen (CuSn6-Cu(Ni))	117
11.2.10	Zugversuche des Hauptversuches für das Laserschweißen (Al-Al)	120
11.2.11	Zugversuche des Hauptversuches für das Laserschweißen (CuSn6-Cu(Ni))	123
11.2.12	Zugversuche des Bestätigungsversuches für das Laserschweißen (Al-Al)	127
11.2.13	Zugversuche des Bestätigungsversuches für das Laserschweißen (CuSn6-Cu(Ni))	128
11.2.14	Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Spalt - (Al-Al)	129
11.2.15	Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Spalt - (CuSn6-Cu(Ni))	130
11.2.16	Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Step - (Al-Al)	131
11.2.17	Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Step - (CuSn6-Cu(Ni))	132
11.3	Härteprüfung	133
11.3.1	Probe:1/14MR	133
11.3.2	Probe 1/8MR	134
11.3.3	Probe 1/12MR	135
11.3.4	Probe: 3/2 MR	136
11.3.5	Probe 3/5 MR	137
11.3.6	Probe 3/11 MR	138
11.4	REM und EDX-Untersuchungen	139
11.4.1	Probe 3/2 MR	139
11.4.2	Probe 3/5 MR	140
12	Abbildungsverzeichnis	141
13	Tabellenverzeichnis	142
14	Literaturverzeichnis	143

1 Einleitung

Magna Steyr produziert ab August in Graz Lithium-Ionen-Batterien für die schwedische Volvo-Gruppe. [1] War die Schlagzeile die uns im Sommer 2009 von der hiesigen Medienwelt erreichte. Ein Großauftrag der Volvo Gruppe der allein in Graz 50 weiteren Mitarbeitern Beschäftigung bietet. Die zu produzierenden 120-KW-Speichersysteme auf Lithium-Ionen-Basis werden in City Bussen, Verteilerlastwägen und Müllfahrzeugen verschiedener Marken der Gruppe, die mit einem Parallelhybridsystem ausgestattet sind, zur Anwendung kommen. [1]

Die Li-Ionen Akkumulatorsysteme besitzen im Verhältnis zu den bislang in Elektro- und Hybridfahrzeugen gebräuchlichen Nickel-Metallhydrid Akkumulatoren eine höhere Energiedichte [Wh/kg] (siehe Abbildung 1). [2]

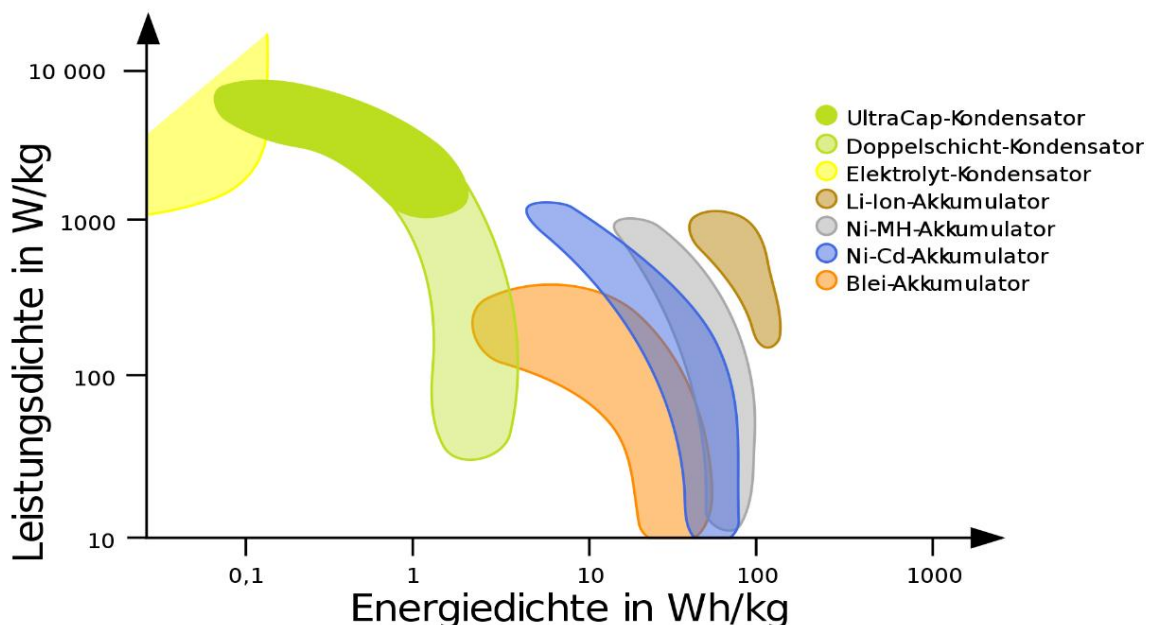


Abbildung 1: Ragone Diagramm [2]

Ein Ragone-Diagramm dient zum Vergleich unterschiedlicher Energiespeichertechnologien. In ein kartesisches Koordinatensystem wird die Leistungsdichte in Abhängigkeit von der spezifischen Energie dargestellt. [2]

Durch die höhere Energiedichte die die Li-Ionen Akkumulatoren besitzen können sie mehr Energie abgeben womit das Fahrzeuggewicht gesenkt, die Reichweite des Fahrzeuges erhöht sowie in den Leistungsspitzen Energie schneller an den Motor bereitgestellt werden kann.

Ungeachtet oben genannter Vorteile und auch relativ niedriger Produktionskosten wurden die Lithium-Ionen Batterien, obwohl bereits Anfang des 20. Jahrhunderts erfunden, aufgrund hoher Empfindlichkeit bei Ladungsvorgängen, als Antriebsquelle im Fahrzeugbau gemieden.

Weitere Entwicklungen in der Elektronik sowie Integrierte Schaltkreise in Verbindung mit dem Battery Management and Monitoring System (BMS) haben die Sicherheit beim Laden, Entladen und thermischer Überlastung der Batterie stark verbessert.

Batterieeinheiten, in denen zur Spannungserhöhung mehrere Zellen in Reihe geschaltet werden (Module), verfügen oft auch über eine Elektronik, die durch sog. "Cell-Balancing" Ladung und Entladung für jede einzelne Zelle individuell regelt. [2]

2 Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war die systematische Untersuchung des Fügens der Li-Ionen Zellen innerhalb eines Modules (d.h. das Verbinden der Zelle mit dem Connector Conversion Board bzw. dem Batterie Management) sowie das Verbinden der Module zu einer Batterieeinheit.

Die wichtigsten Herausforderungen an die Füge-technik bei dem Verbinden der Module zu einer Li-Ionen Batterieeinheit sind in diesem Fall:

- die begrenzte Zugänglichkeit
(Abstand der Connector Conversion Board (CCB) Pole) $\leq 10\text{mm}$
- die eingeschränkte zulässige Wärmeeinbringung max. Temperatur 80°C
20mm von der Füge-stelle
- Verbinden von artfremden Werkstoffen
- sowie geringe Blechdicken (im vorliegenden Fall 0,3-0,5 mm) der verwendeten Versuchsmaterialien.

Ausgehend von diesen Anforderungen wurden im Rahmen einer Benchmark Studie Ultraschall- und Laserschweißen als aussichtsreichste Fügeverfahren für die genannte Aufgabe bestimmt.

An beiden Fügeverfahren sollten anhand der statistischen Versuchsplanung eine systematische Untersuchung der Auslegung eines robusten Serienprozesses sowie die Ermittlung der Schweißparameter zur Fertigung von Batteriemodulen gelingen.

Im Detail wurden für die Diplomarbeit folgende Teilziele definiert:

1. Identifizierung der wichtigen Schweißparameter die sich auf die Güte und die Festigkeit der Ultraschall- und Laserschweißverbindungen von ausgewählten Werkstoffen (Bronze, vernickeltes Kupfer und Aluminium) auswirken.
2. Bestimmung der Signifikanz dieser Schweißparameter
3. Ausarbeitung der optimalen Schweiß-einstellungen zum Erzielen der max. Festigkeit der Verbindungen
4. Beurteilung der Einsetzbarkeit der Schweißverfahren (angesichts der Schweiß-einstellungen) für eine robuste Serienproduktion.

3 Li-Ionen Batterie

3.1 Das Prinzip der Li-Ionen Batterie [57]

Die Li-Ionen Batterien gehören zu den elektrochemischen Stromquellen. Eigentlich ist „Batterie“ der Oberbegriff für mehrere in Serie geschaltete galvanische Zellen (oder galvanische Elemente), die zu einem Modul zusammengefasst in einem Batteriegehäuse untergebracht sind. (siehe Abbildung 2)



Abbildung 2: Zusammensetzung der Li-Ionen Batterie [50]

Im Prinzip besteht eine galvanische Zelle aus dem Elektrolyten, dem Gehäuse und natürlich den zwei Elektroden. (siehe Abbildung 3) Zusätzlich sind die Elektroden noch durch einen für Ionen durchlässigen, aber immer für Elektronen undurchlässigen Separator gegeneinander isoliert, um einen Kurzschluss durch internen Elektrodenkontakt zu vermeiden. Die sogenannten „Aktivmassen“ sind die eigentlichen Speicher der chemischen Energie in der Batterie. Durch ihren elektrochemischen Umsatz an den Elektroden wird die elektrische Energie bei der Entladung freigesetzt. [3,57]

Diese energieliefernde Reaktion, die Entladung, ist aus zwei räumlich getrennten, aber miteinander gekoppelten Teilreaktionen (Elektrodenreaktionen) zusammengesetzt (Abbildung 3). Die Elektrode, bei welcher die entsprechende Teilreaktion bei einem im Vergleich zur anderen Elektrode niedrigeren Redoxpotential abläuft, ist die negative Elektrode - (Aluminium-Kathode), die andere die positive Elektrode + (Kupfer-Anode). Bei der Entladung der Zelle findet an der negativen Elektrode ein Oxidationsprozess statt, bei welchem Elektronen freigesetzt werden; an der positiven Elektrode wird parallel dazu die entsprechende Menge von Elektronen über einen Reduktionsprozeß aufgenommen. Der Elektronenstrom fließt durch einen äußeren Verbraucherstromkreis von - nach +. Innerhalb der Zelle wird der Strom zwischen den Elektroden durch Ionen in einem ionisch leitenden Elektrolyten getragen („Ionenstrom“), wobei Ionen- und Elektronenreaktionen in/an der Elektrode miteinander gekoppelt sind. [3,57]

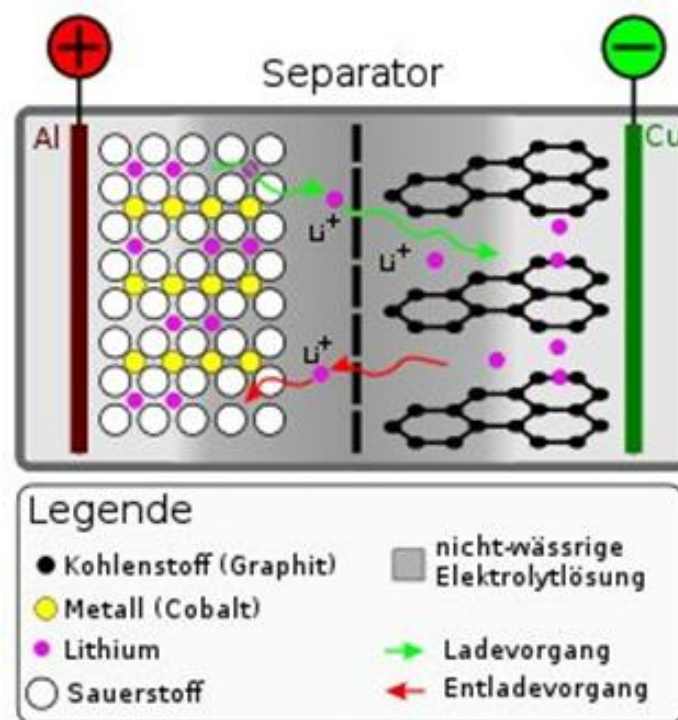


Abbildung 3: Aufbau einer Lithium-galvanischer Zelle [3]

3.2 Das Batteriemanagementsystem (BMS)

Ein Batteriemanagementsystem (BMS) ist ein Steuergerät, welches zur Überwachung und Regelung eines nachladbaren Batteriesystems dient. [4]

Die Vorteile der neuen Batteriezellen können nur durch optimierte Batteriemangement Systeme voll zur Geltung gebracht werden, die insbesondere das Auseinanderdriften der Zellen durch aktiven Ausgleich der Zellspannung schon beim Laden verhindert. [5]

Das Batterie Management System bietet besonders für mobile Anwendungen wie Hybridfahrzeuge den entscheidenden Vorteil, dass die Ladung der Batterie mittels Software überwacht und so gestaltet werden kann, dass auch der reversierende Betrieb von Elektroantrieben optimal unterstützt wird. Diese Funktionalität sorgt für sichere Funktion des Gesamtsystems und verhindert einen vorzeitigen unvorhergesehenen Ausfall der Batterie durch häufig überladene oder tiefentladene Batteriezellen. [5]

Die Kommunikation des BMS mit komplexen Fahrzeugsystemen ist eine weitere zentrale Funktionalität, um z.B. den Zustand der Batterie dem Fahrzeug bekannt zu geben oder auf kritische Betriebssituationen hinzuweisen.

Weiteres kann durch den Einsatz des BMS (Battery Management System) [6]:

- Die Lebenszeit einer Batterie verlängern
- Die Systemintegration der Batterie durchführen
- Die Ladung der Batterien optimieren durch automatischen Zellausgleich
- Hohe Flexibilität in der Zellenanzahl erreichen
- Informationen über die Batterie oder auch einzelne Zellen oder Zellgruppen erhalten
- Hohe Sicherheit der Zellen und der Anwender durch Grenzwertüberwachung erreichen
- Anpassung der Lade-/Entladezyklen an die Bedürfnisse der Anwendung
- Minimalen Stromverbrauch des BMS durch Übernahme des Elektronik Know-Hows aus der Fahrzeugtechnik erzielen

3.3 Verbinden der Li-Ionen Batterie mit dem Batteriemanagementsystem

Bei dem Fertigungsprozess in der Li-Ionen Batterieproduktion werden die beiden Elektroden (+ Elektrode und - Elektrode) der Li-Ionen Zelle durch zwei gegenüberliegende Schlitze des Connector Conversion Boards (Batteriemanagement) durchgesteckt.

Die beiden Elektroden der Batterie liegen dann an den Elektroden des Connector Conversion Boards an (siehe Abbildung 4) d.h.:

1. **Aluminium (EN AW-Al 99,5)** (+Elektrode an der Zelle) (Blechdicke 0,5mm) liegt an **Aluminium (EN AW-Al 99,5)** (+Elektrode am CCB) (Blechdicke 0,5mm) auf.
2. **vernickeltes Kupfer –Cu(Ni)** (-Elektrode an der Zelle) (Blechdicke 0,3mm) liegt an **Bronze (CuSn6)** (-Elektrode am CCB) (Blechdicke 0,3mm) auf.

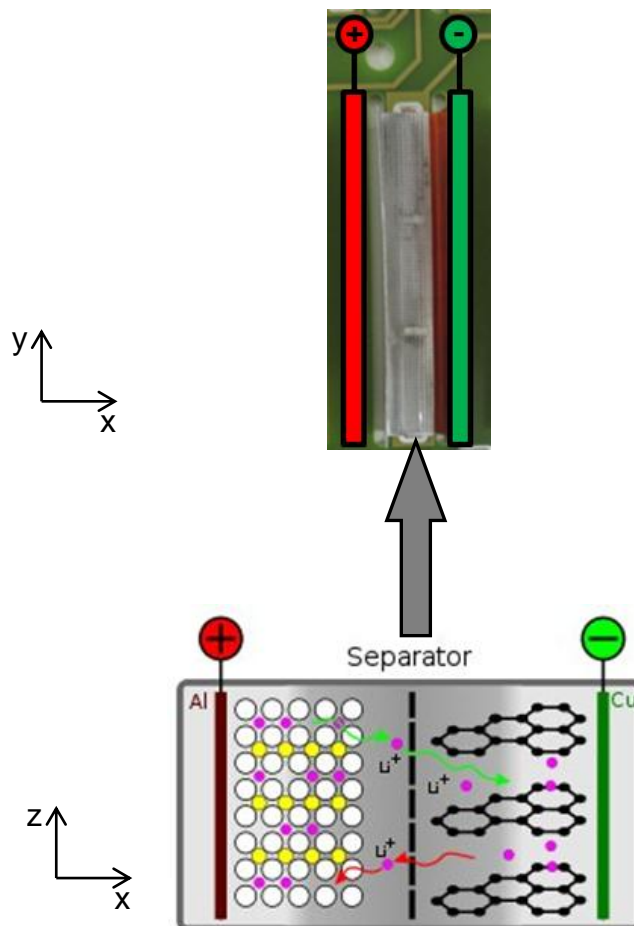


Abbildung 4: Verbinden der Li-Ionen Zelle mit dem BMS [3]

Diese beiden Fügepartner werden anschließend mit einem Schweißverfahren (Laser- oder Ultraschallschweißen) seitlich miteinander verbunden.

Somit stellen die beiden zu verbindenden Fügepartner die Grundlage weiterer Untersuchungen der Diplomarbeit dar und bestimmen den Werkstoff und die Probengeometrie die bei den Laser- und Ultraschallschweißversuchen untersucht werden.

4 Untersuchte Werkstoffe

Die bei den Schweißversuchen verwendeten Werkstoffe, wie auf Seite 14 dargestellt, wurden aufgrund der vorgegebenen Elektrodenwerkstoffe der Li-Ionen Zelle und des Connector Conversion Boards bestimmt.

In diesem Kapitel folgt ein theoretischer Abriss dieser Werkstoffe:

4.1 Aluminium

Das Leichtmetall Aluminium (von lat. alumen = Alaun) hat aufgrund einer sich sehr schnell an der Luft bildenden dünnen Oxidschicht ein stumpfes, silbergraues Aussehen. Die Oxidschicht macht Aluminium sehr korrosionsbeständig. Es ist ein sehr weiches Metall, ist dehnbar und kann durch Auswalzen zu dünner Folie verarbeitet werden. Es ist ein sehr guter elektrischer Leiter. [7]

Aluminium ist im Vergleich zu anderen Metallen noch nicht lange bekannt. Es wurde erst im Jahr 1808 durch Sir Humphry Davy entdeckt und benannt. Friedrich Wöhler gelang die Herstellung von Aluminium im Jahr 1827 basierend auf einer unreinen Form, die Hans Christian Oersted zwei Jahre zuvor hergestellt hatte. Der Preis von Aluminium war zu jener Zeit höher als der von Gold. [7]

Durch Henri Sainte-Claire Deville wurde der Wöhler-Prozess im Jahr 1846 weiter verfeinert und 1859 in einem Buch publiziert. Dadurch fiel der Aluminiumpreis innerhalb von zehn Jahren um 90 Prozent. [7]

1886 wurde unabhängig voneinander durch Charles Martin Hall und Paul Héroult das jetzt nach ihnen benannte Verfahren zur Herstellung von Aluminium entwickelt: der Hall-Héroult-Prozess. Nach diesem Prinzip erfolgt noch heute die grosstechnische Aluminiumherstellung. [7]

Heutzutage ist Aluminium das nach Stahl am häufigsten verwendete Metall. Im Substitutionswettbewerb mit anderen Werkstoffen steht es an erster Stelle und erzielt einen stetigen Zuwachs. Seine besondere Bedeutung auf den verschiedenen Gebieten der Technik hat es einer Reihe von vorteilhaften Eigenschaften zu verdanken, die es zu einem vielfältig einsetzbaren und wirtschaftlichen Werkstoff machen. Zu den wichtigsten Eigenschaften der Aluminiumwerkstoff zählen [8]:

Eigenschaft	Vor- und Nachteile
geringe Dichte $\rho=2,6-2,8 \text{ g/cm}^3$ (Reinaluminium $2,7 \text{ g/cm}^3$)	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte ρ beträgt etwa ein Drittel der Dichte von Stahl • Wesentliche Masseverringern vor allem bei mobilen Konstruktionen wie Luft-, Land- und Wasserfahrzeugen und Fördermitteln möglich
günstige Festigkeitseigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Festigkeit im Verhältnis zum geringen spezifischen Gewicht • Besondere Eignung für den Leichtbau • Mit zunehmenden Reinheitsgrad sinkt die Festigkeit, die Dehnung steigt
Gute Korrosionsbeständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Rein- und Reinstaluminium und die kupferfreie Legierungen besitzen dank einer Oxidhaut eine Beständigkeit gegen sehr viele Medien, womit sie

	<ul style="list-style-type: none"> ein breites Einsatzgebiet haben. Zusätzlicher Iberflächenschutz kann Beständigkeit weiter verbessern Oxidschicht kann durch Laugen, manche Säuren (HCl) und Salze (Halogenide) aufgelöst werden, gegen diese Stoffe ist Aluminium nicht beständig
Hohe Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 235 \text{ W/m K}$	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeleitfähigkeit viermal so hoch wie von Eisen.
Spezifische elektrische Leitfähigkeit $\kappa=34-38 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ (Reinaluminium)	<ul style="list-style-type: none"> Als elektrische Leiter werden vor allem Reinaluminium und AlMgSi-Legierungen verwendet (etwa 63% der Leitfähigkeit von Kupfer)
Gute optische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Hohes Reflexionsvermögen für Licht-, Wärme- und allgemein für elektromagnetische Strahlung
Brennbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Aluminiumwerkstoffe sind auch als Späne unbrennbar
Gute Schweißbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Die meisten Pressschweiß- und Lötverfahren sind anwendbar Schmelzschweißen durch hohe Sauerstoffaffinität meist unter Schutzgas

Tabelle 1: Eigenschaften der Aluminiumwerkstoffe

Allgemein ist eine Legierung ein Gemisch aus mindestens zwei Komponenten von denen mindestens eines ein Metall ist. [9] Bei den Aluminiumwerkstoffen werden in Abhängigkeit von der Verarbeitung Knet- und Gusslegierungen unterschieden. (Tabelle 2). Bei Knetlegierungen steht die plastische Verformbarkeit im Vordergrund, bei

Gusslegierungen sind es das Formfüllungsvermögen und die Vergießbarkeit [10,11]. Durch den Zusatz der Legierungselemente wie Kupfer, Mangan, Magnesium, Silizium und Zink sollen die niedrigen Festigkeitswerte in weiten Grenzen erhöht werden ohne dabei die gute Korrosionsbeständigkeit und Dehnbarkeit zu verlieren.

Legierungselement	Serie der Gusslegierung	Serie der Knetlegierung
unlegiert	10000	1000
Kupfer	20000	2000
Mangan		3000
Silizium	40000	4000
Magnesium	50000	5000
Magnesium und Silizium		6000
Zink und Kupfer	70000	7000
Sonstige Elemente		8000

Tabelle 2: Serien von Aluminiumlegierungen [10,11]

Die Aluminiumlegierungen werden zurzeit in acht Gruppen nach ihrer chemischen Zusammensetzung eingeteilt. Die Bezeichnung der Gruppen setzt sich jeweils aus vier oder fünf Zahlen zusammen, abhängig davon ob es sich um eine Guss-oder Knetlegierung handelt. Die Erste Zahl bezeichnet die Gruppe der Legierung, die zweite Zahl stellt die Abänderung dar. Die letzten beiden Zahlen sind zur Unterscheidung der verschiedenen Typen in einer Gruppe.

Aluminiumlegierungen der 1xxx-Serie bestehen zu 99% aus reinem Aluminium, sind nichtwärmebehandelbar, weich und dehnbar, sehr korrosionsbeständig, form- und schweißbar.

Diese Aluminiumlegierung wurde als möglicher Werkstoff der + Elektrode an der Zelle und dem CCB verwendet. Beim Reinaluminium handelt es sich um nichtlegiertes Aluminium mit Reinheitsgraden von 99-99,9%, die zulässigen Beimischungen liegen zwischen 0,1 und 1%. Hierzu zählen im wesentlichen Eisen (0,006-0,6 %) und Silicium (0,01-0,5%), weiterhin Kupfer, Titan und Zirconium sowie Spuren weiterer Elemente. [10,11]

Eine genaue chemische Zusammensetzung der verwendeten Bleche ist in dem Anhang zu entnehmen und wird hier kurz wiedergegeben (Tabelle 3):

	Al	Fe	Si	Cu	Ti
EN AW-Al 99,5	99,5	0,27	0,13	0,03	0,01

Tabelle 3: Verwendetes Aluminiumblech

4.2 Kupfer

Kupfer (lat. Cuprum) ist ein hoch schmelzendes Schwermetall und hat eine leuchtend rote Farbe. In Laufe der Zeit bildet sich an der Oberfläche eine Schicht aus, die aus grünen, basischen Kupfercarbonat, in Industriegegenden aus basischem Kupfersulfat. Sie entsteht durch die chemische Reaktion mit den Stoffen der Atmosphäre (O₂, CO₂, SO₂, H₂O) ist festhaftend und damit ein Schutz gegen weiteren Angriff. [12]

Kupfer war eins der ersten Metalle, welche die Menschheit in ihrer Entwicklung kennenlernte. Da Kupfer leicht zu verarbeiten ist, wurde es bereits von den ältesten bekannten Kulturen vor etwa 10.000 Jahren verwendet. Die Zeit seines weiträumigen Gebrauchs vom 5. Jahrtausend v. Chr. bis zum 3. Jahrtausend v. Chr. wird manchmal auch Kupferzeit genannt. [13]

Mit der zunehmenden Industrialisierung wurden außerdem andere Eigenschaften, z. B. die sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie die gute Beständigkeit gegen atmosphärische und vielfach auch chemische Einflüsse, wichtig. Kupfer kann mit vielen verschiedenen Metallen Legierungen bilden, so dass eine Vielzahl von Legierungssystemen vorhanden sind, bei denen bestimmte mechanisch-technologische Eigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit, Dehngrenze, chemische Beständigkeit, Verschleißwiderstand und andere Eigenschaften gezielt beeinflusst werden können.

Unter Berücksichtigung der besonderen physikalischen und mechanischen Eigenschaften (Tabelle 4) sind viele Kupferwerkstoffe gut schweißbar.

Eigenschaft bei 20°C	Wert
Dichte	$\rho = 8,94 \text{ g/cm}^3$
Spezifische Wärmekapazität	$c=0,386 \text{ J/(g K)}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 305 \text{ W/(m K)}$
Spezifische elektrische Leitfähigkeit	$\kappa=43 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$
Spezifischer elektrischer Widerstand	$\rho = 0,022 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
Elastizitätsmodul	$E=110 \text{ kN/ mm}^2$

Tabelle 4: Eigenschaften der Kupferwerkstoffe

Bei dem Bleche das während der Schweißversuche verwendet wurde handelt es sich um Reinkupfer mit einer 10µm Nickelschicht. (Tabelle 5):

	Cu	Ni
Cu (Ni)	99,9	10 µm Oberflächenschicht

Tabelle 5: Verwendetes vernickeltes Kupferblech (Cu(Ni))

4.3 Zinnbronze (CuSn6)

Als Bronze (entlehnt aus it. bronzo) bezeichnet man Legierungen, die aus Kupfer und Zinn mit keinen oder nur sehr geringen Beimengungen anderer Elemente bestehen, wovon Zink ausgenommen ist. Sie gehören zu den historischen Werkstoffen der Menschheit und haben der Bronzezeit den Namen gegeben. Auch heute besitzen die Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronze) technische Bedeutung wegen der günstigen Kombination von hoher Härte, hoher Duktilität und guter Korrosionsbeständigkeit. [12]

Als Hauptlegierungszusatz besitzen sie bis zu 8,5 % Sn was ihnen ein sehr elastisches Verformungsvermögen verleiht. Die Zugabe weiterer Elemente beeinflusst z. B. die Breite des Erstarrungsintervalls, die Phasengrenze und die elektrische und thermische Leitfähigkeit. Durch Zn werden das Erstarrungsintervall eingengt, Festigkeit und Warmformbarkeit in geringem Maße verbessert sowie die Leitfähigkeit etwas gesenkt. Zn wirkt neben P außerdem als Desoxidationsmittel. P wird zu maximal 0,4 % den Legierungen beigemischt. Es verbessert zudem allgemein die Gießbarkeit sowie die Gleiteigenschaften. [14]

Die physikalischen Eigenschaften der Kupfer-Zinn-Legierung CuSn6 sind in der Tabelle 6 zusammengefasst:

Eigenschaft bei 20°C	Wert
Dichte	$\rho = 8,82 \text{ g/cm}^3$
Spezifische Wärmekapazität	$c=0,377 \text{ J/(g K)}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 75 \text{ W/(m K)}$
Spezifische elektrische Leitfähigkeit	$\kappa=9 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$
Spezifischer elektrischer Widerstand	$\rho = 0,111 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
Elastizitätsmodul	$E=102 \text{ kN/ mm}^2$

Tabelle 6: Eigenschaften der Zinnbronzewerkstoffe (CuSn6)

Die genaue chemische Zusammensetzung der zum Schweißen verwendeter Bleche ist in dem Anhang zu entnehmen und wird hier kurz wiedergegeben (Tabelle 7):

	Cu	Sn	P	Zn	As
CuSn6	93,7	6,13	0,09	0,02	0,01

Tabelle 7: Verwendetes Zinnbronzeblech (CuSn6)

5 Schweißverfahren

5.1 Ultraschallschweißen

5.1.1 Ultraschalltechnik

Der Schall ist eine mechanische Bewegung von Materie. Er kann in Festkörpern entstehen und sich in ihnen ausbreiten. Atome oder Moleküle bewegen sich periodisch um ihre Ruhelage und übertragen ihre Bewegung auf benachbarte Teilchen. Diese Bewegungsenergie kann bei festen Medien sowohl in Transversal- als auch in Longitudinalwellen erfolgen. Anhand der Frequenz der Schwingung unterscheidet man:

Mechanische Schwingungen	Frequenzbereich [Hz]
Infraschall	<16
Schall	16 bis 18000
Ultraschall	20000 bis 10^9
Hyperschall	$>10^9$

Tabelle 8: Frequenzbereich der mechanischen Schwingungen

Aufgrund seiner hohen Energiedichte und der einfachen technischen Realisierbarkeit, z.B. durch die Nutzung des piezoelektrischen Effektes ist der Ultraschall vielfältig einsetzbar. Beim Ultraschallschweißen verwendet man den Leistungsschall (Ultraschall im Frequenzbereich von 20-120 kHz). [8]

5.1.2 Geschichte des Ultraschallschweißens

Das Ultraschallschweißen metallischer Werkstoffe ist ein relativ junges Schweißverfahren und wurde in den Jahren 1949 – 1953 in den USA zur industriellen Anwendbarkeit entwickelt. Für das Metallschweißen hat sich das Verfahren vor allem in den letzten 20 Jahren aufgrund seiner verfahrensspezifischen Vorteile sowie durch die Weiterentwicklung der Gerätetechnik vor allem aber in der Elektro- und Elektronikindustrie, im Automobilbau und in der Raumfahrt erfolgreich durchgesetzt. [18]

5.1.3 Einordnung des Verfahrens

Das Ultraschallschweißen (eng. ultrasonic welding) zählt als Schweißverfahren zu den stoffschlüssigen Verbindungsarten. Bezüglich der Schweißverfahrensgruppen wird das Ultraschallschweißen dem Fügen durch Bewegung bei den Pressschweißverfahren zugeordnet. Nach der DIN 1910 Teil 2 versteht man unter dem Ultraschallschweißen das Verbinden von Werkstücken an den Stoßflächen durch Einwirkung von Ultraschall ohne oder mit gleichzeitiger Wärmezufuhr unter Anwendung von Kraft vorzugsweise ohne Schweißzusatz.

5.1.4 Aufbau und Wirkungsweise einer Ultraschallschweißmaschine [8]

Die Abbildung 5 zeigt einen prinzipiellen Aufbau einer Ultraschallschweißmaschine.

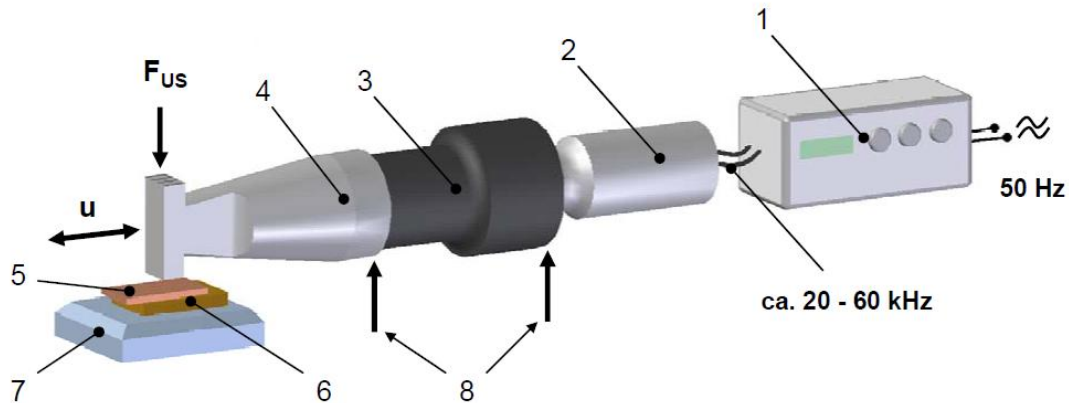


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau einer Ultraschallschweißanlage [15,18]

Die Hauptbestandteile einer Ultraschallschweißmaschine sind:

1. Ultraschallgenerator
2. Konverter
3. Booster
4. Sonotrode
7. Amboss
8. Lagerung-Kraftaufbringung

Unter der Nummer 5 sehen wir den Oberen- und unter Nummer 6 den Unteren Fügepartner die durch die Wirkung der Schweißkraft (F_{us}) und der Schwingung (u) verbunden werden.

5.1.4.1 Ultraschallgenerator [8]

Der Generator wird in der Regel mit einer Netzspannung von 220 bzw. 330 V betrieben und transformiert die Netzfrequenz von 50 Hz unter allen Belastungszuständen mit sehr großer Genauigkeit auf die entsprechende Arbeitsfrequenz. Die Generatorleistung beträgt beim Metallschweißen je nach Anforderung zwischen 10W und 8kW.

Für das Metallschweißen werden in den meisten Fällen Schwingersysteme mit einer Frequenz von 20 kHz eingesetzt, bei kleineren Fügeteilen wird auch mit 35 bzw. 40 kHz gearbeitet.

Von größerer Bedeutung für einen sicheren Prozess und eine hohe Qualität der Verbindungen beim Ultraschall – Metallschweißen ist die Einhaltung einer konstanten Schwingungsamplitude während der gesamten Schweißung. Besonders in der Phase der Verbindungsbildung nimmt die mechanische Last im Vergleich zur Reinigungsphase zu. Dieser Zustand wird vom Generator erkannt und eine konstante Amplitude durch eine Energieerhöhung gesichert.

5.1.4.2 Das Schwingersystem (Konverter, Booster, Sonotrode) [8]

5.1.4.2.1 Der Konverter

Der Konverter, auch als Schallwandler bezeichnet, wandelt die vom Generator zur Verfügung gestellte hochfrequente elektrische Wechselspannung in eine mechanische Schwingung gleicher Frequenz um. Moderne Ultraschallschweißsysteme nutzen den piezoelektrischen Effekt zur Schwingungserzeugung. Hierzu wird die Eigenschaft piezoelektrische Werkstoffe ausgenutzt, periodisch unter Wirkung einer Wechselspannung ihre Abmessungen zu ändern. Hochleistungsfähige Piezokeramiken in Ringform setzen dabei die elektrische in mechanische Energie mit einem Wirkungsgrad von ca.95% um.

5.1.4.2.2 Der Booster

Dient der Stabilisierung des Schwingungsverhaltens des Schwingersystems dient und zur Festlegung des nutzbaren Amplitudenbereichs.

Durch eine entsprechende Gestaltung verstärkt oder verringert der Booster die vom Konverter erzeugte Schwingungsamplitude. Seine Arbeitsfrequenz muss exakt der des Generators entsprechen.

5.1.4.2.3 Die Sonotrode

Die Sonotrode dient der Amplitudenvergrößerung. Um den Prozess der Schwingungsfortleitung sicher zu beherrschen, werden die Sonotroden aus einem Stück mit mehreren Arbeitsflächen gefertigt.

Von größter Bedeutung ist die Abstimmung der Frequenz auf die Frequenz des Schwingersystems.

Um eine verlustfreie Energieübertragung zu gewährleisten, ist mit möglichst kurzen und fest eingespannten Sonotroden zu arbeiten. Deshalb werden für die meisten Anwendungen Sonotroden mit der Länge $\lambda/2$ eingesetzt. Die Wellenlänge λ wird dabei von der Arbeitsfrequenz der Schweißmaschine und der Schallgeschwindigkeit c des Sonotrodenwerkstoffes bestimmt.

Die Sonotrode stellt beim Ultraschallschweißen das eigentliche Schweißwerkzeug dar.

Sie koppelt durch die Arbeitsfläche die Schwingungen in das sonotrodenseitige Füge teil ein und überträgt die zum Schweißen benötigte Anpresskraft.

Für eine sichere Übertragung der Ultraschallschwingungen von der Sonotrode in das sonotrodenseitige Füge teil sind die Arbeitsflächen mit einer der Anwendung entsprechenden Rauigkeit versehen. Sehr verbreitet sind Kreuzrasterungen und besonders für das Litzenschweißen Sonotroden mit einem Wellenprofil, aber auch durch Erodieren aufgeraute Oberflächen werden verwendet. Die Auswahl der Rasterung ist von der Fügeaufgabe und von den zu schweißenden Werkstoffen abhängig. Eine geringe Verformung durch Eindringen der Arbeitsfläche in das sonotrodenseitige Füge teil wirkt sich positiv auf die Ankoppelbedingungen aus. Zu starke Verformungen hingegen führen zu einer unzulässigen Werkstoffschwächung und bedingt durch das abnehmende Verformungsvermögen besteht die Gefahr der Anrissbildung.

Die Verschleißfestigkeit der Sonotrode ist neben dem Sonotrodenwerkstoff wesentlich von den zu schweißenden Werkstoffen abhängig. Mit einer Sonotrode lassen sich bis zu 3 Millionen Schweißungen durchführen, wobei lediglich nach jeweils 50000 Schweißungen ein Nacherodieren notwendig ist.

Als Sonotrodenwerkstoff eignet sich am besten ein harter und verschleißfester Werkstoff. Bewährt haben sich Silberstahl, Werkzeugstahl, höherfester Baustahl, Nickellegierungen, Molybdän und Sormait, eine Hartlegierung mit hohem Kohlenstoff- und Chromgehalt.

5.1.4.3 Amboss

Auch der Werkstoff, die Form und die Rauigkeit des Ambosses bestimmen die erreichbare Festigkeit einer Ultraschallverbindung. Der Amboss, auch als Gegenlager bezeichnet, hat die Aufgabe, die Fügeteile aufzunehmen und am Mitschwingen zu hindern. Aus diesem Grund ist er möglichst starr zu gestalten. Seine Eigenfrequenz darf nicht mit der des Schwingersystems übereinstimmen. Da er keine Schwingungsenergie aufnehmen soll, muss der Ambosswerkstoff ein hohes Dämpfungsvermögen besitzen. Bevorzugte Werkstoffe sind Grauguss und Stahl. Um den Amboss kostengünstig und flexibel den verschiedenen Fügeaufgaben anpassen zu können, sind die Ambosseinsätze mit den eigentlichen Arbeitsflächen austauschbar.

In der Regel sind die Ambossoberflächen mit einer kreuzförmigen Rasterung versehen. Die Stärke der Rasterung wird durch die Härte und Dicke des ambosseitigen Fügeteils und durch die Anforderungen an der Fügestelle bestimmt. Mit sich verringernder Fügeteildicke sind Einsätze mit einer feineren Rasterung oder nur genügend aufgerauten Oberfläche einzusetzen, damit zu starke Verformungen und damit die Querschnittsminderungen nicht die Verbindungsfestigkeit verschlechtert. Grobe Rasterungen hingegen eignen sich vor allem beim Schweißen von Aluminium, da die Anschweißneigung an die Fügeteile hier geringer ist.

5.1.5 Schweißparameter [8,58]

Der Ultraschallschweißprozess wird durch die Parameter Schweißzeit, Schweißgeschwindigkeit, Anpresskraft, Schweißleistung und Amplitude bestimmt.

5.1.5.1 Schweißzeit / Schweißgeschwindigkeit

Der Arbeitsprozess beim Ultraschallschweißen gliedert sich in folgende Zeitabschnitte (siehe Abbildung 6):

1. **Squeeze Time - ST**(Presszeit): Das Zeitintervall in dem die profilierte Sonotrodenkoppelflächen in den oberen Fügepartner eindringen.
2. **Weld Time - WT** (Schweißzeit): Die Zeit in der es zur Relativbewegung zwischen den Fügepartnern und zur Energieeinbringung kommt.
3. **Hold Time –HT** (Haltezeit): Die Zeit in der die Fügepartner nach der Energieeinbringung durch die Lagerung des Ultraschallschwingersystems festgehalten werden.
4. **AbTime –AT** (Lösungszeit): Die Zeit in der die Fügepartner durch eine Relativbewegung der Sonotrode sich von der Koppelfläche lösen.

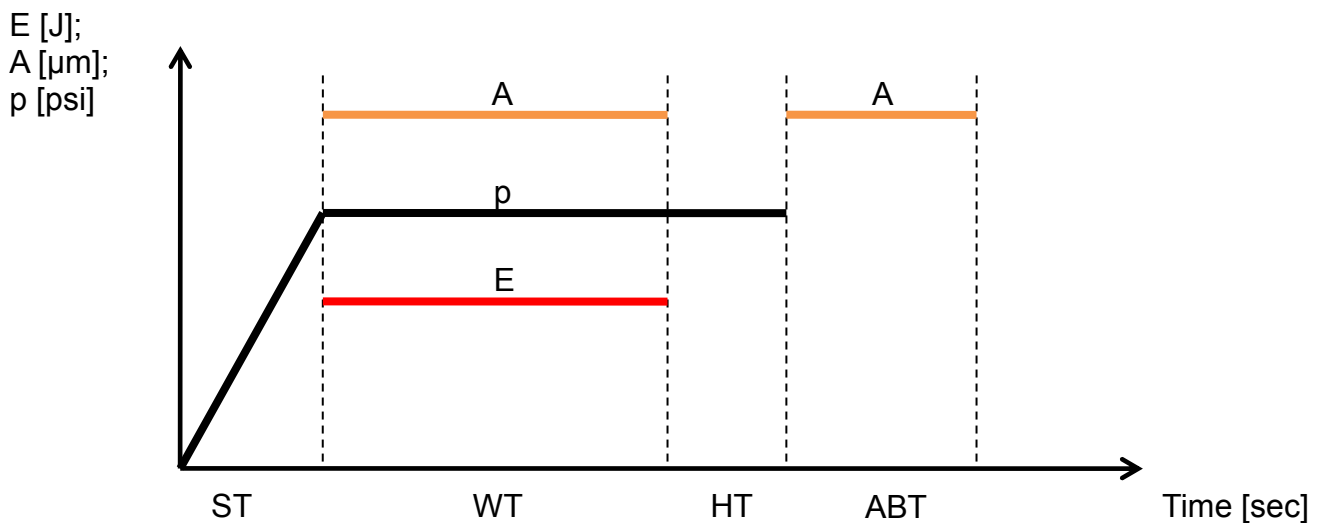


Abbildung 6: Arbeitsprozess des Ultraweld®-L20 von Branson Amtech [58]

Unter der Schweißzeit (WT) wird also die Zeit definiert, in der die Ultraschallschwingungen auf den Werkstoff einwirken. Sie liegt für die meisten Anwendungen unter einer Sekunde. Bezogen auf den Prozess der Verbindungsbildung lässt sich die Schweißzeit in zwei Abschnitte einteilen. Der erste Abschnitt wird durch die Beseitigung von Fett- und Oxidschichten bestimmt und deshalb als Reinigungszeit bezeichnet. Daran schließt sich die Zeit für die eigentliche Verbindungsbildung an. Die Länge der Reinigungszeit wird durch die Dicke und Art der Verunreinigung bestimmt. Bei einer fest vorgegebenen Schweißzeit beeinflusst sie im hohen Maße die Restzeit, die für die Verbindungsbildung verbleibt. Eine zu kurze Zeit für die Verbindungsbildung wirkt sich negativ auf die Verbindungsbildung der Fügeaufgabe aus.

Die optimalen Werte für die Schweißzeit bzw. Schweißgeschwindigkeit sind für die jeweilige Fügeaufgabe in Vorversuchen festzulegen. Werden die Schweißzeit zu kurz bzw. die Schweißgeschwindigkeit zu hoch gewählt, ist es nicht möglich, die für die Verbindung erforderliche Energie in die Fügeteile einzukoppeln. Eine zu lange Schweißzeit bzw. zu geringe Schweißgeschwindigkeit hingegen kann zur Zerrüttung oder Zerstörung der zu fügenden Werkstoffe führen. In beiden Fällen wird die Festigkeit der Verbindung herabgesetzt.

5.1.5.2 Anpress- bzw. Schweißkraft

Die Anpresskraft wird benötigt, um die Voraussetzung für die Verbindungsbildung durch einen Oberflächenkontakt der Fügeteile zu schaffen und um die mechanische Kopplung zwischen den Schweißwerkzeugen und den Fügeteilen zu gewährleisten. Hierbei ist das Erreichen einer Mindestkraft Voraussetzung für eine gute Schweißung. Wird diese unterschritten, reicht die Kopplung zwischen den Schweißwerkzeugen und den Fügeteilen für die Verbindungsbildung nicht aus, da der größte Teil der Energie an die Oberfläche des sonotrodenseitigen Fügeteils abgegeben wird. Wird jedoch ein Maximalwert der Anpresskraft überschritten, nimmt die Dämpfung soweit zu, dass die erreichte Amplitude der Sonotrode und die Relativbewegung zwischen den Fügeteilen zur Verbindungsbildung nicht mehr ausreicht. Bei weichen Werkstoffen können hohe Kräfte zu einer großen Querschnittsschwächung infolge eines starken Sonotrodeneindrucks führen.

Die optimale Anpresskraft wird durch die zu schweißenden Werkstoffe, deren Härte und Verformungsvermögen und durch die Schweißflächengröße und die daraus resultierenden Flächenpressung bestimmt. [18]

5.1.5.3 Schwingungsamplitude

Einer der wichtigsten Schweißparameter ist die Schwingungsamplitude, die die Intensität der Reibung bestimmt. Das Erreichen einer Mindestamplitude zwischen den Fügeteilen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Schweißung. Mit zunehmender Schwingungsamplitude steigt die Qualität der Schweißung. Die Überschreitung einer Maximalamplitude jedoch bewirkt eine Zerstörung der Werkstücke durch eine zu große Wechselbeanspruchung und damit einen Abfall der Festigkeitswerte.[18]

5.1.5.4 Schweißenergie

Die Schweißenergie gewinnt eine zunehmende Bedeutung für die Steuerung des Prozessablaufs einer Ultraschallschweißung, insbesondere für deren Beendigung und ersetzt damit das Schweißen mit einer fest vorgegebenen Schweißzeit.

In vorgegebenen Zeitfenstern wird die Energie, die der Generator dem Konverter zur Verfügung stellt über den Verlauf der Schweißzeit bis zur Beendigung des Schweißprozesses erfasst. In Umkehrung dazu wird bei Einsatz der Schweißenergie als Steuergröße zur Beendigung der Schweißung ständig der momentane Wert mit der an der Steuerung eingestellten Sollgröße verglichen und die Energie beim Erreichen dieses Wertes abgeschaltet.

Bei einer starken Verschmutzung, z.B. durch eine Fettschicht, besteht aber die Gefahr, dass dieser Energiewert erst nach einer langen Zeit erreicht wird, die aber infolge der Dauerschwingung zu einer Zerrüttung der Werkstoffe führen würde. Aus diesem Grund ist die Vorgabe der Schweißenergie als Steuergröße mit der Festlegung einer maximalen Prozesszeit verbunden, bei deren Erreichen die Schweißung mit einer entsprechenden Fehlermeldung beendet wird. [19]

5.1.6 Prozess der Verbindungsbildung [8,58]

Die Verbindungsbildung basiert auf der gleichzeitigen Wirkung des Ultraschalles in Form einer oszillierenden translatorischen Relativbewegung der zu schweißenden Teile als Energiequelle und einer Druckkraft, die zu einer starken, örtlich begrenzten Plastifizierung und Verformung der Fügeteile führt. Die Schwingungsrichtung des Ultraschalls und die Krafrichtung verlaufen senkrecht zu einander, wobei die Stoßflächen der Fügeteile auf einander reiben. [25]

Der Vorgang der Verbindungsbildung bei Ultraschall-Metallschweißen läuft in drei Phasen ab:

5.1.6.1 Bildung des physikalischen Kontaktes

Unter der Wirkung der Relativbewegung und der Anpresskraft werden die Oberflächen der Fügeteile angenähert und Rauigkeitsspitzen der sich berührenden Oberflächen der zu verbindenden Werkstoffe durch plastische und elastische Deformationen abgeschert.

Vorhandene Oxid- und Verunreinigungsschichten, sowie absorbierte Gas-, Wasser- und Fettmoleküle behindern die Bildung des metallischen Kontaktes und müssen

aufgerissen, zerstört und beseitigt werden. Immer größere Bereiche des Grundwerkstoffes werden freigelegt und in einem intensiven Kontakt gebracht.[25]

5.1.6.2 Aktivierung der Kontaktflächen und Ablauf chemischer Wechselwirkungen

Die Atome der zu verbindenden Oberflächen werden aktiviert.

Durch eine weitere Annäherung der Oberflächen beginnt bei Abständen von $4-5 \cdot 10^{-7}$ mm die chemische Wechselwirkung.

Es findet ein Elektronenaustausch statt, der eine feste Verbindung entstehen lässt.

5.1.6.3 Relaxationsprozesse in der Schweißverbindung

Unmittelbar an die Bildung der festen Verbindung schließen sich Wechselwirkungen zwischen den verbundenen metallischen Werkstoffen in der Schweißebene und den benachbarten Bereichen an.

Durch die plastischen Verformungen der Oberflächen werden einzelne Kristallite verformt, zertrümmert und verwirbelt, es treten aber auch nur elastisch verformte Gebiete auf. Die Folge sind innere elastische Spannungen und Bereiche mit deutlich erhöhter Energie.

Ablaufende Relaxationsvorgänge wandeln die Gebiete mit erhöhter Energie, die sich in einem stabilen Gleichgewichtszustand befinden, in einen Zustand minimaler Energie um. Innere elastische Spannungen werden abgebaut.

Der Kristallerholungsvorgang ist auf inneratomare Platzwechsellvorgänge im Gitter zurückzuführen und wird durch eine erhöhte Wärme, die während des Schweißvorganges infolge innerer und äußerer Reibung entsteht, beschleunigt.

Zusätzlich können Modifikationsänderungen, Rekristallisations- und Diffusionsvorgänge stattfinden. Die Diffusionsvorgänge besitzen nur eine geringe Bedeutung bei der Verbindungsbildung, führen aber zu einer höheren Verbindungsfestigkeit.

Trotz der geringen Schweißzeiten laufen die einzelnen Stadien meist gleichzeitig ab und lassen sich nur schwer trennen. Besonders bei gleichen und gleichartigen Werkstoffen erfolgt durch die beidseitige plastische Deformation eine gleichzeitige Aktivierung beider Oberflächen. Stadium 1 und 2 laufen ineinander, das 3. Stadium beginnt bereits mit dem Ende des ersten. Beim Schweißen von artverschiedenen oder harten Werkstoffen ist das 2. Stadium besonders ausgeprägt. [22-25]

5.1.7 Vor und Nachteile des Verfahrens

Das Ultraschallschweißen zeichnet sich besonders für die Fertigung von Klein- und Kleinstteilen gegenüber vielen konventionellen Fügeverfahren, wie z.B. dem Widerstandsschweißen und Löten durch eine Reihe von Vorteilen aus. Hier zählen vor allem [15-24]:

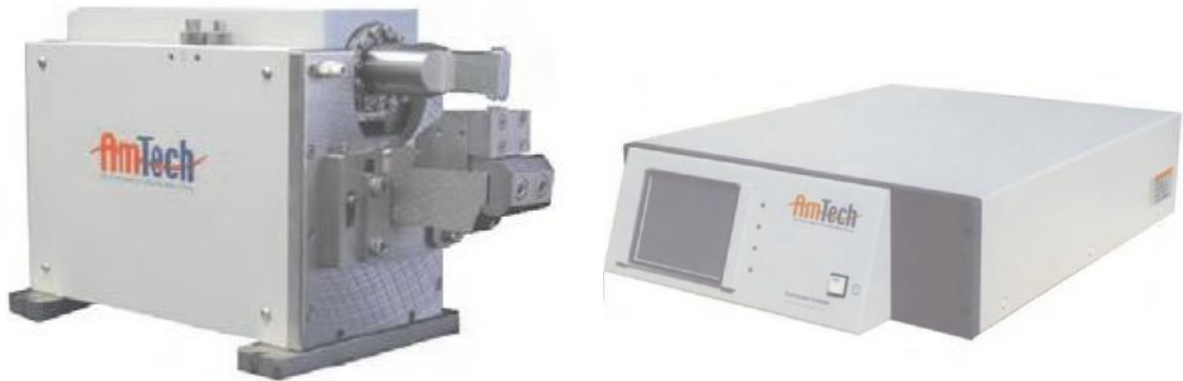
1. Extrem kurze Schweißzeiten, die Verbindung entsteht in Bruchteilen einer Sekunde;
2. Die Möglichkeit, verschiedenartige Metalle und viele ihrer Legierungen untereinander und auch mit nichtmetallischen Werkstoffen, wie Gläsern und Kermiken, zu verbinden;
3. Der Wegfall einer besonderen oder aufwendigen Oberflächenvorbereitung;
4. Die Möglichkeit, behandelte Metalloberflächen zu schweißen;
5. Geringe äußere Verformung der Fügeteile beim Schweißen;
6. Eine unerhebliche thermische Beeinflussung; die erreichten Temperaturen bleiben unterhalb der Schmelztemperaturen; dadurch treten keine Kornvergrößerungen, intermetallischen Phasen und Schweißspannungen auf;
7. Die Möglichkeit, Werkstoffe mit extrem unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu verbinden
8. Hohe Verbindungsfestigkeit durch Kaltverfestigung;
9. Der minimale Energiebedarf und der sehr gute Wirkungsgrad des Verfahrens;
10. Die leichte Automatisierbarkeit und der nur geringe Personalaufwand;
11. Die Umweltfreundlichkeit des Verfahrens; das Schweißen erfolgt ohne Schutzgas; Zusatzwerkstoff, Flussmittel; folglich ist nur eine Reinigung nach dem Schweißen nicht notwendig, Schadstoffe entstehen nicht.

Neben dieser Vielzahl von Verfahrensvorteilen gibt es auch Einschränkungen für die Anwendung des Schweißverfahrens:

1. Die Fügeteile können nur durch eine Überlappschweißung verbunden werden.
2. Geringe maximale Dicke des schwingenden Fügeteils (oberes Teil). Die üblichen maximalen Blechdicken beim Punktschweißen sind 0,003 – 3 mm.

5.1.8 Verwendete Anlage [58]

Die Arbeitsfrequenz ist durch die Komponenten der Ultraschallschweißeinrichtung festgelegt und kann nicht verändert werden. Generator, Schwingungswandler, Booster und die Sonotrode sind exakt auf die jeweilige Arbeitsfrequenz abgestimmt. Eine Abweichung einer Komponente um nur wenige 100 Hz bedeutet eine Verstimmung des Schwingersystems und einen rapiden Abfall der erreichbaren Maximalamplitude. Die Arbeitsfrequenzen der für das Vorhaben vorgesehenen Schweißeinrichtung liegen bei 20 kHz, da bei dieser Frequenz die größten Schwingungsamplituden erreicht werden, die notwendig sind, um die ausgewählten Blechdicken zu verschweißen. (siehe Abbildung 7)



Ultraweld®-L20

20 kHz Schweißsystem

Schweißleistung: 4 kW

Elektrische Anschlusswerte: 220 VAC, 50/60 Hz, 20 Ampere

Druckluft-Anschlusswerte: sauber, trocken, 80 psig (5.5 bar)

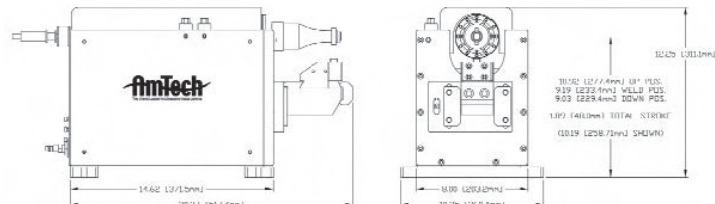


Abbildung 7: Verwendete Ultraschallschweißanlage (Ultraweld®- L20) [58]

5.2 Laserschweißen

5.2.1 Lasertechnik

Der Begriff „Laser“ steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, zu Deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission.

Das Lasermaterial besteht aus einer großen Anzahl von Atomen (Festkörperlaser) oder Molekülen (Gaslaser) mit diskreten Energiezuständen. Durch Zufuhr von elektrischer oder optischer Energie kann ein Atom in einen energetisch höheren (angeregten) Energiezustand übergehen (Abbildung 8). Da dieser angeregte Zustand instabil ist, versucht das Elektron unter Abgabe von Energie wieder in seinen Grundzustand überzugehen. Bei dieser „spontanen Emission“ wird die Energie in Form von Photonen, d.h. Lichtquanten frei (Abbildung 8). Trifft ein freigesetztes Photon auf ein weiteres angeregtes Atom, so fällt dieses ebenfalls unter Aussendung eines zweiten Photons in seinen Grundzustand zurück. Diese beiden Lichtquanten besitzen die gleiche Wellenlänge und schwingen phasengleich. Dieser Vorgang wird als „stimulierte Emission“ bezeichnet und kennzeichnet das Grundprinzip der Laserstrahlentstehung.

Im Gegensatz zu allen herkömmlichen Lichtquellen (z.B. das Sonnenlicht) besitzt der Laserstrahl drei herausragende Eigenschaften: monochromatisch (eine Wellenlänge), kohärent (phasengleiche Schwingung) und parallele Lichtstrahlen.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist es möglich, das Laserlicht auf einen sehr kleinen Brennfleck zu fokussieren und somit sehr hohe Leistungsdichten im Bereich von 10^6 – 10^8 W/cm² zu realisieren. [26]

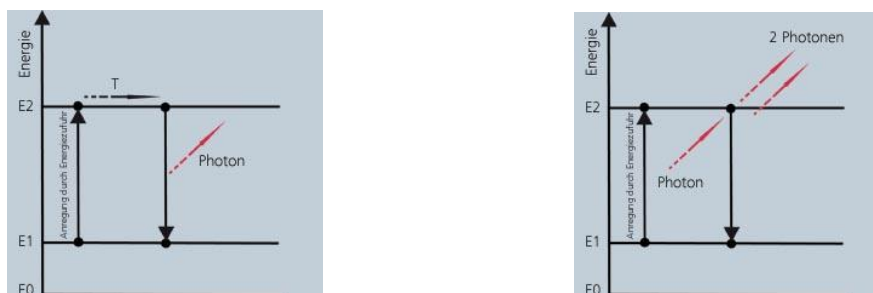


Abbildung 8: Spontane Emission von Photonen [29]

5.2.2 Geschichte des Laserschweißens

Im Jahr 1917 schaffte Albert Einstein die Grundlagen für die heutige Lasermaterialbearbeitung, indem er in einer Untersuchung die Quantentheorie der erzwungenen Emission mit gerichteten Lichtteilchen beschrieb. Erst rund 40 Jahre später konnte Theodore Mainman 1960 diese theoretischen Überlegungen in einem ersten Laser mit Rubinkristall umsetzen. Mitte der 80er Jahre wurde der Laser das erste Mal für Schweißapplikationen eingesetzt. [48]

Das Laserstrahlschweißen wird in unterschiedlichen Industriezweigen eingesetzt, vorrangig aber im Automobilbau. [49]

5.2.3 Einordnung des Verfahrens

Das Laserstrahlschweißen gehört zur Gruppe der Schmelzschweißverfahren. Dabei entsteht die erforderliche Wärme durch Umwandlung gebündelter energiereicher Strahlung beim Auftreffen auf bzw. Eindringen in das Werkstück. [16]

Bei den Laserstrahlschweißungen wird die Energie mittels elektromagnetischer Wellen, der Laserstrahlung, ohne mechanischen oder elektrischen Kontakt zwischen Energiequelle und Werkstück der Schweißzone zugeführt. [17]

Das laserfähige Medium befindet sich in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern, dementsprechend werden die Laser in Gas-, Flüssigkeits- und Festkörperlaser unterteilt. Eine weitere Möglichkeit der Unterteilung der Laser ist nach der Art der Anregung des Lasermediums in Halbleiterlaser. Eine Übersicht über die modernen Hochleistungslaser, Lasermedien und die Pumpmechanismen ist in der Tabelle 9 zusammengefasst [26]:

Lasertyp	Laseraktives Material	Pumpmechanismus und Pumpquellen	Beispiele
Gaslaser	Gas oder Dampf	Elektrisch angeregte Gasentladung	CO ₂ - Laser: 10,6 µm Eximer-Laser: 175-483 nm
Festkörperlaser	Kristalle die Gläser, die mit optisch aktiven Ionen dotiert sind	Optisch, mit Anregungslampen oder Diodenlaser	Rubin-Laser: 694 nm Nd: YAG-Laser: 1,06 µm
Farbstofflaser	Organische Farbstoffe in stark verdünnter Lösung	Optisch, mit Blitzlampen oder Laser	Abstimmbar
Halbleiterlaser	Halbleiter	Elektrisch	GaInP: 670-680 nm GaAlAs: 780-880 nm

Tabelle 9: Moderne Hochleistungslaser

Bei den Schweißversuchen die während der Diplomarbeit durchgeführt wurden ist der Faserlaser YLR 2000 der Firma IPG GmbH verwendet worden. Faserlaser sind eine spezielle Art der „All-Solid-State-Laser“, d.h. diodengepumpte Festkörperlaser. Durch den Aufbau des Lasers mit dem aktiven Medium in einem Wellenleiter (Faser) können die thermischen Probleme herkömmlicher Festkörperlaser bei der Erzeugung hoher Leistungen umgangen werden.

5.2.4 Aufbau und Wirkungsweise eines Faserlasers [54]

In der Abbildung 9 ist der prinzipielle Aufbau eines Faserlasers dargestellt. Dabei wird die Strahlung eines Diodenlasers über eine Koppeloptik in den Wellenleiter – die Faser- eingespeist. Der Ytterbium dotierter Kern dieser Glasfaser bildet dabei das aktive Medium, in dem die Laserverstärkung stattfindet. Das Laserlicht, welches durch die Faser geleitet wird, erfährt aufgrund der großen Länge eine sehr hohe Verstärkung. Dabei werden die Strahleigenschaften und -qualität von der Geometrie der Faser bestimmt. [27]

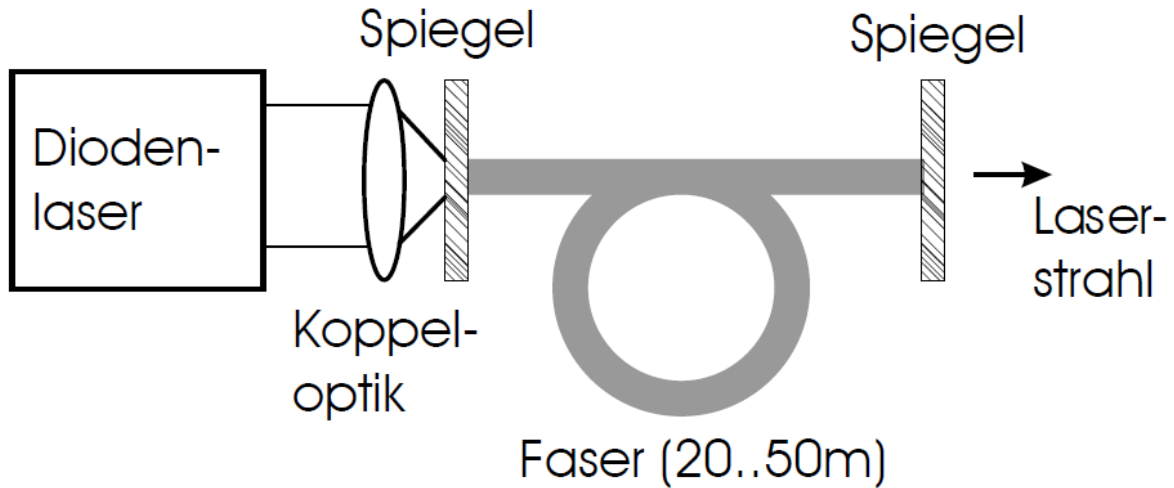


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau des Faserlasers [54]

Da der Faserlaser weitestgehend von der Faser abhängt, wird im folgenden Abschnitt die Faser näher dargestellt.

5.2.4.1 Aufbau der Faser [54]

Die Faser stellt einen optischen Wellenleiter dar in dem sich Pumplicht und erzeugte Laserstrahlung als geführte Wellen ausbreiten. Dazu besteht die Faser aus einem Kern mit Brechzahl n_{co} im Inneren, der das Licht führt und einem Mantel mit Brechzahl n_c . Die Ummantelung besteht aus einem Polymer und dient vor allem dem mechanischen Schutz der Faser. [27]

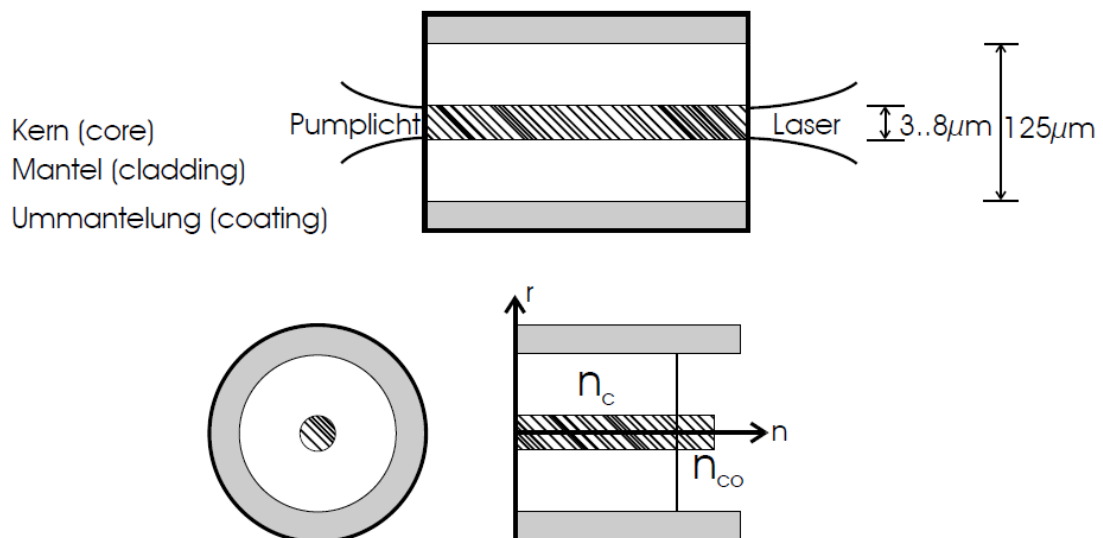


Abbildung 10: Aufbau der Faser des Faserlasers [54]

Der Kern besteht aus Silizium-, Phosphat- bzw. Fluoridglas mit einer sehr geringen Dämpfung ($< 3\text{dB/km}$), so dass sich das Pumplicht hierin ausbreiten kann bis es vollständig absorbiert wurde. Um als aktives Medium dienen zu können wird der Kern mit Seltenerdionen dotiert, typischerweise in der Größenordnung bis 1500ppm. Bei dem Faserlaser YLR 2000 der Firma IPG GmbH wird Ytterbium als Dotierungsmöglichkeit mit einer Emissionswellenlänge von $\lambda=975\text{ nm}$ verwendet.

Durch die Wechselwirkung der eingebrachten Seltenerden mit dem umgebenden Glas kommt es zu einer spektralen Verbreiterung der Absorptions- und Emissionsbanden (typisch 15nm). Dies stellt einen Vorteil für den Faserlaser dar, da damit für die Pumplichtquelle eine geringere Frequenzstabilität und keine Temperaturstabilisierung notwendig sind. Außerdem kann sie eine größere Bandbreite besitzen. Wie bereits erwähnt wird die Strahlqualität der Laserstrahlung allein durch die Faser bestimmt. Um eine bestmögliche Strahlqualität zu erhalten werden die Fasern so konstruiert, dass sich in ihnen nur die transversale Grundmode ausbreiten kann.

Aufgrund der technisch realisierbaren Brechzahlunterschiede wird somit ein kleiner Kernradius benötigt, um eine single-mode Faser zu realisieren, in welcher nur die transversale Grundmode ausbreitungsfähig ist. Allerdings sind in diesem Fall auch Pumpquellen mit einer hohen Strahlqualität notwendig, um diese in eine solche Faser einkoppeln zu können.

Pumpquellen mit entsprechenden Strahlqualitäten besitzen jedoch nur eine geringe Leistung. Da man den Kernradius jedoch nicht vergrößern will - sonst würde eine multi-mode Faser mit geringerer Strahlqualität entstehen - wurde das Konzept der Doppelkernfaser entwickelt. [27]

5.2.4.1.1 Doppelkernfasern (double-clad fibers)

Doppelkernfasern besitzen um den eigentlichen laseraktiven Kern herum noch einen zweiten Kern für das Pumplicht, wie dies in Abbildung 11 und 12 dargestellt ist. Der Pumplichtkern ist hierbei so groß, dass sich auch höhere Moden ausbreiten können. Damit ist es möglich die Strahlung von Hochleistungslaserdioden in die Faser einzukoppeln. Die Ummantelung dient nun ihrerseits als Mantel für den Pumpkern und muss einen entsprechend niedrigeren Brechungsindex aufweisen. [28]

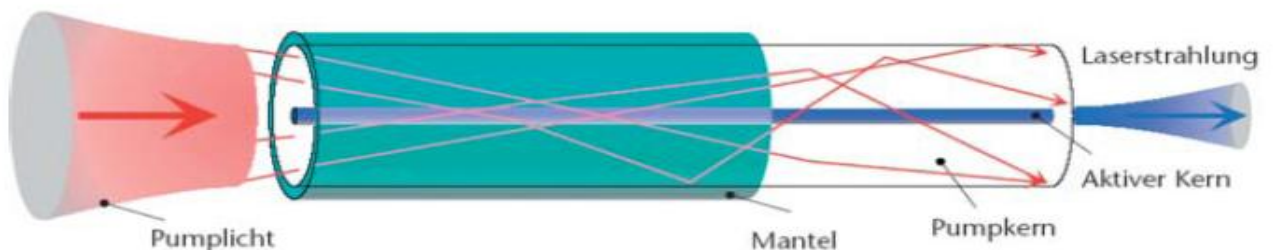


Abbildung 11: Doppelkernfaser [56]

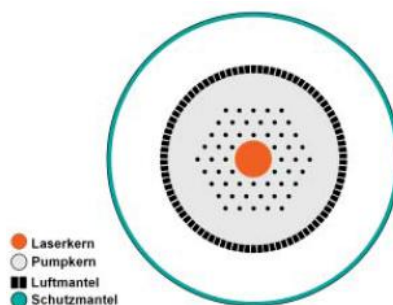


Abbildung 12: Querschnitt der Doppelkernfaser [56]

5.2.5 Prozess der Verbindungsbildung

Bei dem Prozess der Verbindungsbildung des Laserschweißens wird grundsätzlich zwischen dem Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen unterschieden.

5.2.5.1 Wärmeleitungsschweißen

Bei den Wärmeleitungsschweißen (Abbildung 13) schmelzen die zu verbindenden Materialien durch Absorption des Laserstrahls an der Materialoberfläche auf. Die Schmelzen fließen ineinander und die erstarrte Schmelze verbindet die Materialien. Die Einschweißiefen für dieses Verfahren liegen bei typischerweise < 1 mm und wird angewendet, um dünnwandige Teile zu verbinden. Der Laser erzeugt eine glatte, abgerundete Schweißnaht, die nicht mehr nachbearbeitet werden muss. [29,30,51]

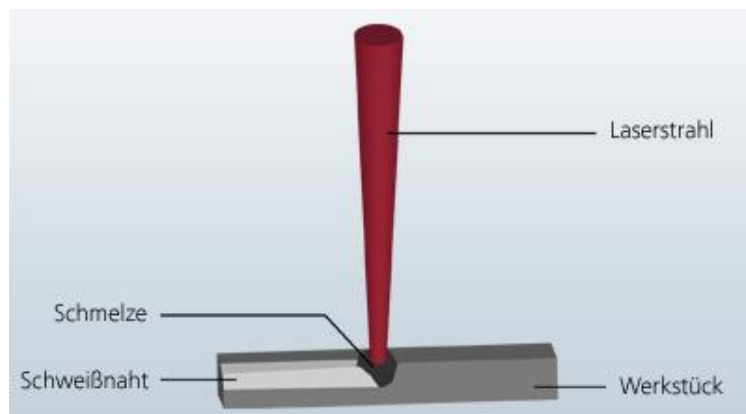


Abbildung 13: Wärmeleitungsschweißen [51]

5.2.5.2 Tiefschweißen

Das Prinzip des Tiefschweißens (Abbildung 14) beruht auf der Erzeugung einer Dampfkapillare im Material. Der Laserstrahl erzeugt die hierfür notwendige lokale Verdampfungstemperatur. Der dabei entstehende Dampfdruck im Material erzeugt eine Kapillare mit dem ca. 1,5 fachen Durchmesser des Laserstrahlfokus.

Diese Dampfkapillare (auch Keyhole genannt) wird durch die Vorschubbewegung der Laseranlage durch das Werkstück gezogen. Die Metallschmelze umfließt die Dampfkapillare und erstarrt an der Rückseite. Eine tiefe, schmale Schweißnaht mit gleichmäßigem Gefüge entsteht.

Dieses Verfahren wird angewendet, wenn hohe Einschweißiefen gefordert sind [29, 30,51].

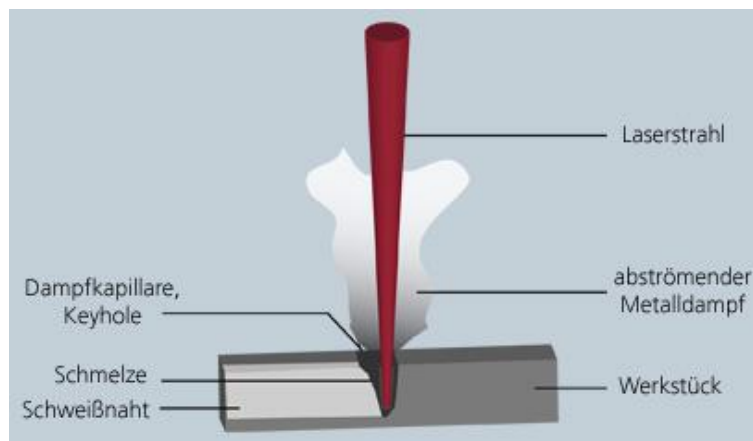


Abbildung 14: Tiefschweißen [51]

5.2.6 Schweißparameter

Für die Ausbildung eines Wärmeleitungs- oder Tiefschweißeffektes muss der Laserschweißprozess durch die richtige Auswahl und Einstellung der Laserstrahleigenschaften und Prozessparametern bestimmt werden.

Unter den Laserstrahleigenschaften werden folgenden Schweißparameter verstanden:

1. **Leistungsdichte (Laserleistung)**
2. Strahlkennzahl
3. Fokusbereich
4. Fokussierzahl
5. Schärfentiefe
6. Strahlungspolarisation

Bei den Prozessparametern wird zwischen folgenden Schweißparametern unterschieden:

1. **Schweißgeschwindigkeit**
2. Prozeßgas
3. **Fokusslage (zur Werkstückoberfläche)**

5.2.6.1 Leistungsdichte (Laserleistung)

Um den Werkstoff aufzuschmelzen, muss eine ausreichende Wärmemenge W pro Fläche A und Zeit t zugeführt werden. Auf der Werkstückoberfläche wird der absorbierte Teil der Lichtenergie in Wärme umgewandelt. Der Rest wird entweder reflektiert oder bei transparenten Materialien durchgelassen. Je größer die Laserleistung, desto höher ist die sich entwickelnde Oberflächentemperatur des bestrahlten Werkstoffes. [31]

Die Leistungsdichte (p) ist die Größe die beim Laserschweißen die Laserleistung je Fläche bzw. Fokusgröße üblicherweise in W/cm^2 angibt. Sie errechnet sich wie folgt:

$$p = \frac{W}{t \cdot A} \quad (\text{Punktschweißen})$$

$$p = \frac{P}{A} \quad (\text{Nahtschweißen})$$

W - Wärmemenge [J],

t - Zeit [s],

A - Fokusgröße [mm^2],

P - Laserleistung in Watt.

5.2.6.2 Schweißgeschwindigkeit

Neben der Laserleistung ist die Schweißgeschwindigkeit der Parameter der am einfachsten zu variieren ist. Durch die Schweißgeschwindigkeit lassen sich Nahtgeometrie und Nahtqualität in weiten Bereichen beeinflussen.

Besondere Bedeutung verdienen dabei die Porosität und die Aufhärtung der Schweißnaht.

Erhöhte Porosität entsteht bei zu niedriger, aber auch bei zu hoher Schweißgeschwindigkeit und bei behinderter Entgasung der Schmelze.

Eine zu niedrige Geschwindigkeit führt zu einer Überhitzung der Schmelze. Die „brodelnde“ Schmelze ist durchsetzt von Gasbläschen, die beim Erstarrungsvorgang eingeschlossen werden.

Im Falle einer zu hohen Schweißgeschwindigkeit können Verwirbelungen und Instabilitäten in der Rückfront des Dampfkanals zu Ablösung von Gasbläschen führen, die bei der Erstarrung eingeschlossen werden.

Die schlanke Laserstrahlschweißnaht führt zu steilen Temperaturgradienten, die bei hoher Schweißgeschwindigkeit eine hohe lokale Abkühlgeschwindigkeit ergeben. Diese hohen Abkühlraten erzeugen hohe Härtewerte im Randbereich der Schmelzzone.

Unzulässig hohe Aufhärtungen können zur Rißbildung führen (Härterisse), die bei eingeschränkter Schrumpfung begünstigt wird. Eine Verminderung der Schweißgeschwindigkeit reduziert die Aufhärtung und erniedrigt die Gefahr der Rißbildung. [32]

5.2.6.3 Fokusslage

Auch die Lage des Fokus übt einen Einfluss auf die Ausbildung der Schweißnahtgeometrie aus. Für Fokuslagen direkt auf der Werkstückoberfläche ist die Eindringtiefe des Laserstrahles am größten. Allerdings neigt die Schmelze dazu, durch die hohe Leistungsdichte hinausgeschleudert zu werden. Daher ist es oft günstiger, ab einer bestimmten Leistungsdichte die Fokusslage entweder ober- oder unterhalb der Werkstückoberfläche zu legen. Dabei werden für Fokuslagen unterhalb der Materialoberfläche tiefere Schweißpunkte erreicht als für entsprechenden Fokuslagen oberhalb. [32]

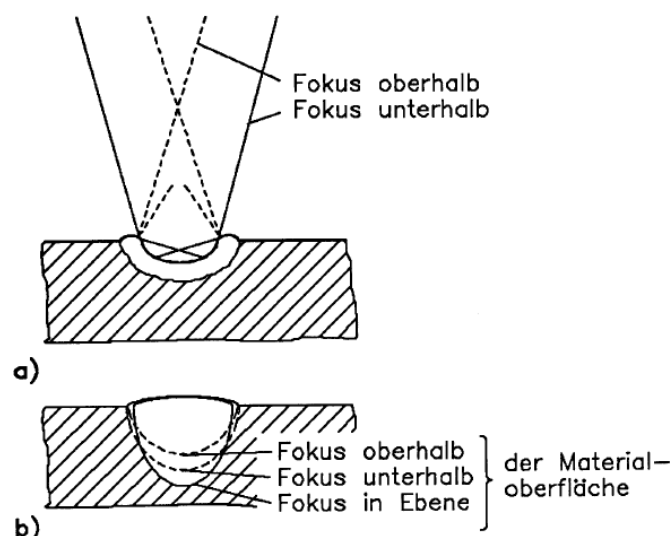


Abbildung 15 [32]: a) Einfluss der Fokusslage zu Beginn des Laserschweißprozesses
b) Einfluss der Fokusslage auf die Schmelztiefe

5.2.7 Vor- und Nachteile des Verfahrens

In der Tabelle 10 werden die wichtigsten Vor- und Nachteile des Laserstrahlschweißens an Gesichtspunkten des Prozesses, Werkstückes und der Anlage stichpunktartig aufgezählt [26-32]:

	Vorteile	Nachteile
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Leistungsdichte • Kleiner Strahldurchmesser • Hohe Schweißgeschwindigkeit • Berührungsloses Werkzeug 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Reflexion an Metallen
Werkstück	<ul style="list-style-type: none"> • Minimale thermische Belastung • Geringer Verzug • Schweißen an schwer zugänglichen Stellen • Unterschiedliche Werkstoffe schweißbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Exakte Positionierung notwendig
Anlage	<ul style="list-style-type: none"> • Kurze Taktzeiten • Mehrstationenbetrieb möglich • Gut automatisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Strahlführung und -formung • Leistungsverluste an optischen Elementen • Schutz vor Laserstrahlung notwendig

Tabelle 10: Vor- und Nachteile des Laserschweißens

5.2.8 Verwendete Anlage

Für das anfertigen der Laserschweißproben für die vorliegende Diplomarbeit wurde der YLR 2000 (Ytterbium Faser Laser) Serie 2000 der Firma IPG GmbH verwendet. Dabei handelt es sich um einen Hochleistungslaser der Klasse IV der bei einer Wellenlänge von 1070nm der eine optische Leistung von 2000 Watt produziert.

In der Tabelle 11 sind die technische Daten und Eigenschaften des Laser IPG YLR-2000 zusammengefasst:

Haupteigenschaft:	Wert
Hohe Leistung	2kW
Hohe Strahlqualität am Faserausgang	
<ul style="list-style-type: none"> Wellenlänge Faserkerndurchmesser 	1070 +/- 5nm 100µm
Effizient	
<ul style="list-style-type: none"> Wirkungsgrad 	ca.30%

Tabelle 11: Technische Daten des Lasers IPG YLR 2000 [55]

Wie in der Abbildung 16 dargestellt besitzt der YLR 2000 ein äußerst kompaktes Design:

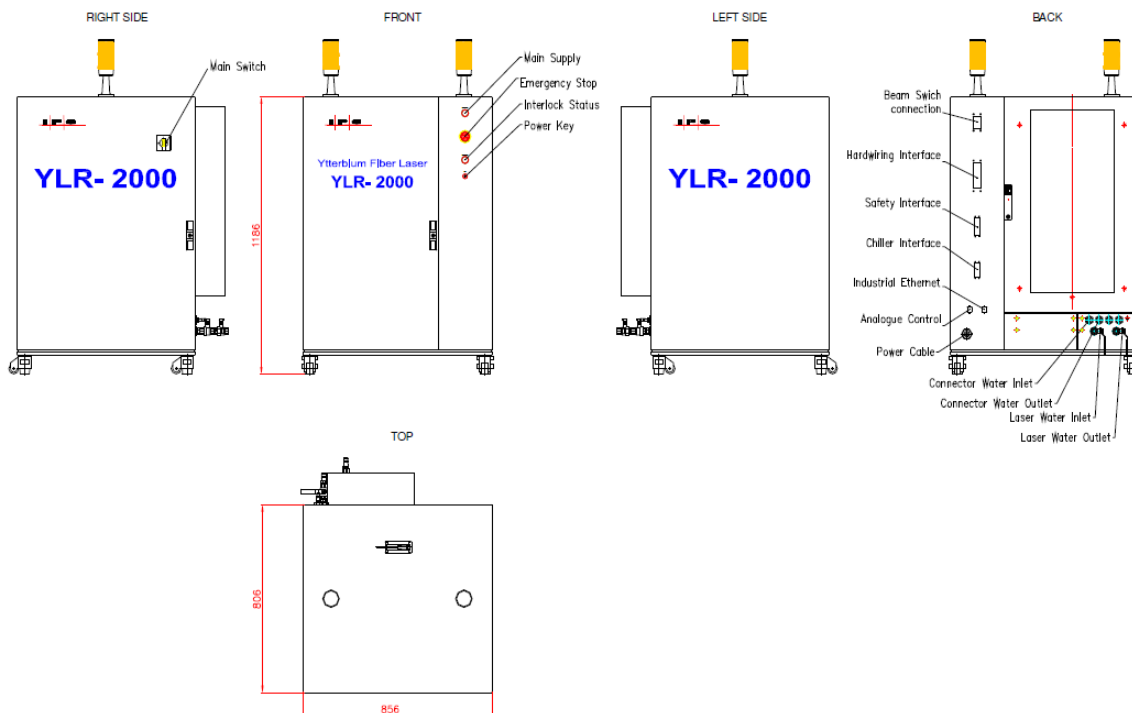


Abbildung 16 : Äußerer Aufbau des Lasers [55]

6 Angewendete Prüfverfahren

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Prüfverfahren, welche für die Untersuchungen an den Ultraschall und Lasergeschweißten Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindungen, die während dieser Diplomarbeit verwendet wurden, gegeben.

6.1 Sichtprüfung

Um einen ersten Eindruck von der Schweißverbindung zu erhalten, wurde eine Sichtprüfung nach der Arbeitsanweisung AA-QW-084 der Fa. Magna Steyr Fahrzeugtechnik durchgeführt.

Bei der Sichtprüfung unterscheidet man zwischen der direkten oder indirekten Sichtprüfung. Wie der Name schon sagt, wird bei der direkten Sichtprüfung der Strahlengang zwischen dem Auge des Prüfers und dem Hilfsmittel nicht unterbrochen. Die Hilfsmittel die dabei angewendet werden können sind: Spiegel, Vergrößerungslinsen oder das Endoskop. Demgegenüber wird bei der indirekten Sichtprüfung der Strahlengang zwischen dem Auge des Prüfers und der Prüffläche unterbrochen wobei es zur Anwendung von Foto- und Videotechnik kommt (Abbildung 17). Während der Diplomarbeit wurde die direkte und indirekte Sichtprüfung verwendet.



Abbildung 17 : Sichtprüfung an einer ultraschallgeschweißten Al-Al Schweißverbindung

6.2 Funkenspektralanalyse

Um die Werkstoffzusammensetzung und den Legierungsgehalt bei den Proben aus Aluminium, Bronze und vernickelten Kupfer zu prüfen wurde die Funkenspektralanalyse (Atom-Emissions-Spektralanalyse) angewendet.

Die Funkenspektralanalyse beruht auf dem physikalischen Prinzip, dass Metallatome bei Energiezufuhr angeregt werden und für jedes Element charakteristische Spektrallinien aussenden. Aus ihrer Wellenlänge (z.B. gelbe Spektrallinie des Natriums: $0,589 \mu\text{m}$) ist das Element zu ersehen, aus ihrer Intensität die Menge, also der prozentuelle Gehalt. Im Funkenspektrometer erfolgt die Anregung der Atome durch elektrische Funken, die auf die Probenfläche treffen. Das ausgesendete Spektrallicht wird mit einem Beugungsgitter in einzelne Linien zerlegt und mit Photozellen (Photomultiplier) ausgewertet. [33]

Die Funkenspektralanalyse wurde nach der Arbeitsanweisung AA-QW-098 durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Analysen sind im Kapitel 4 sowie im Anhang dargestellt.

6.3 Härtemessung

Unter der Härte eines metallischen Werkstoffes versteht man den mechanischen Widerstand den ein Werkstoff der mechanischen Eindringung eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt. [34].

Im Jahr 1925 entwickelten Smith und Sandland, die nach der britischen Flugzeugbaufirma Vickers benannte Härteprüfung, die in den Normen DIN EN ISO 6507-1:2005 bis -4:2005 geregelt ist. [35]

Bei diesem Prüfverfahren, das nach der Arbeitsanweisung AA-QW-074 durchgeführt wurde, wird eine gleichseitige Diamantpyramide (härterer Prüfkörper) mit einem Öffnungswinkel von $136^\circ (180^\circ - 2 \cdot 22^\circ)$ unter einer festgelegten Prüfkraft in das Werkstück eingedrückt. [36]

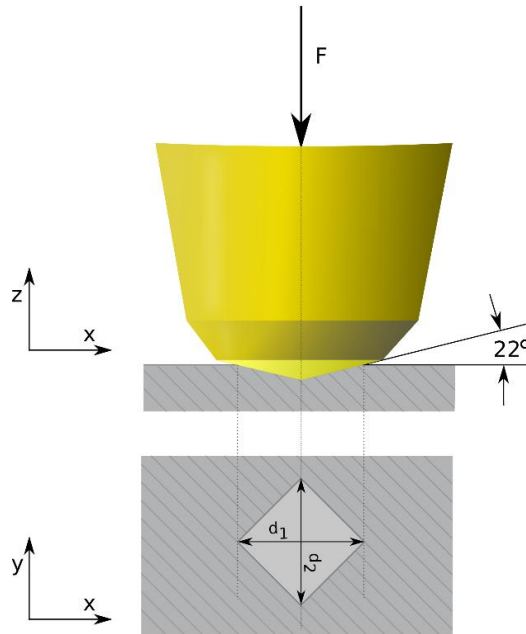


Abbildung 18 : Vickers-Härteprüfung [35]

Die Vickershärte (HV, engl. VHN = Vickers Hardness Number) wird nach folgender Formel berechnet und ist proportional dem Quotienten aus der Prüfkraft F (in N) und der Pyramideneindruckdiagonalen d (in mm):

$$HV = 0,102 \frac{2F * \sin 136^\circ / 2}{d^2}$$

Die Pyramideneindruckdiagonale (d) wird durch die, mittels eines Messmikroskops festgestellten Länge der Diagonalen (d_1 , d_2) des bleibenden Eindrucks im geprüften Werkstoff, nach folgender Formel errechnet:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Die Ergebnisse der Härtemessung sind im Kapitel 9.4.3 sowie im Anhang im dargestellt.

6.4 Statischer Zugscherversuch

Um den mechanischen Kennwert (in unseren Fall die maximal erreichbare Zugkraft F_{max}) der Schweißverbindung zu ermitteln, die auch unsere zu verbessernde Zielgröße war, wurde eine statische Zugscherprüfung an den Proben durchgeführt. Die statische Zugscherprüfung erfolgt unter einachsiger, über den Probenquerschnitt gleichmäßig verteilter Zugbeanspruchung. Damit wird die Probe einer langsamen und stoßfreien (quasistatischen) gesteigerten Belastung ausgesetzt die mit dem Probenbruch endet.

Die Zugscherversuche wurden an der Universalprüfmaschine Zwick Z250 (Abbildung 19) nach der Arbeitsanweisung AA-QW-121 der Fa. MSF durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Versuche die bei für die Auswertung durch die statistische Versuchsplanung verwendet wurden befinden sich im Anhang.



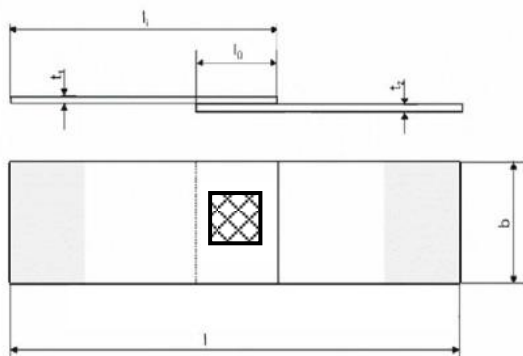
Abbildung 19 : Universalprüfmaschine Zwick Z250 [35]

6.4.1 Probengeometrie für den statischen Zugscherversuch

Bei den Ultraschall- und Laserschweißversuchen wurden folgende in den Abbildungen 20 und 21 dargestellten Probenformen gewählt. In den Abbildungen wird auch eine Skizze der Scherzugprobe mit den wichtigsten Maßen gezeigt. Der Einspannbereich ist grau markiert, die Schweißstelle ist durch den Rechteck in der Mitte markiert. Weiters sind in den Tabellen die Probenmaße sowie die Überlappungslänge dargestellt

- **Probengeometrie Ultraschallschweißen**

An den Ultraschallgeschweißten Proben wurde keine Probenvorbereitung für den Zugscherversuch durchgeführt.



Blechdicke $[t_1, t_2]$	Al: 0,5 mm; CuSn6 und Cu(Ni): 0,3 mm
Probenbreite $[b]$	18 mm
Überlappungslänge $[l_ü]$	40 mm
Gesamtprobenlänge $[l]$	160 mm
Einzelprobenlänge $[l_i]$	100 mm
Schweißfläche	8mm x 8mm

Abbildung 20 : Probengeometrie Ultraschallschweißen

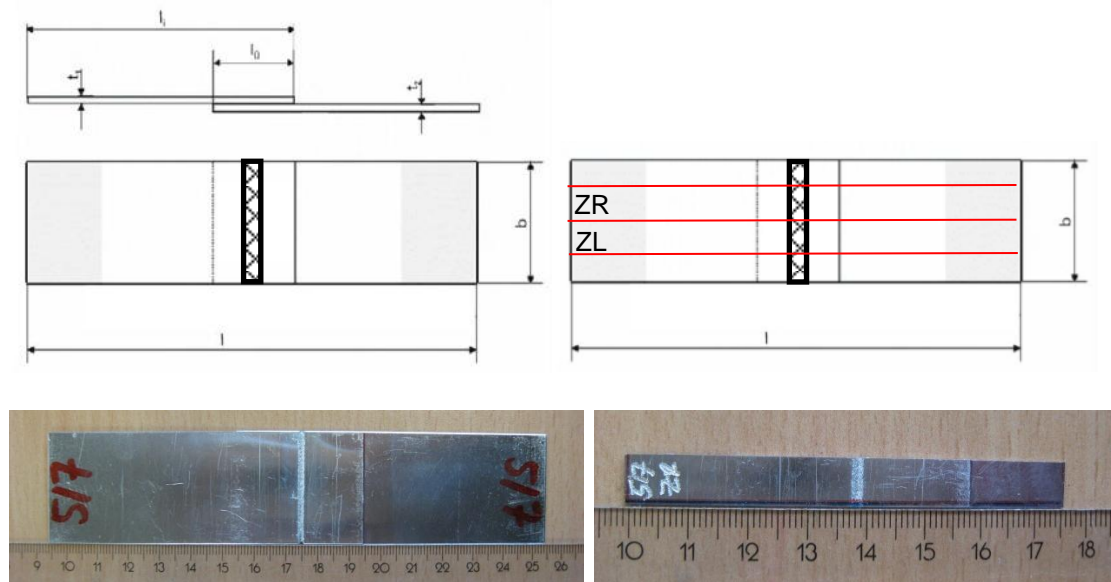
• **Probengeometrie Laserschweißen**

An den lasergeschweißten Proben wurde eine Probenvorbereitung durchgeführt. Um dabei die mechanischen Eigenschaften der Verbindung bei der Probenentnahme nicht nachhaltig zu verändern wurde, eine Nasstrennschleifmaschine verwendet.

Die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung wurden quer zu der Schweißnaht mittels der Nasstrennschleifmaschine in Streifen geschnitten.

Die roten Linien stellen den Schnitt durch die Probe dar. Insgesamt wurden an jeder Probe drei Schnitte durchgeführt wobei man vier Proben erhielt. Zwei Proben am Rand wurden für die metallographischen Untersuchungen und die zwei Proben in der Mitte für die Zugscherversuche verwendet. Nach dem zuschneiden mit der Nasstrennschleifmaschine wurden die Proben markiert wobei die Bezeichnung 5/31-Gruppe 5 Probe 31 und ZL-Zugversuch links und ZR-Zugversuch rechts bedeutet.

In der Abbildung 21 ist eine lasergeschweißte Al-Al Probe vor und nach der Zugprobenentnahme dargestellt.



Blechdicke [t₁,t₂]	Al: 0,5 mm; CuSn6 und Cu(Ni): 0,3 mm
Probenbreite [b]	35 mm
Überlappungslänge [l _ü]	40 mm
Gesamtprobenlänge [l]	160 mm
Einzelprobenlänge [l _i]	100 mm
Einzelprobenbreite Zugversuch (ZL,ZR)	8 mm

Abbildung 21 : Probengeometrie Laserschweißen

6.5 Metallographische Untersuchungen

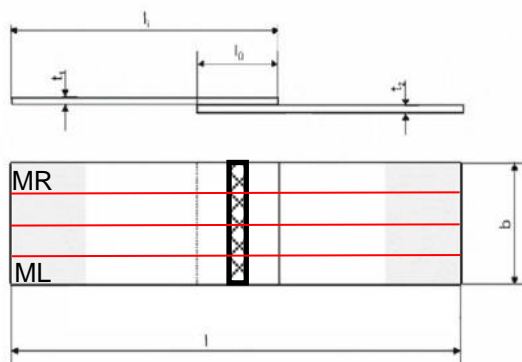
Um die Struktur und den Aufbau der hergestellten Schweißverbindungen zu analysieren, wurden von den geschweißten Blechen der Laserschweißversuche Proben für die metallographische Untersuchungen entnommen. Mit folgenden ausführten Präparationstechniken wurden Schlitze hergestellt die in weitere folge mit Hilfe der Lichtmikroskopie, der Elektronenmikroskopie sowie der Bildverarbeitung qualitativ und quantitativ der Gefüge- und Strukturuntersuchung dienen. Die metallographischen Untersuchungen wurden nach der Arbeitsanweisung AA-QW-117 durchgeführt.

• Probenentnahme

Erster Schritt vor der Probenentnahme ist die Festlegung und Markierung der optimalen Lage der Einzelproben auf dem lasergeschweißten Blech – rote Markierung (siehe Abbildung 22).

Wie in der Abbildung dargestellt wurden für die Einzelproben der Metallographie die Lage am Rand der Schweißnaht festgelegt und mit der Probenzahl markiert. Wobei 5/7-Gruppe 5 Probe 7 und ML-Metallographie links und MR-Metallographie rechts bedeutet.

Ein metallographischer Schliff ist laut Arbeitsanweisung AA-QW- 117 der Fa. Magna Steyr Fahrzeugtechnik, eine aus dem zu untersuchenden Bauteil ausgeschnittene, eingebettete, geschliffene und polierte Probe mit oder ohne Ätzung die einer makroskopischen oder mikroskopischen Untersuchung untergezogen wird.



Blechdicke [t₁,t₂]	Al: 0,5 mm; CuSn6 und Cu(Ni): 0,3 mm
Probenbreite [b]	35 mm
Überlappungslänge [l _ü]	40 mm
Gesamtprobenlänge [l]	160 mm
Einzelprobenlänge [l _i]	100 mm
Einzelprobenbreite	8 mm
Metallographie (ML,MR)	

Abbildung 22 : Probengeometrie für den metallographischen Schliff

• Präparation der entnommenen Proben

Nachdem die Proben entnommen und markiert wurden sind sie in einem Warmeinbettmittel eingebettet und anschließend mit Siliziumpapier (Körnung P220 bis P1000) geschliffen und mit Polierscheiben und Dispersionen (Körnung 6µm und 3µm) poliert worden.

Nach einer gründlichen Reinigung wurden die Proben mit einer 10%igen Natronlauge geätzt und nach einem weiteren Reinigungsschritt getrocknet.

Die Analyse unter dem Lichtmikroskop und die Dokumentation der Bilder sind in den Ergebnissen und im Anhang dargestellt.

6.6 Rasterelektronenmikroskopie

Um ein besseres Verständnis vom Aufbau und der Zusammensetzung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung zu gewinnen, wurden insgesamt drei Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die daraus gewonnen Erkenntnisse sind im Kapitel 9.4.4 zusammengefasst.

Unter einem Rasterelektronenmikroskop (REM) (englisch Scanning Electron Microscope, SEM) bezeichnet man ein Elektronenmikroskop, bei dem ein Elektronenstrahl in einem bestimmten Muster über das vergrößert abzubildende Objekt geführt (gerastert) wird und Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Objekt zur Erzeugung eines Bildes des Objekts genutzt werden. Die Bilder die mit einem Rasterelektronenmikroskop erstellt werden sind Abbildungen der Objektoberflächen und weisen eine hohe Schärfentiefe auf. [37,52]

Beispielhaft ist in der Abbildung 23 eine Fugestelle, die mittels Ultraschallschweißen hergestellt wurde, dargestellt.

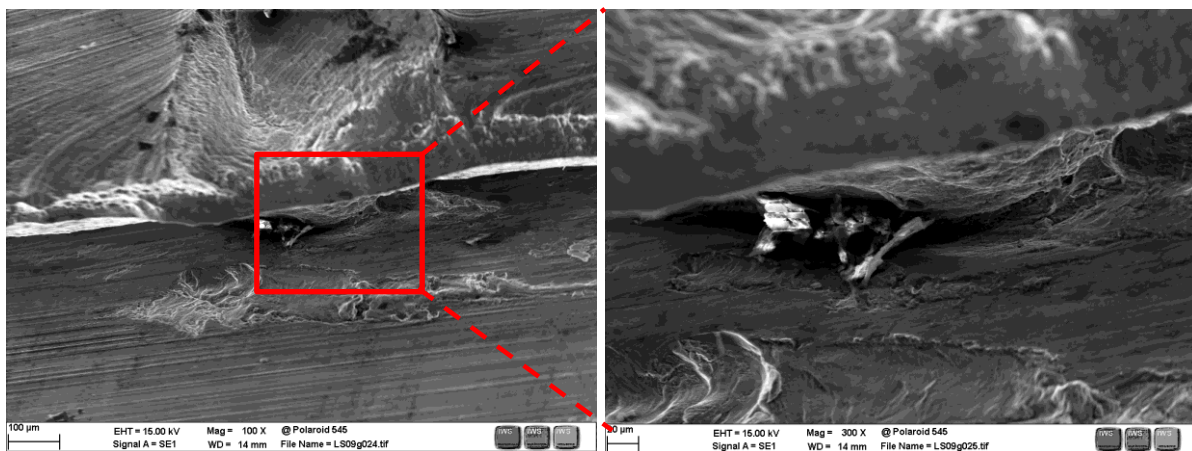


Abbildung 23 : REM Aufnahme einer Ultraschallgeschweißten Fugestelle

Neben den Rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden an den drei Proben auch eine Energiedispersive Analyse durchgeführt.

Energiedispersive Röntgenspektroskopie (engl. energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) ist eine Messmethode mit der die Atome in der Probe durch einen Elektronenstrahl einheitlicher Energie angeregt werden. Sie senden dann Röntgenstrahlung einer für das jeweilige Element spezifischen Energie aus, die charakteristische Röntgenstrahlung. Diese Strahlung gibt Aufschluss über die Elementzusammensetzung der Probe. [37,52]

Die Abbildung 24 stellt als Beispiel einer EDX-Analyse ein Spektrum dar. In einem Spektrum werden alle vorkommenden Elemente des Untersuchungsbereiches aufgezeigt.

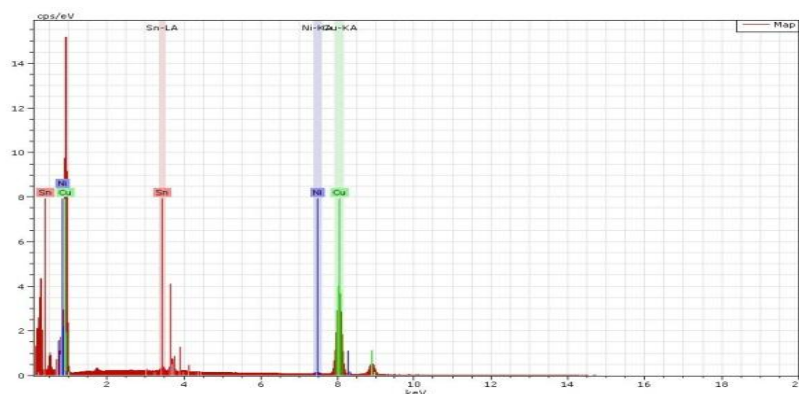


Abbildung 24 : Spektrum der vorkommenden Elemente im Untersuchungsbereich

7 Statistische Versuchsplanung

7.1 Geschichte und Entwicklung der statistischen Versuchsplanung

In den 30er Jahren hat der englische Wissenschaftler Sir Ronald Aylmer Fisher (1880-1962), der bei der landwirtschaftlichen Versuchsanstalt Rothamsted tätig war, die ersten statistischen Versuchspläne aufgestellt. Durch überwachte Feldversuche untersuchte er die Auswirkung von unterschiedlichen Düngemitteln und Saatgut auf den Ertrag. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen veröffentlichte Hr. Fisher in dem Aufsatz „The Arrangement of Field Experiments“ (das Arrangieren von Feldexperimenten) in welchem er noch bis heute gültige Grundprinzipien der Versuchsplanung darstellte. Deswegen gilt Hr. Fisher als der Erfinder der DoE. [41]

In den 50er Jahren gelang es George E.P. Box, der in der chemischen Industrie tätig war, Response-Surface-Methoden (Versuchspläne für Optimierungsaufgaben) zu entwickeln und damit Anwendungsgebiete auch außerhalb des landwirtschaftlichen Sektors zu erschließen.[41]

Die Weiterentwicklung der statistischen Versuchsplanung trieb der japanische Ingenieur Genichi Taguchi in den 60er Jahren wesentlich voran. Die Taguchi-Methode basiert auf der Minimierung der Streuung um den Sollwert. Das wird durch eine robuste Gestaltung der Produkte, Prozesse und Systeme (d.h. sie sollen möglichst unempfindlich gegenüber Störeinflüssen sein, denen sie in der Praxis ausgesetzt sind) erreicht. [53]

Dorian Shainin (1914 - 2000) führte die Arbeiten von Taguchi weiter und definierte 22 Werkzeuge (z.B. Multi-Vari-Bild, Komponententausch, Paarweiser Vergleich usw.) die zur Sicherung der Qualität beitragen können. [41]

7.2 Grundlegende Prinzipien und Begriffe der statistischen Versuchsplanung [39]

Ein Grund für den durchschlagenden Erfolg der statistischen Versuchsplanung liegt in der weltweit standardisierten Vorgehensweise, insbesondere der Darstellung der Ergebnisse. Dieser Normierungseffekt begünstigt eine effiziente Kommunikation innerhalb und zwischen den beteiligten Unternehmen. Die Grundbegriffe, wie zum Beispiel Faktor, Effekt oder Wechselwirkung, bilden sozusagen das Vokabular der Methode. [17, 38,39]

1. Zielgrößen

Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuchs. Zielgrößen können Messwerte sein, aber auch Größen, die aus einem oder mehreren Messwerten errechnet werden. Bei einem Versuch können mehrere Zielgrößen bestimmt werden.

2. Einflussgrößen

Einflussgrößen sind Größen, die die Versuchsergebnisse (Zielgrößen) möglicherweise beeinflussen. Einflussgrößen werden von G. Taguchi in Steuergrößen und Störgrößen unterteilt.

3. Steuergrößen

Steuergrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Fertigungsprozess auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) gehalten werden kann (Konstruktions- bzw. Prozessparameter).

4. Störgrößen

Störgrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Fertigungsprozess nicht vorgegeben werden kann (oder z.B. aus Kostengründen nicht vorgegeben werden soll).

5. Faktoren

Aus der Vielzahl der Einflussgrößen werden für den Versuch die vermuteten wesentlichen Einflussgrößen ausgewählt. Diese für den Versuch ausgewählten Einflussgrößen heißen Faktoren.

6. Faktorstufen

Nach der Auswahl der Faktoren muss festgelegt werden, welche Werte die Faktoren in Versuch annehmen sollen. Diese ausgewählten Werte werden als Stufen bezeichnet.

7.3 Vorgehensweise bei der statistischen Versuchsplanung [39]

Um die Zusammenhänge zwischen den Einfluss- und Zielgrößen zu ermitteln, sowie die optimalen Einstellungen im Parameterfenster zu bestimmen, lässt sich die Realisierung einer Optimierungsstrategie im Rahmen der statistischen Versuchsplanung in Durchführung von drei Phasen unterteilen [17,38]:

- Phase I: Vorversuch
- Phase II: Hauptversuch
- Phase III: Bestätigungsversuch

Jede dieser Phasen beinhaltet folgende acht Einzelschritte die in der Tabelle 12 dargestellt sind [39]:

Schritt 1:	Untersuchungsziel festlegen Zielgrößen definieren
Schritt 2:	Einflussgrößen bestimmen
Schritt 3:	Wesentliche Einflussgrößen auswählen Versuchsfaktoren festlegen
Schritt 4:	Faktorstufen für die ausgewählten Faktoren bestimmen
Schritt 5:	Versuchsplan auswählen und aufstellen
Schritt 6:	Versuche vorbereiten und durchführen
Schritt 7:	Versuche auswerten und interpretieren
Schritt 8:	Versuchsergebnisse bestätigen

Tabelle 12: Einzelschritte bei der statistischen Versuchsplanung

Schritt 1: Untersuchungsziel festlegen / Zielgrößen definieren

Das Untersuchungsziel festzulegen ist die einleitende Phase der statistischen Versuchsplanung. Bei der Festlegung des Untersuchungszieles werden folgende grundsätzliche Möglichkeiten unterschieden:

1. Optimale Lage des Mittelwerts

In der Untersuchung möchte man ermitteln, wie der Mittelwert eines Prozessergebnisses oder eines Produktparameters, von den verschiedenen Faktoren abhängt. Aus dieser Abhängigkeit ergeben sich dann optimale Einstellungen für die Faktoren.

2. Reduzierung der Streuung / Robustheit

In der Fertigung ist oft weniger die Lage des Mittelwertes des Prozessergebnisses problematisch als dessen Streuung. Soll die Streuung reduziert werden, so ist die Standardabweichung von mehreren Versuchsrealisierungen eine geeignete Zielgröße. Mit dieser Zielsetzung wird ein robuster Prozess, d.h. ein Prozess, dessen Ergebnis möglichst wenig von bestimmten Störgrößen abhängt, angestrebt.

3. Erkennen der wichtigsten Störgrößen in der Fertigung

Ziel dieser von D.Shainin Methode ist es, durch eine systematische Beobachtung der Fertigung mit einfachen Versuchen herauszufinden, welche Störgröße besonders wichtig ist. Diese Störgröße wird dann gezielt überwacht - enger toleriert.

Die geeignete Auswahl der Zielgröße, Faktoren und Faktorstufen sind entscheidend für den Erfolg einer Versuchsplanung.[40]

Bei der Auswahl der Zielgröße ist auf folgende Aspekte zu achten:

- **Relevanz**

Zielgrößen müssen in einem möglichst engen Zusammenhang zu den Untersuchungszielen stehen.

- **Quantifizierung**

Zielgrößen sollen möglichst quantitative Größen sein. Messwerte enthalten wesentlich mehr Information als Gut/Schlecht – Aussagen.

- **Vollständigkeit**

Alle wesentlichen Prozessergebnisse bzw. Produkteigenschaften müssen als Zielgrößen erfasst werden.

Schritt 2: Einflussgrößen bestimmen

Die Bedeutung einer Einflussgröße, die nicht als Faktor in der Untersuchung enthalten ist, kann natürlich nicht erkannt werden. Und verändert sich eine wichtige Einflussgröße unkontrolliert während des Versuches, so kann sie die Ergebnisse verfälschen. Daher dürfen bei der Planung keine wichtigen Einflussgrößen vergessen werden.

Es hat sich bewährt, die Auswahl der Faktoren in zwei Schritte zu zerlegen: Zunächst werden möglichst viele Einflussgrößen gesammelt. Erst danach wird aus der Vielzahl der Einflussgrößen eine handhabbare Anzahl von Faktoren für die weitere Untersuchung ausgewählt.

Zur Sammlung der Einflussgrößen ist das Brainstorming geeignet. Um die Diskussion im Team zu strukturieren und möglichst nichts zu vergessen helfen grafische Darstellungen wie das Ursachen-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa- oder

Fischgrätendiagramm). Dabei werden die Ursache- Wirkungs-Zusammenhänge grafisch immer weiter unterteilt, meist angefangen bei : Maschine, Prozess, Material und Mensch/Umwelt.[41]

Schritt 3: Wesentliche Einflussgrößen auswählen (Auswahl der Faktoren)

In dieser Phase wird aus der Vielzahl der gefundenen (möglichen) Einflussgrößen eine handhabbare Anzahl von Faktoren für die weitere Untersuchung ausgewählt (typisch 3-6, nur selten mehr als 10).

Das wichtigste Auswahlkriterium ist die vermutete Bedeutung der Einflussgrößen für die Lösung des zu untersuchenden Problems.

Die ausgewählten Faktoren müssen unabhängig voneinander veränderbar sein.

Schritt 4: Festlegung der Faktorstufen

1. Anzahl der Faktorstufen

Enthält der Versuchsplan viele Faktoren (bis 6), so werden zur Begrenzung des Aufwandes normalerweise nur zwei Stufen für jeden Faktor untersucht. Mit einem solchen Versuchsplan kann man feststellen:

- Welche der Faktoren wichtig sind,
- Wie groß ihr linearer Effekt auf jede der Zielgrößen ist
- Welche Stufe eines Faktors für jede der Zielgrößen günstig ist.

Enthält ein Versuchsplan nur wenige Faktoren, so können auch mehr als zwei Stufen für jeden Faktor untersucht werden. Damit kann man auch das Maximum/Minimum einer Zielgröße finden. [42]

2. Werte der Faktorstufen (quantitative Faktoren)

- Ausgangspunkt ist normalerweise der bisher beste Fertigungsprozess bzw. das bisher beste Produkt. Vermutet man eine Verbesserung in eine bestimmte Richtung, nimmt man als eine Stufe den bisher besten Zustand, als zweite Stufe einen Wert in die vermutlich bessere Richtung.
- Je kleiner der Abstand zwischen den Stufen ist, desto kleiner ist auch der Unterschied zwischen den Ergebnissen und desto größer ist der Versuchsumfang, der erforderlich ist, um trotzdem einen Unterschied zwischen den Ergebnissen zu erkennen.
- Je größer der Abstand zwischen den Stufen ist, desto größer kann die Abweichung der Ergebnisse von der Linearität sein. Mit zwei Stufen können diese Abweichungen jedoch nicht erkannt werden, sie verfälschen daher das Ergebnis.
- Eine Extrapolation der Ergebnisse über den untersuchten Bereich hinaus ist nicht zulässig, daher sollte die Untersuchung den interessanten Bereich möglichst enthalten.[39]

Nicht untersuchte Einflussgrößen (vor allem Störgrößen) werden möglichst konstant gehalten, um so die Zufallsstreuung zu minimieren. Je kleiner die Zufallsstreuung ist, desto kleinere Effekte der Faktoren können noch erkannt werden.

Schritt 5: Versuchsplan auswählen und aufstellen

Für den Ausführenden ist ein Versuchsplan einfach ausgedrückt eine Art Ablaufplan, der vorschreibt, in welcher Reihenfolge die Versuche mit den zugehörigen Einstellungen der Faktoren vorzunehmen sind. [45]

Der optimale Versuchsplan hängt vom Untersuchungsziel, von der Anzahl der Faktoren, von der Anzahl der Stufen je Faktor, von der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse und von der Größe der Zufallsstreuung ab.

Schritt 6: Versuche vorbereiten und durchführen

Eine sorgfältige Planung und Vorbereitung gewährleistet einen reibungslosen und fehlerfreien Ablauf der Versuche. Dazu gehören folgende Schritte:

- Planung der erforderlichen Ressourcen
- Überprüfung der Messgeräte und Messverfahren
- Auswahl, Kennzeichnung und Zuordnung der Teile
- Festlegung des Versuchs- und Messablaufs
- Zuordnung und Einweisung des Personals
- Durchführung eines Pilotversuchs

Bei der Versuchsdurchführung, Messung und Übertragung der Ergebnisse ist auf besondere Sorgfalt zu achten.

Schritt 7 und 8: Versuchsergebnisse auswerten und bestätigen

Die statistische Auswertung und Bestätigung der Versuchsergebnisse wird in den beiden folgenden Kapiteln 8 und 9 (Ergebnisse der Zugscherversuche für das Ultraschall- und Laserschweißen – statistische Versuchsplanung) ausführlich beschrieben.

8 Ergebnisse der Zugscherversuche für das Ultraschallschweißen-statistische Versuchsplanung

8.1 Screeningversuch

Der Screeningversuch wird angewendet wenn erst wenig über eine Problemstellung bekannt ist. Dabei werden meist viele Faktoren untersucht, denn man möchte wissen, welche dieser Faktoren wichtig sind und in welche Richtung sie die Zielgröße beeinflussen.

8.1.1 Zielgrößenbestimmung

Die festgelegte Zielgröße, die bei dem statischen Zugscherversuch an geschweißten Proben ermittelt werden sollte, war die maximale Bruchkraft F_{\max} [N]

Die Bruchkraft ist ein in der Werkstoffprüfung verwendeter Begriff für die Kraft, die benötigt wird, um einen Prüfkörper zu brechen oder zu zerreißen. [46]

Beim Zugscherversuch wird sie definiert durch den Kraftabfall, der auftritt, wenn das Maximum der Kraft überschritten ist, bei der sich der Werkstoff noch elastisch verformt. Fällt die Kraft z. B. um 20 % ab, wird von der Universalprüfmaschine automatisch erkannt, dass die Probe gebrochen ist.

Die qualitative Darstellung dieser Zielgröße ist in der Abbildung 25 ersichtlich.

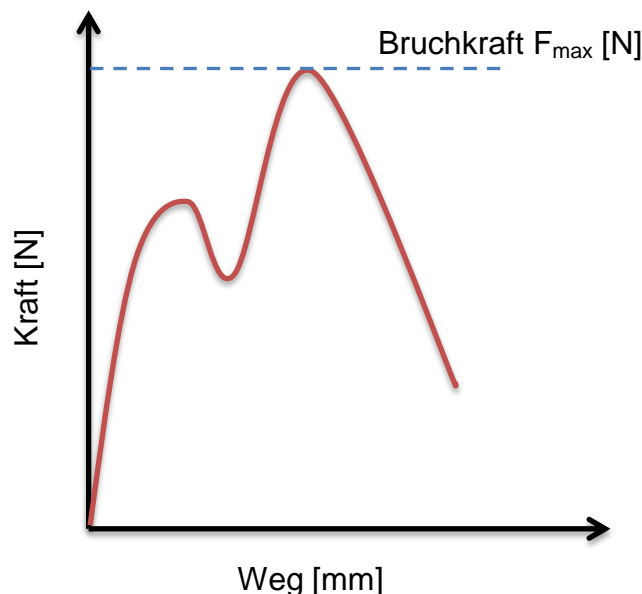


Abbildung 25 : Zielgröße beim statischen Zugscherversuch

Für Probenform der Zugscherversuche siehe Abbildung 20 und 21 im Kapitel 6.4.

8.1.2 Einflussgrößen bestimmen

In einem Brainstorming, an welchem das Expertenteam der Werkstofftechnik (MSF) teilnahm, wurde versucht, jene Größen zu benennen, die Einfluss auf die maximale Bruchkraft F_{\max} [N] einer Schweißverbindung ausüben könnten.

Diese Einflussgrößen werden nach Hauptgruppen (Prozess, Material, Maschine, Mensch/Umfeld) unterteilt und im Ishikawa-Diagramm dargestellt.

Das Ishikawa-Diagramm (auch Ursache-Wirkungs-Diagramm genannt) dient der Zuordnung von Einflüssen (Ursachen) zu einer Wirkung und stellt sie graphisch dar. (Abbildung 26).

MAGNA STEYR	Datum:	09.09.2009
	Thema:	ultrasonic welding
	Team:	Puder, Mucic

Ursachen-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm)

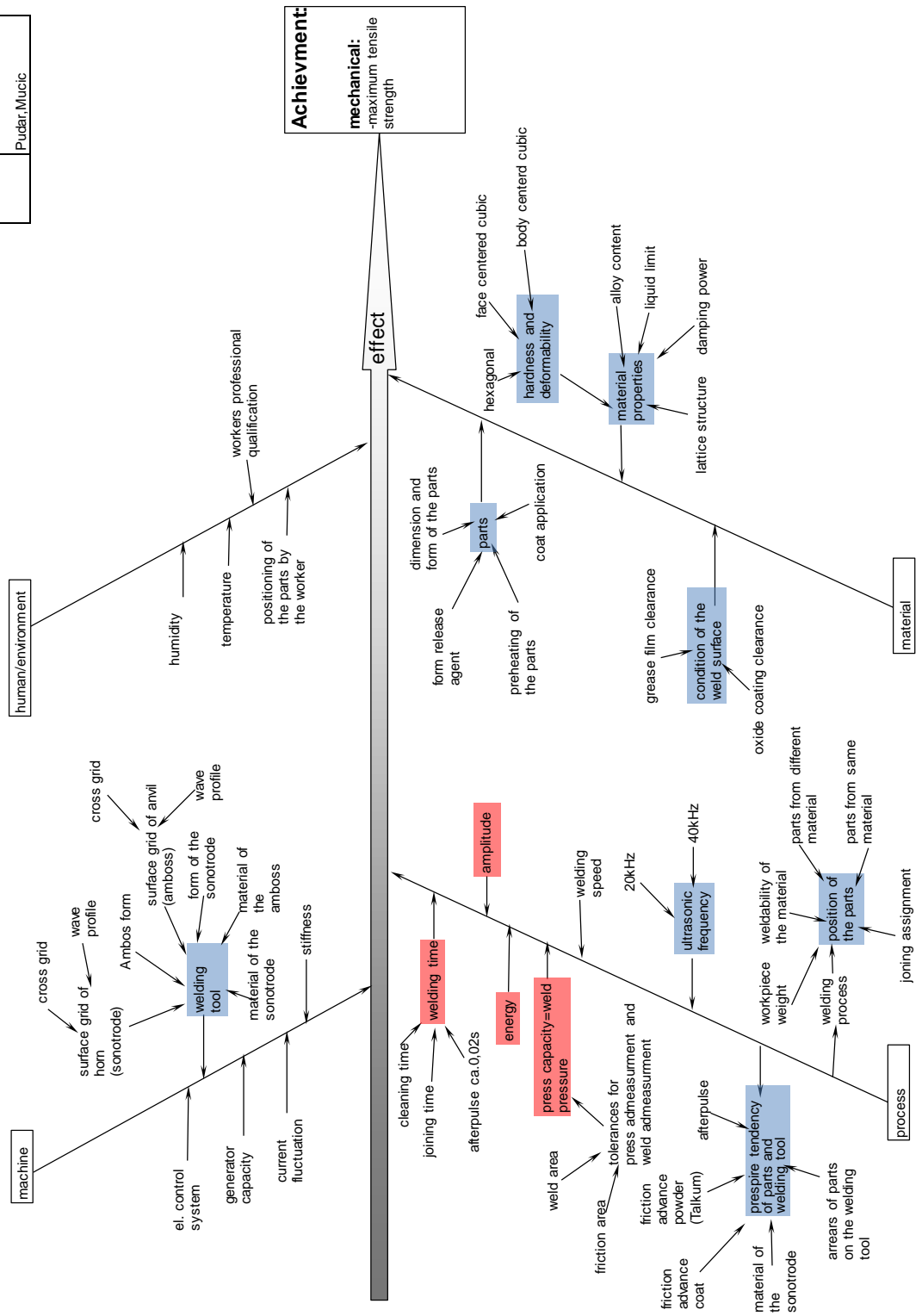


Abbildung 26 : Ishikawa-Diagramm für das Ultraschallschweißen

8.1.3 Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen

Der nächste Schritt bei der Statistischen Versuchsplanung beinhaltet die Auswahl der wesentlichen Einflussgrößen, die dann als Versuchsfaktoren festgelegt werden, und für die, Faktorstufen bestimmt werden.

Wie aus dem Ishikawa-Diagramm ersichtlich, wurden viele potentielle Einflussgrößen auf die Zielgröße gefunden. Da unter anderem ein Ziel dieser Diplomarbeit die systematische Untersuchung des Ultraschallschweißens war, konzentrierten wir uns auf die Hauptgruppe „Prozess“ und die im Ishikawa-Diagramm rot markierten Felder (Abbildung 26).

Das wichtigste Bewertungskriterium bei der Auswahl der Versuchsfaktoren war der Einfluss auf die Zielgröße- wie groß er von Experten anhand von Vorversuchen eingeschätzt wird.

Damit wurden folgenden vier Einflussgrößen als Versuchsfaktoren für den Screeningversuch festgelegt:

1. **Energie [J]**
2. **Amplitude [μm]**
3. **Haltezeit [s]**
4. **Schweißdruck [psi]**

Der Einfluss aller anderen im Ishikawa-Diagramm angeführten Einflussgrößen kann zwar nicht ganz ausgeschlossen werden, wird aber als zu gering erachtet, um weiter betrachtet zu werden.

Für die festgelten Versuchsfaktoren werden nun Faktorstufen (Einstellwerte), auch anhand von Vorversuchen, definiert. Dabei wird zwischen einer niedrigen und hohen Stufe unterschieden. (siehe Tabelle 13)

Al-Al Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Amplitude [μm]	30	50
Energie [J]	200	500
Schweißdruck [psi]	30	40
Haltezeit [s]	0,15	0,30

CuSn6-Cu(Ni) Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Amplitude [μm]	30	50
Energie [J]	400	700
Schweißdruck [psi]	30	40
Haltezeit [s]	0	0,2

Tabelle 13: Versuchsfaktoren und deren Faktorstufen des Screeningversuches für das Ultraschallschweißen
(1psi = $6,9 \cdot 10^3$ Pa)

8.1.4 Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen

Bei dem Screeningversuch geht es vorrangig um die Identifikation der signifikantesten Versuchsfaktoren und um die Erkenntnis in welche Richtung die Versuchsfaktoren die Zielgröße beeinflussen. Um diese Erkenntnisse zu gewinnen werden für die Screenversuche fraktionelle faktorielle Versuchspläne verwendet.

Die fraktionelle faktorielle Versuchspläne sind eine Weiterentwicklung der vollständig faktoriellen Versuchspläne, bei welchen alle möglichen Kombinationen der Faktorstufen der Versuchsfaktoren erfasst werden.

Der Große Nachteil der vollfaktoriellen Versuchspläne ist das mit zunehmender Anzahl der Versuchsfaktoren (k) die Anzahl der notwendigen Faktorstufenkombinationen (n) sehr schnell ansteigt (siehe Formel) [38,39]

$$n = 2^k$$

Um diesen Nachteil entgegen zu wirken und damit die Kosten möglichst gering zu halten wurden die fraktionelle faktorielle Versuchspläne entwickelt.

In unseren Fall wurde für den Screeningversuch Anstelle eines 2^4 vollfaktoriellen ein 2^{4-1} fraktioneller faktorieller Versuchsplan verwendet. Da bei den Screeningversuchen meistens zwei Replikationen der jeweiligen Faktorstufenkombination durchgeführt werden, wird schnell klar das durch die Auswahl des 2^{4-1} fraktionellen faktoriellen Versuchsplans der Versuchsumfang um 50% reduziert werden konnte. (16 anstatt von 32 Versuchen).

Im Screeningversuch wird ein linearer Zusammenhang der Zielgröße mit den Versuchsfaktoren angenommen. Um diese Annahme zu überprüfen wurde eine zusätzliche Faktorstufenkombination (Zentrumspunkt) fünfmal verschweißt.

Damit belief sich der Versuchsumfang des Screeningversuchsplanes auf insgesamt 21 Proben jeweils für die Al-Al- als auch für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.

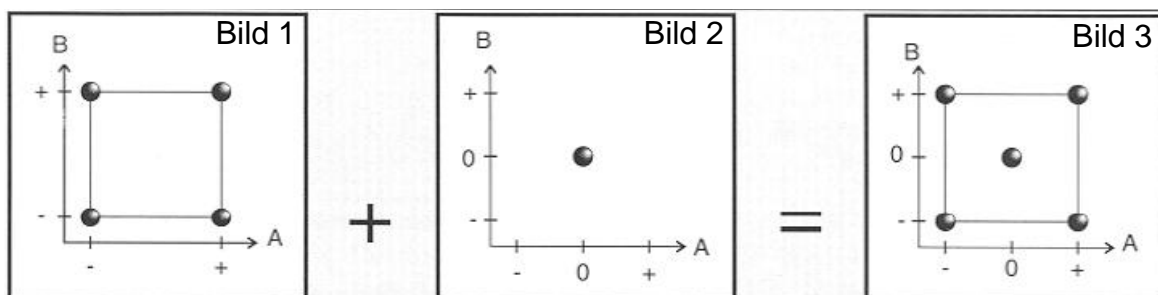


Abbildung 27 : Grafische Darstellung des Screeningversuchsplanes

In der Abbildung 27 sind die Faktorstufenkombinationen unseres Versuchsplanes grafisch dargestellt: Sie bilden die Eckpunkte eines Würfels für den fraktioneller faktorieller Versuchsplan (Bild 1). Der fraktioneller faktorieller Versuchsplan wurde, wie in Bild 2, um eine Faktorstufenkombination in der Mitte des untersuchten Bereiches ergänzt. A und B stellen die Versuchsfaktoren (die Amplitude und Energie) und das + und - die hohe und tiefe Faktorstufe des Versuchsfaktors dar. Bild 3 ist selbsterklärend und stellt den gesamten Versuchsplan dar.

8.1.5 Versuchsdurchführung

Die Schweißverbindungen wurden bei der Firma Branson Amtech an dem 20 kHz Schweißsystem Ultraweld®-L20 hergestellt (Abbildung 7 im Kapitel 5.1.8).

Das Schweißen der Proben erfolgte nach der randomisierten Reihenfolge des Screeningversuchsplans siehe Tabelle 14 und 16, der mit der Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) erstellt wurde.

Nach dem Zugscherversuch erhielt man für jede Schweißverbindung die maximale Bruchkraft (F_{max}), die dann für weitere Auswertung in die Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) eingegeben wurde.

8.1.6 Auswertung und Ergebnisse

Die Tabelle 14 stellt den randomisierten Screeningversuchsplan für die Aluminium Verbindung und die die Tabelle 16 für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung mit den dazugehörigen maximalen Bruchkräften dar. Die Werte variieren zwischen 809,1 N (Probe 1/7) und 1057,1 N (Probe 1/1) bei der Aluminium Verbindung und zwischen 337,1 N (Probe 3/15) und 1157,5 (Probe 3/1) bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.

Bei der Aluminium Verbindung liegen die Standardabweichungen bei der ersten Replikation bei 88,05 N ($\leq 9,2\%$ vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 108,83 N ($\leq 11,6\%$ vom Mittelwert) und bei dem verschweißen der fünf Zentrumspektparametereinstellungen bei 51,85 N ($\leq 5,4\%$ vom Mittelwert). Diese Werte sind in der Tabelle 15 zusammengefasst und zeugen von einer großen Homogenität der Versuchsdurchläufe.

Probenr:	Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Haltezeit [s]	Amplitude [μm]	Fmax [N]
1/1	500	30	0,15	50	1057,1
1/2	350	35	0,23	40	1020,1
1/3	500	40	0,30	50	1045,5
1/4	200	30	0,15	30	906,4
1/5	200	40	0,15	50	979,0
1/6	350	35	0,23	40	931,6
1/7	500	30	0,30	30	809,1
1/8	200	40	0,30	30	950,6
1/9	200	40	0,30	30	759,6
1/10	500	40	0,30	50	1032,6
1/11	500	40	0,15	30	868,1
1/12	200	40	0,15	50	1023,6
1/13	200	30	0,30	50	1017,2
1/14	350	35	0,23	40	953,1
1/15	500	40	0,15	30	818,1
1/16	200	30	0,15	30	942,3
1/17	350	35	0,23	40	988,1
1/18	350	35	0,23	40	885,2
1/19	500	30	0,15	50	1026,2
1/20	500	30	0,30	30	869,1
1/21	200	30	0,30	50	1026,8

Tabelle 14: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Screeningversuches Al-Al Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	954,13	88,05	809,1	1057,1
2	937,29	108,82	818,1	1032,6
Zentrumspkt.	955,62	51,85	885,2	1020,1

Tabelle 15: Deskriptive Statistik des Screeningversuches Al-Al Verbindung

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung liegen die Standardabweichungen bei der ersten Replikation bei 287,66 N ($\leq 35,9\%$ vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 289,87 N ($\leq 39,3\%$ vom Mittelwert) und bei dem verschweißen der fünf Zentrumspktparametereinstellungen bei 97,03 N ($\leq 10,2\%$ vom Mittelwert). Die Ergebnisse des Screeningversuches für die CuSn6-Cu(Ni)-Verbindung sind in der Tabelle 17 dargestellt.

Bei der Analyse dieser Werte wird sofort klar dass im Hauptversuch das Parameterfenster (die hohe und tiefe Faktorstufe) „enger“ gewählt werden müssen um die Streuung zu minimieren.

Probennr:	Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Haltezeit [s]	Amplitude [μm]	Fmax [N]
3/1	700	30	0	50	1157,5
3/2	550	35	0,1	40	866,6
3/3	700	40	0,2	50	983,1
3/4	400	30	0	30	442,1
3/5	400	40	0	50	1027,3
3/6	550	35	0,1	40	746,4
3/7	700	30	0,2	30	766,9
3/8	400	40	0,2	30	423,0
3/9	400	40	0,2	30	341,2
3/10	700	40	0,2	50	958,2
3/11	700	40	0	30	590,1
3/12	400	40	0	50	1000,2
3/13	400	30	0,2	50	1025,6
3/14	550	35	0,1	40	950,9
3/15	700	40	0	30	337,1
3/16	400	30	0	30	598,9
3/17	550	35	0,1	40	827,6
3/18	550	35	0,1	40	706,5
3/19	700	30	0	50	1022,4
3/20	700	30	0,2	30	687,1
3/21	400	30	0,2	50	961,5

Tabelle 16: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche)des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	801,95	287,66	423,0	1157,5
2	738,32	289,87	337,1	1022,4
Zentrumspkt.	955,62	97,03	706,5	950,9

Tabelle 17: Deskriptive Statistik des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

8.1.7 Signifikante Versuchsfaktoren

Anhand von statistischen Tests (Hypothesentest, F-Test; t-Test) wird die Aussage getroffen, ob sich eine Veränderung der Versuchsfaktoren entscheidend auf die Zielgrößen auswirkt. Die oben genannten statistischen Tests werden von der Statistiksoftware Minitab 15® durchgeführt und liefern uns folgende im Pareto-Diagramm grafisch dargestellten Ergebnisse:

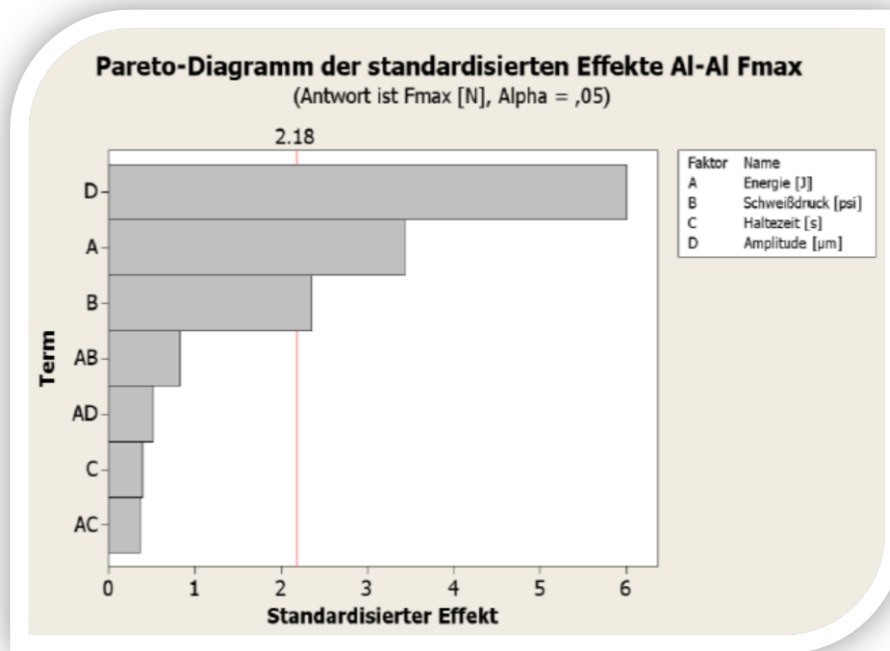


Abbildung 28 : Pareto-Diagramm-Ultraschallschweißen Al-Al Schweißverbindung

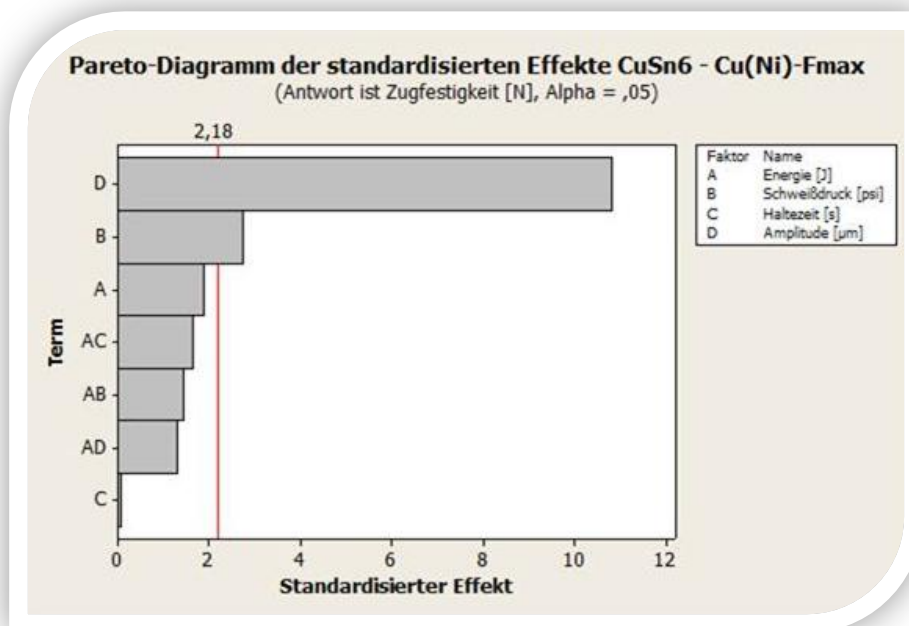


Abbildung 29 : Pareto-Diagramm-Ultraschallschweißen CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

Im Pareto-Diagramm werden die absoluten Werte der Effekte aller untersuchten Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen (Vermengungen) als Balken gegeneinander aufgetragen.

Wenn zwei oder mehr Effekte miteinander vermischt sind (z.B. AB, AD, AC), dann bedeutet das, dass bei der Auswertung die Summe der Effekte bestimmt werden kann und nicht der Einzeleffekt der jeweiligen Faktoren.

Die senkrechte Linie an der Stelle 2,18 kennzeichnet das theoretische Quantil der t-Verteilung, d.h. alle Einflussgrößen deren Werte im darüber liegenden Bereich dieser senkrechten Referenzlinie liegen, haben einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße [38-41].

Der Signifikanz nach geordnet, sind in der Tabelle 18 die Schweißparameter für die Al-Al Schweißnahtverbindung dargestellt.

Al-Al Verbindung
Amplitude [μm]
Energie [J]
Schweißdruck [psi]

Tabelle 18: Signifikante Schweißparameter für die Al-Al Schweißverbindung

Der Signifikanz nach geordnet, sind in der Tabelle 19 die Schweißparameter für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißnahtverbindung dargestellt.

CuSn6-Cu(Ni)- Verbindung
Amplitude [μm]
Schweißdruck [psi]
Energie [J]

Tabelle 19: Signifikante Schweißparameter für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

Die ermittelten Ergebnisse sind nur im definierten Versuchsbereich gültig und eine Extrapolation in andere Bereiche ist nicht zulässig.

8.1.8 Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße

Um die beiden wichtigsten Versuchsfaktoren (Amplitude und Energie) beider Schweißnahtverbindungen und ihren Einfluss auf die Zielgröße näher zu analysieren wurden 3D-Oberflächendiagramme erstellt.

Die folgende 3D-Oberflächendiagramme zeigen die Zugscherkraftverteilung in Abhängigkeit von der Amplitude und der Energie.

Für beide Fügepaarungen (Al-Al und CuSn6-Cu(Ni)) wird deutlich, dass die höchsten Zugscherkräfte stets für höchste Werte der Amplitude erreicht werden. (Abbildung 30 und 31)

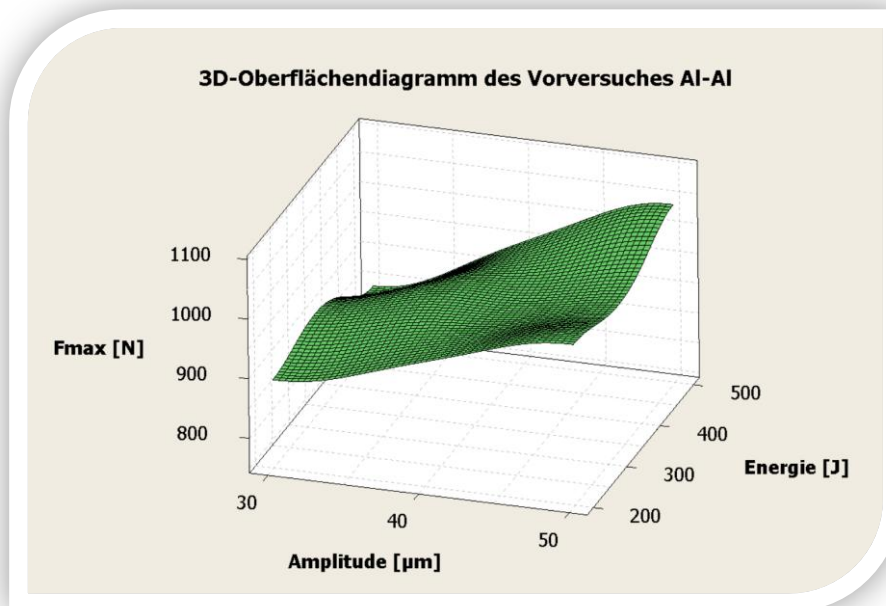


Abbildung 30 : 3D-Oberflächendiagramm der Al-Al Schweißverbindung für den Screeningversuch

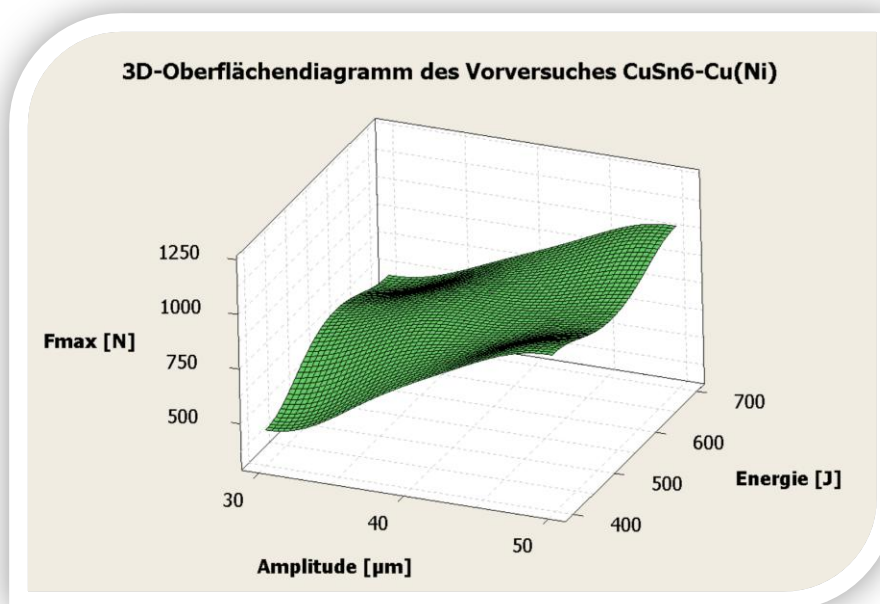


Abbildung 31 : 3D-Oberflächendiagramm für der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für den Screeningversuch

8.2 Hauptversuch

8.2.1 Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen

Im Vorversuch wurde erkannt, dass die Haltezeit keinen wesentlichen Einfluss auf die Zielgröße hat (siehe Pareto – Diagramme des Screeningversuches für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni)-Verbindung, Abbildung 29 und 30). Deswegen wurde die Haltezeit im Hauptversuch auf einen konstanten Wert von 0,2 Sekunden gesetzt.

Eine weitere Erkenntnis des Vorversuches war das die Amplitude hoch signifikant ist und das durch die Steigerung der Amplitude sich die maximale Bruchkraft der Schweißverbindung erhöht. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden für die Versuchsfaktoren folgende Faktorstufen für den Hauptversuch gewählt:

Al-Al Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Amplitude [μm]	50	65
Energie [J]	500	700
Schweißdruck [psi]	20	30

CuSn6-Cu(Ni) Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Amplitude [μm]	50	65
Energie [J]	700	900
Schweißdruck [psi]	20	30

Tabelle 20: Versuchsfaktoren und deren Faktorstufen des Hauptversuches

8.2.2 Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen

Für den Hauptversuch wurden für beide Verbindungen, wie im Screeningversuch, ein fraktioneller faktorieller Versuchsplan mit der Statistiksoftware Minitab anhand der Versuchsfaktoren und der dazugehörigen Faktorstufen (siehe Tabelle 20) erstellt.

Dabei sollte erwähnt werden das dieses Mal die Verschweißung der Zentrumsunkte, aufgrund der Linearität der Zielgröße mit jedem Versuchsfaktor, weggelassen wurde. Um der hohen Streuung aus dem Screeningversuch entgegenzuwirken wurde jede Faktorstufenkombination drei Mal wiederholt. Somit war der Versuchsumfang des Hauptversuches insgesamt 24 Schweißproben (8 Faktorstufenkombinationen Mal 3 Wiederholungen-Replikationen) für jede Fügeverbindung.

8.2.3 Versuchsdurchführung

Die Schweißverbindungen wurden wie im Screeningversuch bei der Firma Branson Amtech an dem 20 kHz Schweißsystem Ultraweld®-L20 hergestellt. Das Schweißen der Proben erfolgte nach der randomisierten Reihenfolge des Hauptversuchsplans siehe Tabelle 21 und 23, der mit der Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) erstellt wurde. Nach dem Zugscherversuch erhielt man für jede Schweißverbindung die maximale Bruchkraft (F_{max}), die dann für weitere Auswertung in die Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) eingegeben wurde.

8.2.4 Auswertung und Ergebnisse

Die Tabelle 21 stellt den randomisierten Hauptversuchsplan für die Aluminium Verbindung und die die Tabelle 23 für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung mit den dazugehörigen maximalen Bruchkräften dar.

Die Werte variieren zwischen 933,8 N (Probe 5/5) und 1075,8N (Probe 5/13) bei der Aluminium Verbindung und zeigen eine Verbesserung der Festigkeit der Schweißverbindung im Verhältnis zu dem Screeningversuch auf (809,1 N und 1057,1 N siehe Tabelle 15 und 22)

Auch bei den Standardabweichungen der der Aluminium Verbindung konnte eine Verbesserung erzielt werden und sie liegen bei der ersten Replikation bei 46,91N ($\leq 4,7\%$ vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 41,89N ($\leq 4,2\%$ vom Mittelwert) und bei dem verschweißen der dritten Replikation bei 24,79N ($\leq 2,5\%$ vom Mittelwert). Die Standardabweichungen konnten für jede Replikation mindestens halbiert werden. Zur Erinnerung betragen sie bei dem Screeningversuch $\leq 9,2\%$ für die erste Replikation, $\leq 11,6\%$ für die zweite Replikation und $\leq 5,4\%$ für das verschweißen der fünf Zentrumsunkte. (siehe Tabelle 15 und 22)

Diese Verringerung der Standardabweichung der maximalen Bruchkraft zeugt von sehr guter Optimierung der Schweißparameter durch die systematischen Überlegungen und die Methodologie der statistischen Versuchsplanung.

Probennr:	Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Amplitude [μm]	Fmax [N]
5/1	700	20	50	1003,4
5/2	700	30	50	962,9
5/3	700	20	50	1000,7
5/4	500	20	50	1053,5
5/5	500	20	65	933,8
5/6	500	30	50	1044,5
5/7	700	20	65	938,7
5/8	500	20	50	1017,1
5/9	700	30	65	960,2
5/10	700	20	50	1007,9
5/11	700	20	65	935,0
5/12	500	30	50	1019,3
5/13	500	20	65	1075,8
5/14	700	30	65	965,1
5/15	700	30	50	1024,1
5/16	500	30	50	990,2
5/17	700	20	65	936,8
5/18	500	20	65	995,3
5/19	700	30	50	998,9
5/20	700	30	65	959,1
5/21	500	30	65	1018,5
5/22	500	30	65	1012,5
5/23	500	30	65	971,6
5/24	500	20	50	1004,3

Tabelle 21: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches Al-Al Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	989,44	46,91	933,8	1053,5
2	1006,20	41,89	935	1075,8
3	983,01	24,79	936,8	1007,9

Tabelle 22: Deskriptive Statistik des Hauptversuches Al-Al Verbindung

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung variieren die Werte der maximalen Bruchkraft zwischen 921,1 N (Probe 6/16) und 1361,2 (Probe 6/22) und zeigen eine erhöhte Verbesserung der Festigkeit der Schweißverbindung im Verhältnis zu dem Screeningversuch auf (337,1 N und 1157,5 N siehe Tabelle 17 und 24)

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung liegen die Standardabweichungen, des Hauptversuches, bei der ersten Replikation bei 109,94N ($\leq 9,8\%$ vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 115,79 N ($\leq 10,4\%$ vom Mittelwert) und bei dem verschweißen der dritten Replikation bei 121,80 N ($\leq 11\%$ vom Mittelwert).

Das stellt eine mehr als dreifache Verbesserung der Standardabweichungen der maximalen Bruchkraft im Verhältniss zu dem des Screeningversuches dar. ($\leq 35,9\%$ erste Replikation, $\leq 39,3\%$ zweite Replikation und $\leq 10,2\%$ bei den verschweißen der fünf Zentrumsunkte)

Probenr:	Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Amplitude [μm]	Fmax [N]
6/1	900	20	50	1017,1
6/2	900	30	50	1077,1
6/3	900	20	50	1023,8
6/4	700	20	50	981,9
6/5	700	20	65	1289,9
6/6	700	30	50	1011,1
6/7	900	20	65	1155,5
6/8	700	20	50	1034,5
6/9	900	30	65	1227,8
6/10	900	20	50	1044,3
6/11	900	20	65	1173,4
6/12	700	30	50	1002,8
6/13	700	20	65	1126,6
6/14	900	30	65	1072,4
6/15	900	30	50	1089,5
6/16	700	30	50	921,1
6/17	900	20	65	1329,8
6/18	700	20	65	1111,4
6/19	900	30	50	1027,7
6/20	900	30	65	1200,5
6/21	700	30	65	1130,0
6/22	700	30	65	1361,2
6/23	700	30	65	1101,2
6/24	700	20	50	1077,9

Tabelle 23: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	1111,3	109,94	981,9	1289,9
2	1110,53	115,79	1002,8	1361,2
3	1106,13	121,80	921,1	1329,8

Tabelle 24: Deskriptive Statistik des Hauptversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Im Hauptversuch wurden die signifikanten Faktoren aus dem Vorversuch bestätigt. Der Signifikanz nach für die:

Al-Al Verbindung: (1.Amplitude; 2.Energie;3.Schweißdruck) und für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung: (1.Amplitude; 2.Schweißdruck; 3.Energie).

8.2.5 Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße

Wie auch bei dem Screeningversuch wurden die 3D Oberflächendiagramme, um den Einfluss der wichtigsten Versuchsfaktoren (Amplitude und Energie) beider Schweißnahtverbindungen auf die Zielgröße näher zu analysieren, erstellt.

Dabei wurde bei der Al-Al Verbindung festgestellt (siehe Abbildung 32), dass eine weitere Erhöhung der Amplitude auf den Wert 65 μ m zur einer Verringerung der erreichbaren Zugscherkräfte führt.

Bei CuSn6-Cu(Ni) war dies nicht der Fall.

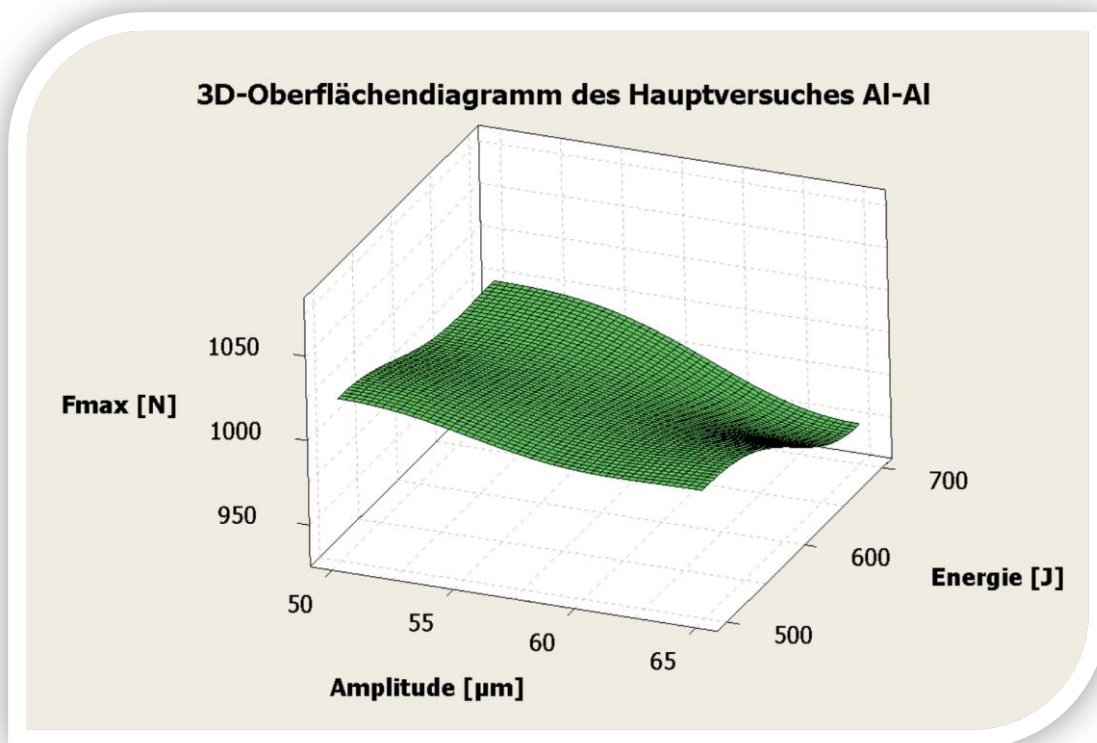


Abbildung 32 : 3D-Oberflächendiagramm der Al-Al Schweißverbindung für den Hauptversuchversuch

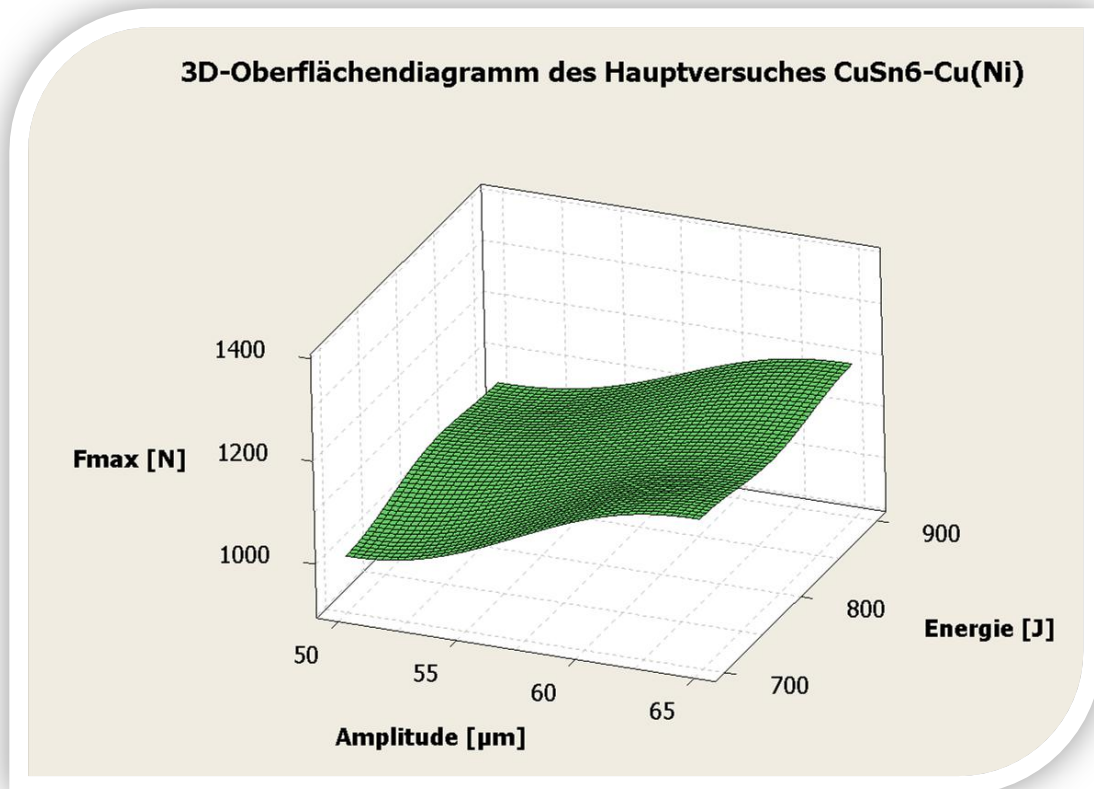


Abbildung 33 : 3D-Oberflächendiagramm der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für den Hauptversuch

Diese Erkenntnis aus den 3D Oberflächendiagramm führte uns zur weiteren Untersuchungen die hier in der Abbildung 34 dargestellt sind.

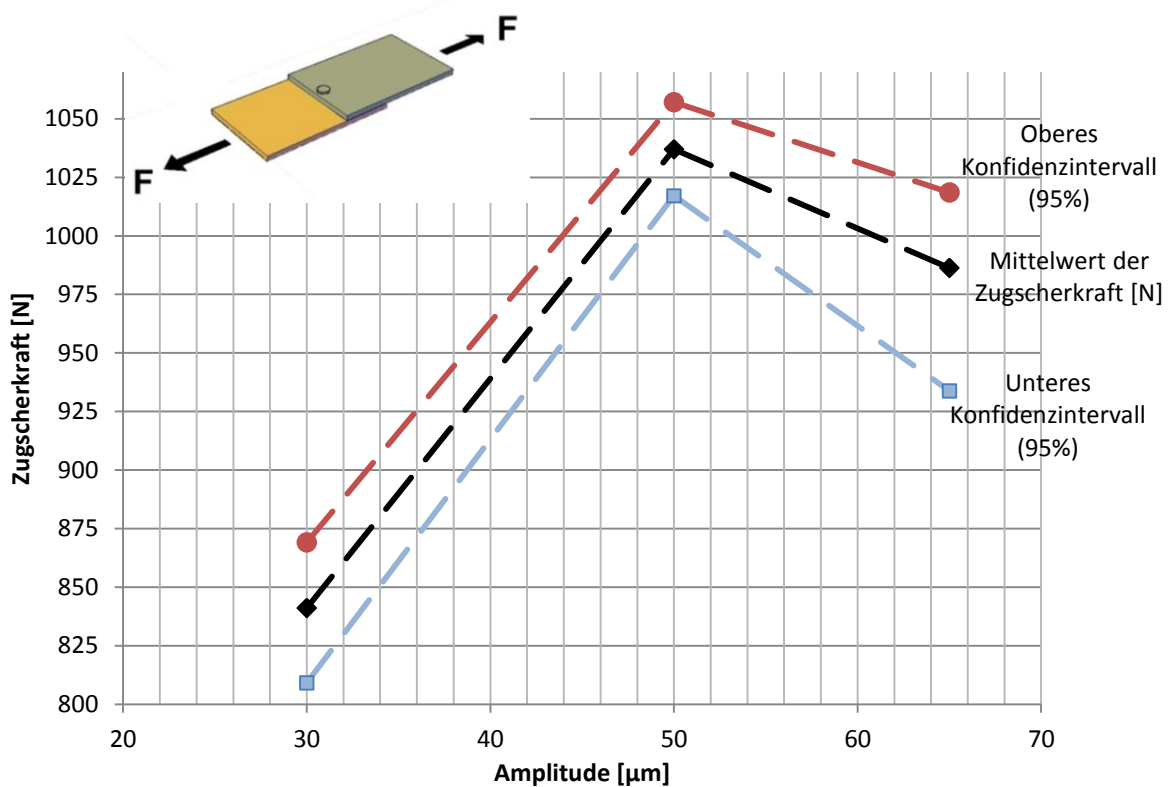


Abbildung 34 : Verlauf der Zugskraft in Abhängigkeit von der Amplitude für Al-Al Verbindung

In der Abbildung 34 ist der Verlauf der Zugscherkraft für die konstanten Werte der Schweißenergie (500J) und Schweißdruck (20 psi) der Al-Al Schweißverbindung dargestellt. Die Amplitude wurde im Bereich von 30- 65µm variiert. Neben den Verlauf der mittleren Zugscherkraft sind auch die 95% Oberen und Unteren Konfidenzintervalle dargestellt.

Das Erreichen einer Mindestamplitude zwischen den Fügeteilen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Schweißung. Mit zunehmender Amplitude steigt die Qualität der Schweißung. Die Überschreitung einer Maximalamplitude (in Abbildung 35 ab 52µm) jedoch bewirkt eine Schwächung der Schweißverbindung der Werkstücke durch eine zu große Wechselbeanspruchung und damit einen Abfall der Festigkeitswerte [7,19].

Ein optimaler Wert der Amplitude für die untersuchte Al-Al Verbindung liegt in dem Bereich von 50µm (Abbildung 34).

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung wurde dieses Verhalten während des Hauptversuches nicht festgestellt (Abbildung 33). Dennoch ist es zu erwarten dass auch die maximale Zugscherkraft der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung nach Überschreiten von 65µm, nach Vorbild der Al-Al Verbindung, in weiterer Folge abfällt.

8.3 Bestätigungsversuch und Schlussfolgerung

Im Screeningversuch wurde festgestellt, dass Erreichen einer hohen Bruchkraft der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung von dem Schweißparameter Amplitude [µm], Energie [J] und Schweißdruck [psi] abhängt.

Im Hauptversuch wurden die Werte dieser Schweißparameter, wobei der nicht signifikante Schweißparameter, die Haltezeit auf einen konstanten Wert von 0,2 Sekunden gesetzt wurde, weiter optimiert.

Damit erhielten wir die höchsten und optimalen Werte mit geringster Standardabweichung der maximalen Bruchkraft der Al-Al Schweißverbindung wenn für die Energie 500 [J], Schweißdruck 20 [psi] und bei der Amplitude 50 [µm] eingestellt werden.

Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Amplitude [µm]
500	20	50

Tabelle 25: Optimale Parametereinstellung der Al-Al Schweißverbindung für das Ultraschallschweißen

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung erhielten wir die höchsten und optimalen Werte mit geringster Standardabweichung der maximalen Bruchkraft wenn die Energie auf 900 [J], der Schweißdruck auf 20 [psi] und die Amplitude auf 65 [µm] eingestellt waren.

Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Amplitude [µm]
900	20	65

Tabelle 26: Optimale Parametereinstellung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für das Ultraschallschweißen

Diese Faktorstufenkombinationen stellen mit der Einstellung des obengenannten, nicht signifikanten Schweißparameters auf den oben definierten Wert die optimale Parametereinstellung zur Erzielung der maximalen Bruchkraft der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung. (Tabelle 25 und 26)

In einem Bestätigungsversuch wurde diese optimale Parameterkombination 15 Mal jeweils für die Al-Al als auch für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung verschweißt.

Die Tabelle 27 stellt den Bestätigungsversuch für die Al-Al Schweißverbindung und die die Tabelle 29 für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung mit den dazu-gehörigen maximalen Bruchkräften dar.

Die Werte der maximalen Bruchkraft variieren zwischen 938,1 N (Probe K2) und 1071,8 N (Probe K13) bei der Al-Al Schweißverbindung und zwischen 1049,2 (Probe K16) und 1422,6 (Probe K17) bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung.

Die Standardabweichung liegt bei der Al-Al Verbindung bei 39,9N ($\leq 3,9\%$ vom Mittelwert) und bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung bei 108,93 ($\leq 8,9\%$ vom Mittelwert).

Die Standardabweichungen bewegen sich in einem sehr guten Wertebereich und diese optimalen Parametereinstellungen können für eine robuste Serienproduktion empfohlen werden.

Probennr:	Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Amplitude [μm]	Fmax [N]
K1	500	20	50	993,1
K2	500	20	50	938,1
K3	500	20	50	966,5
K4	500	20	50	985,4
K5	500	20	50	975,0
K6	500	20	50	966,2
K7	500	20	50	1036,1
K8	500	20	50	1050,3
K9	500	20	50	1013,7
K10	500	20	50	986,8
K11	500	20	50	1045,4
K12	500	20	50	995,3
K13	500	20	50	1071,7
K14	500	20	50	1024,5
K15	500	20	50	1055,8

Tabelle 27: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche)des Bestätigungsversuches Al-Al Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]
1	1006,93	39,90	938,10

Tabelle 28: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches Al-Al Verbindung

Probennr:	Energie [J]	Schweißdruck [psi]	Amplitude [µm]	Fmax [N]
K16	900	20	65	1049,2
K17	900	20	65	1422,6
K18	900	20	65	1139,1
K19	900	20	65	1102,4
K20	900	20	65	1134,7
K21	900	20	65	1339,2
K22	900	20	65	1306,5
K23	900	20	65	1254,5
K24	900	20	65	1259,1
K25	900	20	65	1252
K26	900	20	65	1182,3
K27	900	20	65	1076,3
K28	900	20	65	1355,8
K29	900	20	65	1248,2
K30	900	20	65	1264,9

Tabelle 29: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]
1	1225,79	108,93	1049,20

Tabelle 30: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

9 Ergebnisse der Zugversuche für das Laserschweißen - statistische Versuchsplanung

9.1 Screeningversuch

Wie auch bei der erfolgreichen Optimierungsstrategie für das Ultraschallschweißen wurden auch bei dem Laserschweißen die gleichen Schritte angewendet.

Da auch im Falle des Laserschweißens mit dem Faserlaser sehr wenig über die Problemstellung bekannt war führten wir einen Screeningversuch durch, wobei wir möglichst viele Faktoren in unseren Untersuchungsbereich in Betracht nahmen, um deren Wichtigkeit und Beeinflussungsrichtung der Zielgröße zu bestimmen.

9.1.1 Zielgrößenbestimmung

Die festgelegte Zielgröße, die bei dem statischen Zugscherversuch an geschweißten Proben ermittelt wurde, war wie bei den Ultraschallschweißversuchen, die maximale Bruchkraft F_{\max} [N]

Wie im Kapitel 6.4.1 dargestellt, wurden an den Lasergeschweißten Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Proben drei Schnitte mit der Nasstrennschleifsäge durchgeführt.

Dabei, wurden die mit ZL (Zugprobe links) und ZR (Zugprobe rechts) markierten Proben für die Zugscherversuche und die ML (Metallographieprobe links) und MR (Metallographieprobe rechts) für metallografische Untersuchungen verwendet.

Womit wir für jede Faktorstufeneinstellung zwei Werte (F_{\max} ZL und F_{\max} ZR) der maximalen Bruchkraft erhielten. Der Mittelwert dieser beiden Werte wurde gebildet und für die statistischen Untersuchungen im Minitab 15® verwendet.

9.1.2 Einflussgrößen bestimmen

In einem Brainstorming, an welchem das Expertenteam der Werkstofftechnik (MSF) teilnahm, wurde versucht, jene Größen zu benennen, die Einfluss auf die maximale Bruchkraft F_{\max} [N] einer Schweißverbindung ausüben könnten.

Diese Einflussgrößen werden nach Hauptgruppen (Prozess, Material, Maschine, Mensch/Umfeld) unterteilt und im Ishikawa-Diagramm dargestellt.

Das Ishikawa-Diagramm (auch Ursache-Wirkungs-Diagramm genannt) dient der Zuordnung von Einflüssen (Ursachen) zu einer Wirkung. und stellt sie graphisch dar. (Abbildung 35)

Ursachen-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm)

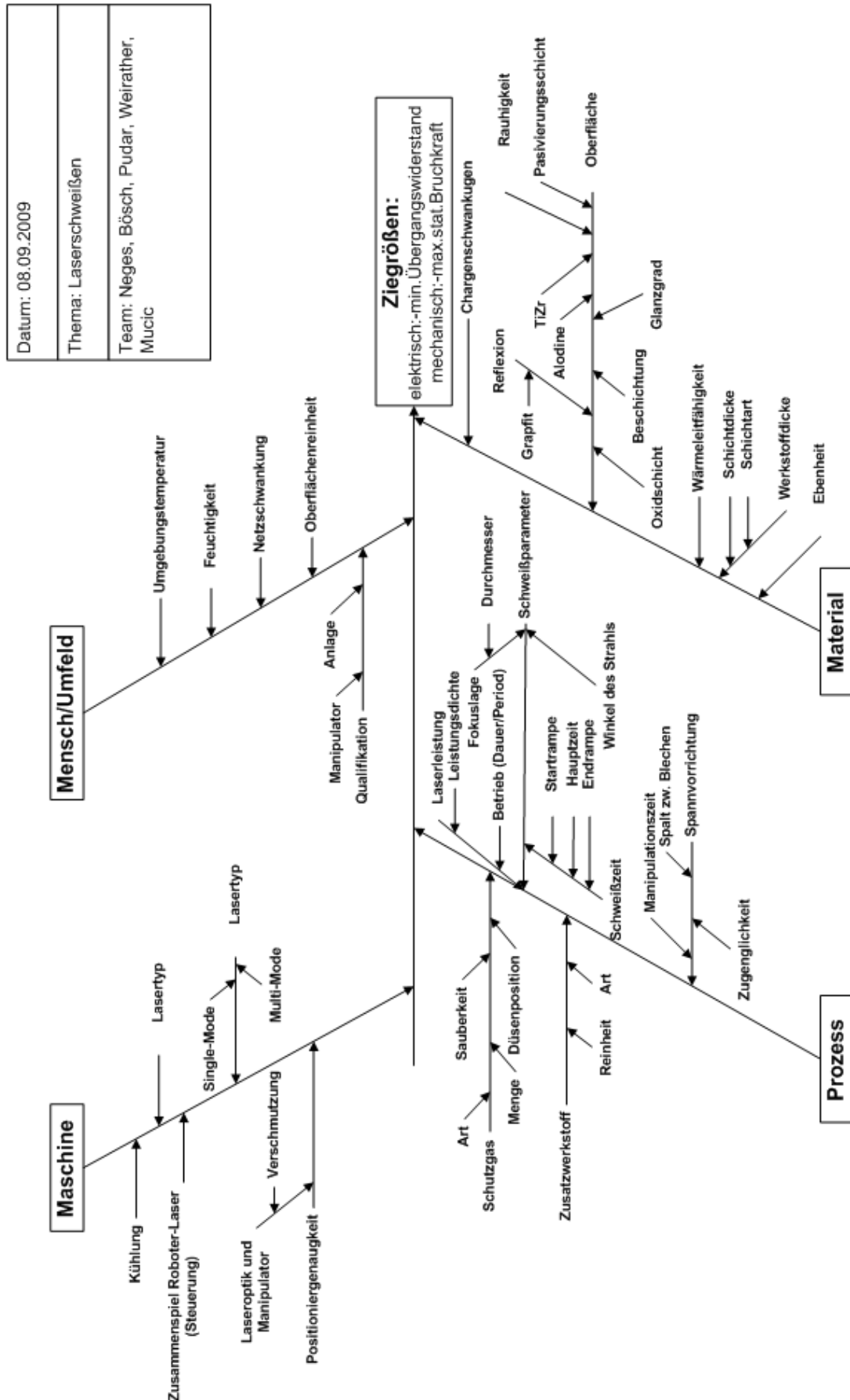


Abbildung 35 : Ishikawa-Diagramm für das Laserschweißen

9.1.3 Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen

Der nächste Schritt bei der statistischen Versuchsplanung beinhaltet die Auswahl der wesentlichen Einflussgrößen, die dann als Versuchsfaktoren festgelegt werden, und für die, Faktorstufen bestimmt werden.

Wie aus dem Ishikawa-Diagramm ersichtlich, wurden viele potentielle Einflussgrößen auf die Zielgröße gefunden. Da ein Ziel dieser Diplomarbeit die systematische Untersuchung des Laserschweißens war, konzentrierten wir uns auf die Hauptgruppe „Prozess“.

Das wichtigste Bewertungskriterium bei der Auswahl der Versuchsfaktoren war der Einfluss auf die Zielgröße- wie groß er von Experten anhand von Vorversuchen eingeschätzt wird.

Damit wurden folgenden vier Einflussgrößen als Versuchsfaktoren für den Screeningversuch festgelegt:

1. **Laserleistung [W]**
2. **Schweißgeschwindigkeit [m/min]**
3. **Fokusbildung [mm]**
4. **Winkel des einfallenden Strahles [°]**

Der Einfluss aller anderen im Ishikawa-Diagramm angeführten Einflussgrößen kann zwar nicht ganz ausgeschlossen werden, wird aber als zu gering erachtet, um weiter betrachtet zu werden.

Für die festgelten Versuchsfaktoren werden nun Faktorstufen (Einstellwerte), auch anhand von Vorversuchen, definiert. Dabei wird zwischen einer niedrigen und hohen Stufe unterschieden. (siehe Tabelle 31)

Al-Al Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Laserleistung [W]	1100	1800
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	4	18
Fokusbildung [mm]	-0,5	0,5
Winkel des einfallenden Strahles [°]	30	60

CuSn6-Cu(Ni) Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Laserleistung [W]	1100	1800
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	3,5	6
Fokusbildung [mm]	-0,5	0,5
Winkel des einfallenden Strahles [°]	30	60

Tabelle 31: Versuchsfaktoren und deren Faktorstufen des Screeningversuches für das Laserschweißen

9.1.4 Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen

Bei dem Screeningversuch geht es vorrangig um die Identifikation der signifikantesten Versuchsfaktoren und um die Erkenntnis in welche Richtung die Versuchsfaktoren die Zielgröße beeinflussen. Um diese Erkenntnisse zu gewinnen werden für die Screeningversuche fraktionelle faktorielle Versuchspläne verwendet.

In unseren Fall wurde für den Screeningversuch Anstelle eines 2^4 vollfaktoriellen ein 2^{4-1} fraktioneller faktorieller Versuchsplan verwendet. Da bei den Screeningversuchen meistens zwei Replikationen der jeweiligen Faktorstufenkombination durchgeführt werden, wird schnell klar das durch die Auswahl des 2^{4-1} fraktionellen faktoriellen Versuchsplans der Versuchsumfang um 50% reduziert werden konnte.(16 anstatt von 32 Versuchen).

Damit belief sich der Versuchsumfang des Screeningversuchsplanes auf insgesamt 16 Proben jeweils für die Al-Al als auch für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.

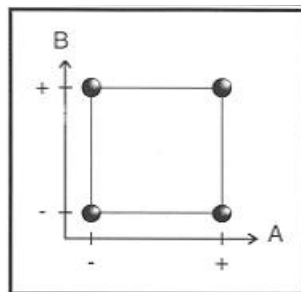


Abbildung 36 : Grafische Darstellung des Screeningversuchsplanes

In der Abbildung 36 sind die Faktorstufenkombinationen unseres Versuchsplanes grafisch dargestellt: Sie bilden die Eckpunkte eines Würfels für den fraktioneller faktorieller Versuchsplan. A und B stellen die Versuchsfaktoren (die Laserleistung und die Schweißgeschwindigkeit) und das + und - die hohe und tiefe Faktorstufe des Versuchsfaktors dar.

9.1.5 Versuchsdurchführung

Die Schweißverbindungen wurden bei der Firma IPG GmbH an dem YLR 5000 (Ytterbium Faser Laser) hergestellt (siehe Abbildung 17 und Tabelle 11).

Das Schweißen der Proben erfolgte nach der randomisierten Reihenfolge des Screeningversuchsplans siehe Tabelle 32 und 34, der mit der Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) erstellt wurde.

Nach dem Zugscherversuch erhielt man für jede Faktorstufenkombination zwei Werte der maximale Bruchkraft (F_{\max} ZL und F_{\max} ZR) für die zwei Zugscherproben. Anhand von diesen Werten wurde der Mittelwert gebildet der dann für weitere Auswertung in die Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) eingegeben wurde.

9.1.6 Auswertung und Ergebnisse

Die Tabelle 32 stellt den randomisierten Screeningversuchsplan für die Al-Al Schweißverbindung und die die Tabelle 34 für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung mit den dazugehörigen Mittelwerten der maximalen Bruchkräfte dar. Die Werte variieren zwischen 44 N (Probe 1/2) und 355,15 N (Probe 1/14) bei der Al-Al Verbindung und zwischen 45,35 N (Probe 3/2) und 682,55 (Probe 3/16) bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.

Bei der Al-Al Schweißverbindung liegen die Standardabweichungen bei der ersten Replikation bei 109,27 N ($\leq 53,3$ % vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 114,02 N ($\leq 51,7\%$ vom Mittelwert). (Tabelle 33)

Probenr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschw. [m/min]	Focuslage [mm]	Winkel [°]	Fmax [N]
1/1	1800	4	-0,5	60	272,85
1/2	1100	18	0,5	30	44,00
1/3	1100	4	0,5	60	297,15
1/4	1100	4	-0,5	30	265,40
1/5	1800	4	-0,5	60	284,55
1/6	1800	4	0,5	30	99,85
1/7	1800	4	0,5	30	111,55
1/8	1800	18	-0,5	30	243,15
1/9	1100	18	0,5	30	74,60
1/10	1800	18	0,5	60	327,55
1/11	1100	18	-0,5	60	89,30
1/12	1100	18	-0,5	60	73,10
1/13	1100	4	0,5	60	282,60
1/14	1800	18	0,5	60	355,15
1/15	1800	18	-0,5	30	281,85
1/16	1100	4	-0,5	30	299,70

Tabelle 32: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Screeningversuches Al-Al Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	204,91	109,27	44,00	327,55
2	220,39	114,02	73,10	355,15

Tabelle 33: Deskriptive Statistik des Screeningversuches Al-Al Verbindung

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung liegen die Standardabweichungen bei der ersten Replikation bei 207,39 N ($\leq 41,3\%$ vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 200,53 N ($\leq 40,2\%$ vom Mittelwert). (Tabelle 35)

Diese Werte lassen sofort erkennen dass im Hauptversuch das Parameterfenster (die hohe und tiefe Faktorstufe) „enger“ gewählt werden müssen um die Streuung zu minimieren.

Probennr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschw. [m/min]	Focuslage [mm]	Winkel [°]	Fmax [N]
3/1	1800	3,5	-0,5	60	364,20
3/2	1100	6,0	0,5	30	45,35
3/3	1100	3,5	0,5	60	553,85
3/4	1100	3,5	-0,5	30	678,65
3/5	1800	3,5	-0,5	60	408,30
3/6	1800	3,5	0,5	30	598,90
3/7	1800	3,5	0,5	30	610,35
3/8	1800	6,0	-0,5	30	598,95
3/9	1100	6,0	0,5	30	53,25
3/10	1800	6,0	0,5	60	532,60
3/11	1100	6,0	-0,5	60	643,25
3/12	1100	6,0	-0,5	60	579,75
3/13	1100	3,5	0,5	60	578,45
3/14	1800	6,0	0,5	60	458,75
3/15	1800	6,0	-0,5	30	617,40
3/16	1100	3,5	-0,5	30	682,55

Tabelle 34: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	501,97	207,39	45,35	678,65
2	498,60	200,53	53,25	682,55

Tabelle 35: Deskriptive Statistik des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

9.1.7 Signifikante Versuchsfaktoren

Anhand von statistischen Tests (Hypothesentest, F-Test; t-Test) wird die Aussage getroffen, ob sich eine Veränderung der Versuchsfaktoren entscheidend auf die Zielgrößen auswirkt. Die oben genannten statistischen Tests werden von der Statistiksoftware Minitab 15® durchgeführt und liefern uns folgende im Pareto-Diagramm grafisch dargestellten Ergebnisse (Abbildung 37 und 38):

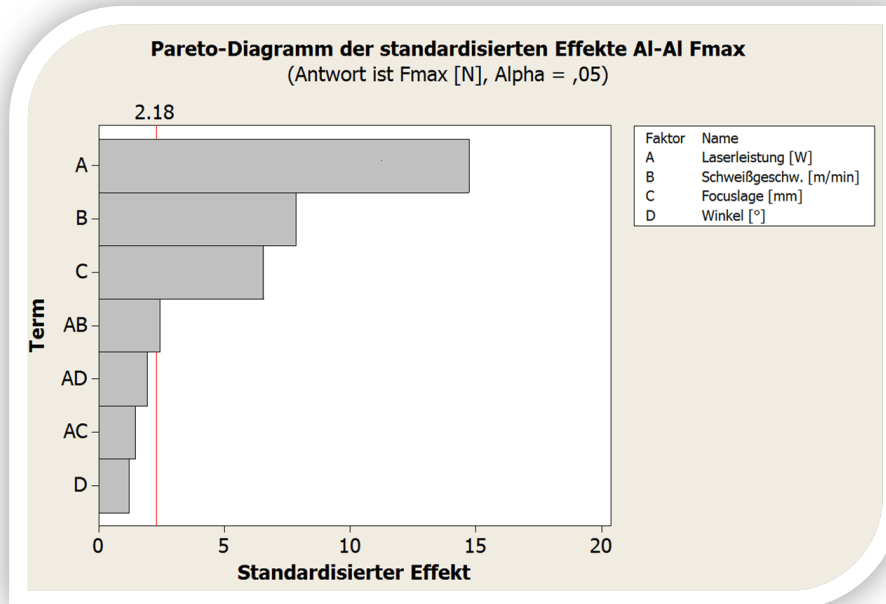


Abbildung 37 : Pareto-Diagramm-Laserschweißen Al-Al Schweißverbindung

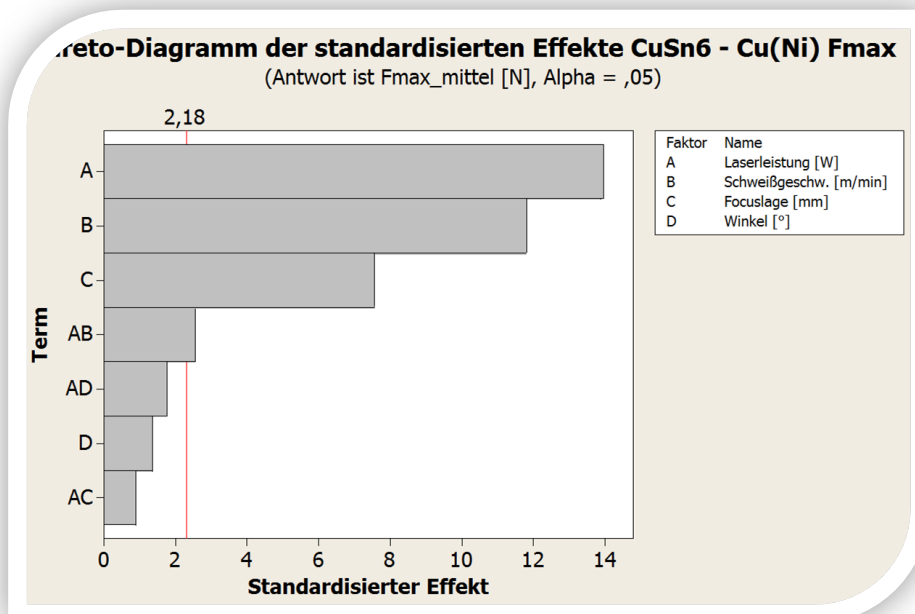


Abbildung 38 : Pareto-Diagramm-Laserschweißen CuSn6-Cu(Ni)Schweißverbindung

Im Pareto-Diagramm werden die absoluten Werte der Effekte aller untersuchten Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen (Vermengungen) als Balken gegeneinander aufgetragen.

Wenn zwei oder mehr Effekte miteinander vermischt sind (z.B. AB, AD, AC), dann bedeutet das, dass bei der Auswertung die Summe der Effekte bestimmt werden kann und nicht der Einzeleffekt der jeweiligen Faktoren.

Die senkrechte Linie an der Stelle 2,18 kennzeichnet das theoretische Quantil der t-Verteilung, d.h. alle Einflussgrößen deren Werte im darüber liegenden Bereich dieser senkrechten Referenzlinie liegen, haben einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße

Der Signifikanz nach geordnet, sind in der Tabelle 36 die Schweißparameter für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißnahtverbindung dargestellt.

Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Verbindung
Laserleistung [W]
Schweißgeschwindigkeit [m/min]
Fokusslage [mm]

Tabelle 36: Signifikante Schweißparameter für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

9.1.8 Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße

Um die beiden wichtigsten Versuchsfaktoren (Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit) beider Schweißnahtverbindungen und ihren Einfluss auf die Zielgröße näher zu analysieren wurden Konturdiagramme (Abbildung 39 und 40) erstellt.

Die folgenden Konturdiagramme zeigen die Zugscherkraftverteilung in Abhängigkeit von der Laserleistung, aufgetragen auf y-Achse und der Schweißgeschwindigkeit, aufgetragen auf der X-Achse. Die Fokusslage, der dritt Wichtigste Versuchsfaktor, ist dabei auf den konstanten Wert von $-0,5$ mm gesetzt worden.

Für beide Fügepaarungen (Al-Al und CuSn6-Cu(Ni)) wird deutlich, dass die höchsten Zugscherkräfte jeweils bei geringen Schweißgeschwindigkeiten und geringen Laserleistungen bzw. bei hohen Schweißgeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen erreicht werden.

Deutlich wird auch, dass bei geringen Schweißgeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen bzw. hohen Schweißgeschwindigkeiten und geringen Laserleistungen geringe Zugscherkräfte erreicht werden.

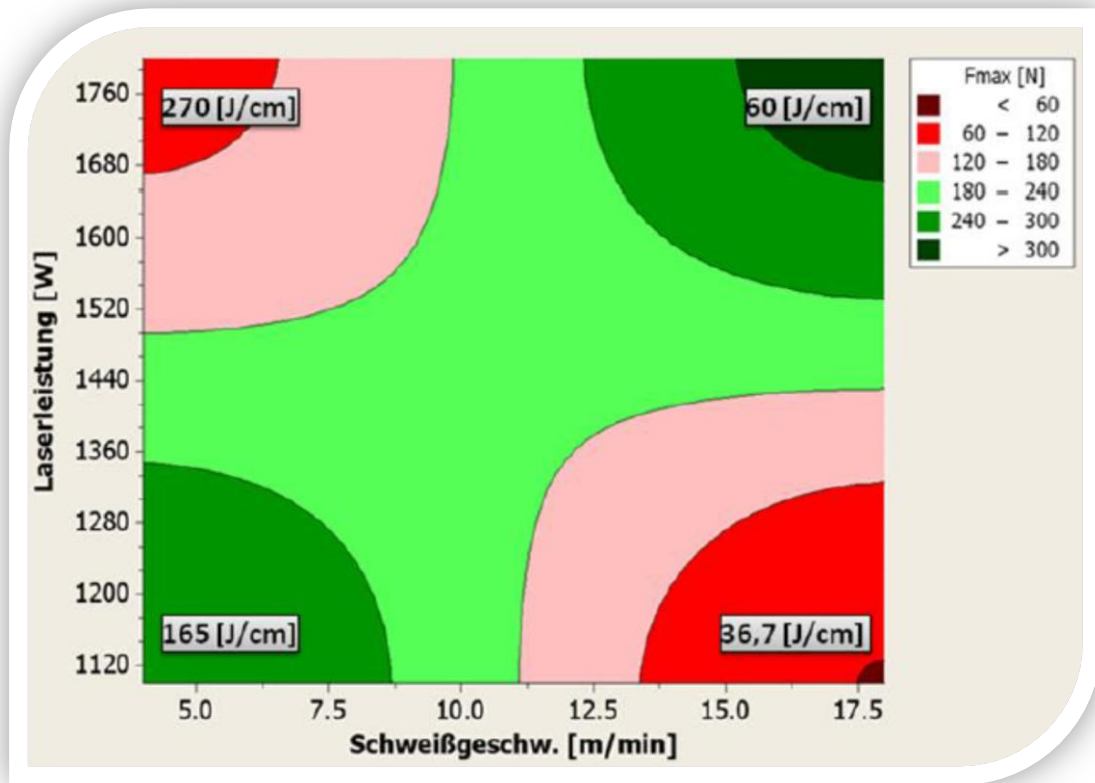


Abbildung 39 : Konturdiagramm des Screeningversuches für die Al-Al Schweißverbindung

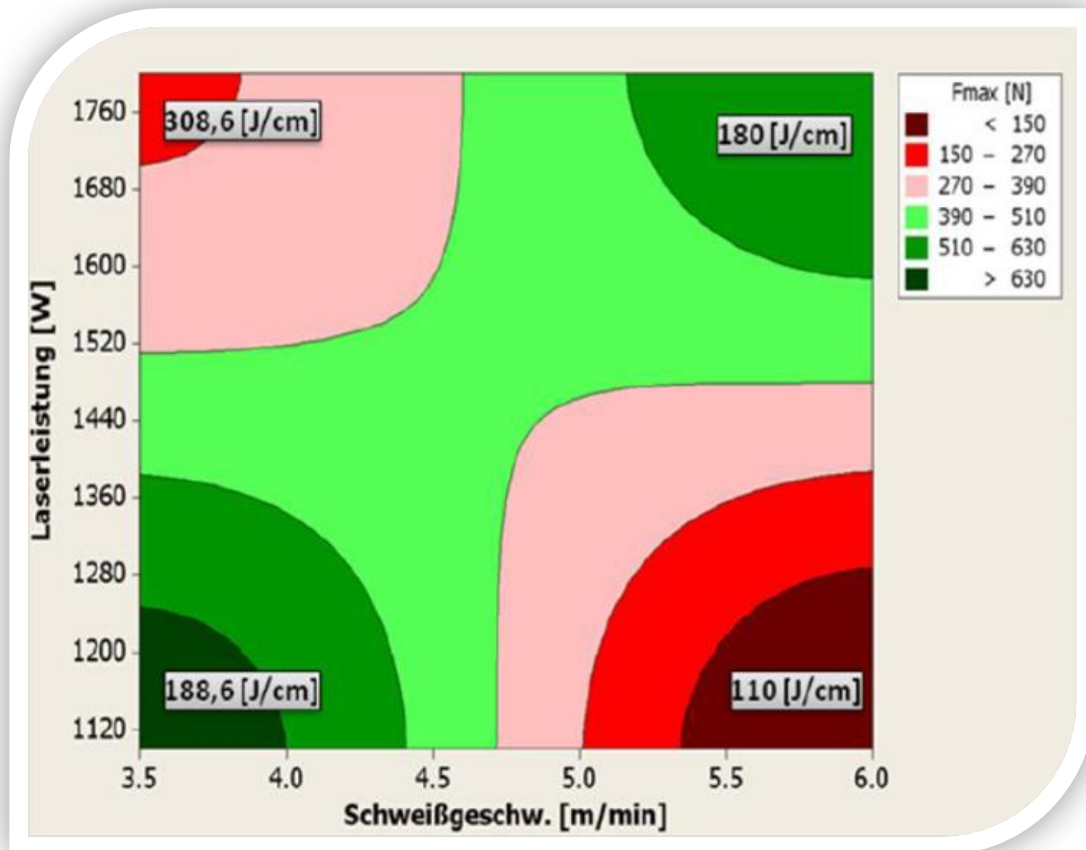


Abbildung 40 : Konturdiagramm des Screeningversuches für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

Ein möglicher Grund für ein solches Verhalten liegt in der zugeführten Streckenenergie E_s [J/cm] bzw. der sich dadurch ergebenden aufgeschmolzenen Nahtquerschnittsfläche A_s [mm²].

Die absolut zugeführte Energie (Streckenenergie) ist definiert als der Quotient aus Laserleistung P_L und Schweißgeschwindigkeit v_s [12,20].

$$E_s = \frac{P_L}{v_s} \text{ [J/cm]}$$

Die Nahtquerschnittsfläche wurde an den metallographischen Schliffen mit dem Flächenanalysetool AxioVision® bestimmt (siehe Abbildung 41).

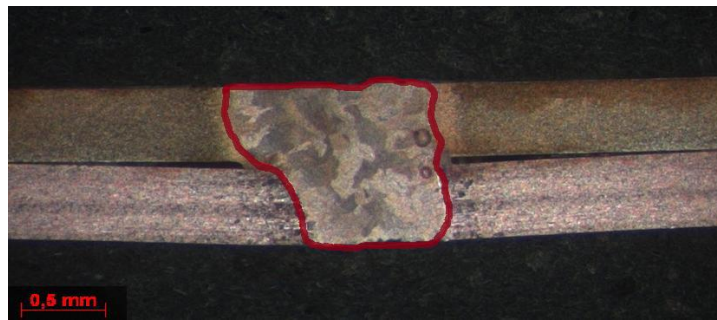


Abbildung 41 : Bestimmung der Nahtquerschnittsfläche mittels AxioVision®

Aus der Literatur [26-32] ist bekannt, dass die Nahtbreite und Schweißtiefe bzw. die Nahtquerschnittsfläche mit der zugeführten Streckenenergie steigen. Die Abbildung 42 verdeutlicht die angeführten Zusammenhänge und stellt die Beziehungen zwischen der Streckenenergie, Nahtquerschnittsfläche und der Zugscherkraft, für die Al-Al Verbindung während des Screeningversuches, bei einer konstanten Fokusslage von -0,5 mm, dar.

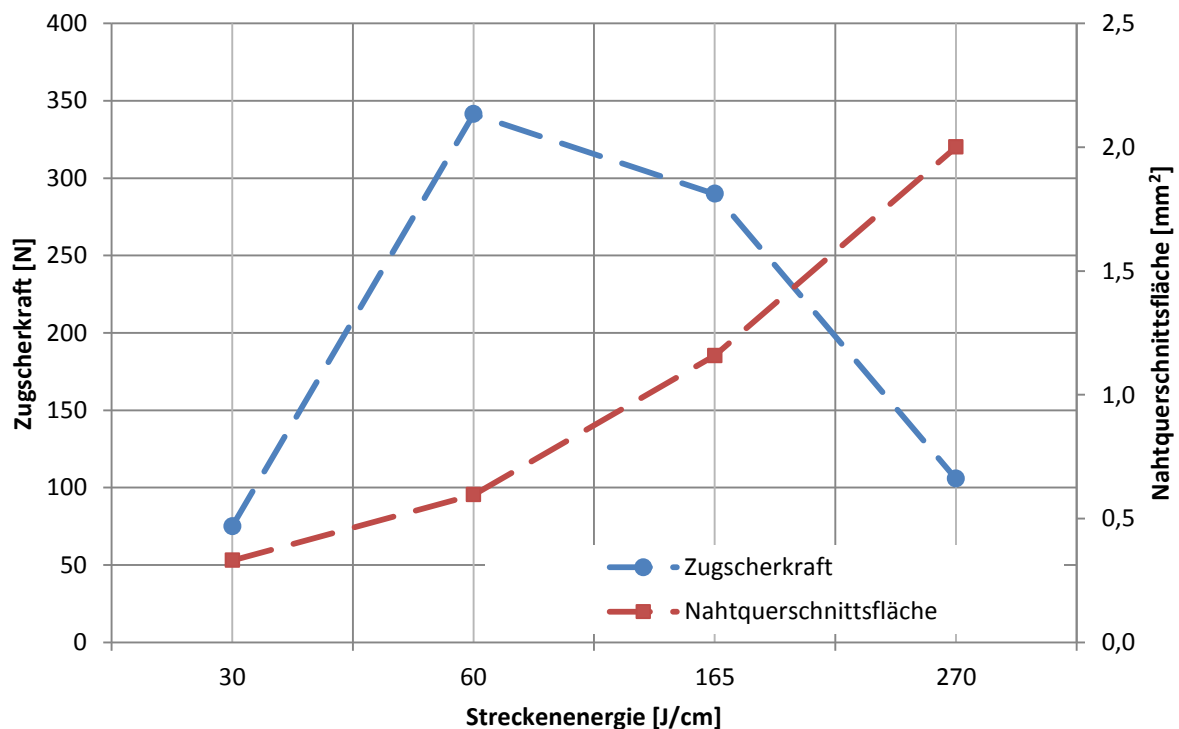


Abbildung 42 : Abhängigkeit der Zugscherkraft von der Streckenenergie und der Nahtquerschnittsfläche

Aus der Abbildung.42 ist ersichtlich, dass bei niedriger Streckenenergie, die aufgeschmolzene Nahtquerschnittsfläche den kleinsten Wert hat und auch geringste Zugscherkräfte erreicht werden. Der Grund dafür liegt darin, dass es durch die geringe Energieeinbringung zu geringen Schweißtiefen zwischen den beiden Fügepartnern kommt, die in weitere Folge sehr geringen Belastungen standhalten können.

Durch die Erhöhung der Streckenenergie, erhöht sich die Nahtquerschnittsfläche und die Schweißtiefe umfasst jetzt beide Fügepartner. Das führt zur Verbesserung der Schweißnahtfestigkeit die nun die höchsten Werte hat.

Bei einer weiteren Steigerung der Streckenenergie verschlechtert sich die Güte der Schweißverbindungen und die Zugscherkraft fällt ab.

Durch den hohen Energieeintrag wird eine größere Nahtquerschnittsfläche aufgeschmolzen und es kommt zur Porenbildung in den Schweißnähten, die die Ursache für den signifikanten Abfall der Zugscherkraft darstellen.

9.2 Hauptversuch

9.2.1 Versuchsfaktorenfestlegung und Bestimmung der Faktorstufen

Im Vorversuch wurde erkannt, dass der Winkel des einfallenden Laserstrahles zur Bauteiloberfläche sich nicht signifikant auf die Zugscherkraft auswirkt (siehe Pareto – Diagramme des Screeningversuches für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni)-Verbindung, Abbildung 37 und 38) und er wurde somit im Rahmen des Hauptversuches auf einen konstanten Wert von 45° gesetzt.

Eine weitere Erkenntnis des Screeningversuches war es, dass bei mittleren Streckenenergien sehr hohe Zugscherkräfte erreicht werden und auch der relativ hohen Standardabweichung der maximalen Zugscherkraft beider Schweißnahtverbindungen entgegenzuwirken wurde folgender Parameterbereich für weitere Untersuchungen ausgewählt:

Al-Al Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Laserleistung [W]	864	1536
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	2,48	7,52
Fokusslage [mm]	-1	1

CuSn6-Cu(Ni) Verbindung:

Versuchsfaktor	Untere Faktorstufe	Obere Faktorstufe
Laserleistung [W]	864	1536
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,99	4,51
Fokusslage [mm]	-1	1

Tabelle 37: Versuchsfaktoren für das Laserschweißen und deren Faktorstufen des Hauptversuches

9.2.2 Versuchsplan auswählen / Geeigneten Versuchsplan aufstellen

Im Screeningversuch wurde ein lineares Verhalten jedes Versuchsfaktors auf die Zielgröße vorausgesetzt. Um diese Annahme zu überprüfen und auch der hohen Standardabweichung bei den maximalen Zugscherkräften entgegenzuwirken wurde für den Hauptversuch ein Central-Composite-Design (CCD) Versuchsplan angewendet.

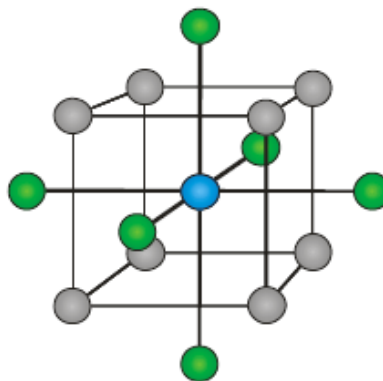


Abbildung 43 : Graphische Darstellung des Parameteruntersuchungsbereiches mit dem CCD Versuchsplan für drei Faktoren

In der Abbildung 43 ist ein dreidimensionaler zentral zusammengesetzter Versuchsplan (engl. Central-Composite-Design) dargestellt. Wie der Name des CCD Versuchsplanes verrät ist dieser Versuchsplan aus drei „Bauteilen“ zusammengesetzt.

Die acht grauen Punkte bilden dabei Faktorstufeneinstellungen des fraktionellen faktoriellen Versuchsplanes und aufgrund der durch sie gebildeten geometrischen Form werden sie auch Würfelpunkte genannt. Die sechs grünen Punkte sind die Faktorstufeneinstellungen die als Sternpunkte bezeichnet werden. Die Faktorstufeneinstellung im Zentrum (blauer Punkt) stellt den Mittelwert der jeweiligen Parameterstufen der Würfeckpunkte dar und ist als Zentrumspunkt bekannt.

Die Tabelle 37 stellt den CCD Versuchsplan für den Hauptversuch der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung und der graphischen Erläuterung der Faktorstufeneinstellungen für die Laserleistung dar.

Laserleistung [W]	Schweißgeschw. [m/min]	Focuslage [mm]	Graphische Erläuterung für den Versuchsfaktor Laserleistung
1000	3,5	-0,6	
1000	3,5	0,6	
1000	6,5	-0,6	
1000	6,5	0,6	
1400	3,5	-0,6	
1400	3,5	0,6	
1400	6,5	-0,6	
1400	6,5	0,6	
864	5	0	
1536	5	0	
1200	2,48	0	
1200	7,52	0	
1200	5	-1	
1200	5	1	
1200	5	0	

Tabelle 38: Grafische darstellung des Hauptversuchsplanes für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

Für die Durchführung des Hauptversuches wurden 2 Replikationen bei dem verschweißen der Würfelpunkte und Sternpunkte gewählt und der Zentrumspunkt wurde 12 verschweißt. Damit belief sich der Versuchsumfang des Hauptversuches auf 40 Proben für die A-Al- und 40 Proben für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung.

Wie beim Screeningversuch wurden auch bei dem Hauptversuch die Schweißverbindungen bei der Firma IPG GmbH an dem YLR 5000 (Ytterbium Faser Laser), nach der randomisierten Reihenfolge des Hauptversuchsplans, hergestellt.

9.2.3 Auswertung und Ergebnisse

Nach dem Zugscherversuch erhielt man für jede Faktorstufenkombination zwei Werte der maximale Bruchkraft (F_{\max} ZL und F_{\max} ZR) für die zwei Zugscherproben. Anhand von diesen Werten wurde der Mittelwert gebildet der dann für weitere Auswertung in die Statistiksoftware Minitab 15® (Deutsch) eingegeben wurde.

Die Tabelle 39 stellt den randomisierten Screeningversuchsplan für die Al-Al Schweißverbindung und die Tabelle 41 für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung mit den dazugehörigen mittleren maximalen Bruchkräften dar. Die Werte variieren zwischen 154,1 N (Probe 5/36) und 343,15N (Probe 5/38) bei der Al-Al Verbindung und zwischen 538,7 N (Probe 6/7) und 685,9 (Probe 6/36) bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung. Sie zeigen eine Verbesserung der Festigkeit der Schweißverbindung im Verhältnis zu dem Screeningversuch auf. siehe Tabelle (33,35 und 40,42)

Bei der Al-Al Verbindung liegen die Standardabweichungen bei der ersten Replikation der Würfeckpunkte bei 36,78 N ($\leq 16,3$ % vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 42,99 N ($\leq 19,1\%$ vom Mittelwert). Die erste Replikation der Sternpunkte hat eine Standardabweichung von 43,27 N ($\leq 16,5$ % vom Mittelwert) und die zweite Replikation weist eine Standardabweichung von 47,44 N ($\leq 18,4$ % vom Mittelwert) auf. Bei dem verschweißen der zwölf Zentrumspunktparameterereinstellungen liegt die Standardabweichung bei 37,70 N ($\leq 15,8$ % vom Mittelwert). (siehe Tabelle 40)

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung liegen die Standardabweichungen bei der ersten Replikation der Würfeckpunkte bei 36,04 N ($\leq 5,91\%$ vom Mittelwert), bei der zweiten Replikation bei 40,63 N ($\leq 6,52\%$ vom Mittelwert). Die erste Replikation der Sternpunkte hat eine Standardabweichung von 38,05 N ($\leq 6,17$ % vom Mittelwert) und die zweite Replikation weist eine Standardabweichung von 29,16 N ($\leq 4,67\%$ vom Mittelwert) auf. Bei dem verschweißen der zwölf Zentrumspunktparameterereinstellungen liegt die Standardabweichung bei 16,41 N ($\leq 2,74$ % vom Mittelwert). (siehe Tabelle 42)

Auch bei den Standardabweichungen der der Al-Al Verbindung und CuSn6-Cu(Ni) Verbindung konnte eine Verbesserung erzielt werden (siehe Tabelle (33,35 und 40,42). Die Standardabweichungen konnten für jede Replikation mindestens halbiert werden

Diese Verringerung der Standardabweichung der maximalen Bruchkraft zeugt von sehr guter Optimierung der Schweißparameter durch die systematischen Überlegungen und die Methodologie der statistischen Versuchsplanung.

Probenr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschw. [m/min]	Focuslage [mm]	Fmax [N]
5/1	1536	5,00	0	271,65
5/2	1000	3,50	0,6	218,55
5/3	1000	3,50	-0,6	291,85
5/4	1200	5,00	1,0	228,7
5/5	1400	6,50	0,6	263,5
5/6	1000	3,50	0,6	254,9
5/7	1400	3,50	-0,6	190,65
5/8	1400	6,50	0,6	255,4
5/9	1200	2,48	0	224,7
5/10	1200	5,00	0	222,05
5/11	1400	3,50	-0,6	205,25
5/12	1400	6,50	-0,6	227,1
5/13	1200	5,00	0	237,25
5/14	1000	6,50	-0,6	225,2
5/15	1200	7,52	0	302,8
5/16	1200	5,00	1,0	219,4
5/17	1200	2,48	0	225,45
5/18	1200	5,00	-1,0	323,4
5/19	1200	5,00	0	249,1
5/20	1200	5,00	0	218,75
5/21	1000	6,50	0,6	188,7
5/22	1200	5,00	0	295
5/23	1536	5,00	0	271
5/24	864	5,00	0	225,45
5/25	1200	5,00	0	245,85
5/26	1400	3,50	0,6	193,8
5/27	1200	5,00	0	228
5/28	864	5,00	0	222,6
5/29	1200	5,00	0	194,6
5/30	1400	3,50	0,6	179,55
5/31	1000	6,50	-0,6	226,5
5/32	1200	7,52	0	263,75
5/33	1200	5,00	0	158,25
5/34	1200	5,00	0	250,9
5/35	1400	6,50	-0,6	282,8
5/36	1000	6,50	0,6	154,1
5/37	1200	5,00	0	285,85
5/38	1200	5,00	-1,0	343,15
5/39	1000	3,50	-0,6	242,15
5/40	1200	5,00	0	265,8

Tabelle 39: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches der Al-Al Verbindung

Punkt	Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
Würfeleckpunkt	1	224,92	36,78	188,7	291,85
	2	225,08	42,99	154,1	282,8
Sternpunkt	1	262,78	43,27	224,7	323,4
	2	257,56	47,44	219,4	343,15
Zentrumspunkt	12	237,62	37,70	158,25	285,85

Tabelle 40: Deskriptive Statistik des Hauptversuches der AI-AI Verbindung

Probenr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschw. [m/min]	Focuslage [mm]	Fmax [N]
6/1	1536	3,25	0	559,1
6/2	1000	2,50	0,6	627,8
6/3	1000	2,50	-0,6	608,8
6/4	1200	3,25	1,0	662,95
6/5	1400	4,00	0,6	590,2
6/6	1000	2,50	0,6	595
6/7	1400	2,50	-0,6	538,7
6/8	1400	4,00	0,6	650,35
6/9	1200	1,99	0	621,5
6/10	1200	3,25	0	613,6
6/11	1400	2,50	-0,6	598,3
6/12	1400	4,00	-0,6	597,1
6/13	1200	3,25	0	582,2
6/14	1000	4,00	-0,6	647,85
6/15	1200	4,51	0	599,45
6/16	1200	3,25	1,0	645,15
6/17	1200	1,99	0	613,2
6/18	1200	3,25	-1,0	604,55
6/19	1200	3,25	0	587,55
6/20	1200	3,25	0	593,55
6/21	1000	4,00	0,6	651,1
6/22	1200	3,25	0	632,1
6/23	1536	3,25	0	579,75
6/24	864	3,25	0	652,95
6/25	1200	3,25	0	596,05
6/26	1400	2,50	0,6	613,55
6/27	1200	3,25	0	585,15
6/28	864	3,25	0	664,45
6/29	1200	3,25	0	606,65
6/30	1400	2,50	0,6	598,8
6/31	1000	4,00	-0,6	663,5
6/32	1200	4,51	0	628,05
6/33	1200	3,25	0	573,35
6/34	1200	3,25	0	589,65
6/35	1400	4,00	-0,6	566,25
6/36	1000	4,00	0,6	685,9
6/37	1200	3,25	0	599,15
6/38	1200	3,25	-1,0	615,2
6/39	1000	2,50	-0,6	626,05
6/40	1200	3,25	0	613,95

Tabelle 41: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Punkt	Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
Würfeleckpunkt	1	609,39	36,04	538,7	651,1
	2	623,02	40,63	566,25	685,9
Sternpunkt	1	616,75	38,05	599,45	652,95
	2	624,30	29,16	579,75	664,45
Zentrumspunkt	12	597,75	16,41	573,35	632,1

Tabelle 42: Deskriptive Statistik des Hauptversuches der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Im Hauptversuch wurden die signifikanten Faktoren aus dem Vorversuch bestätigt. Der Signifikanz nach für die: Al-Al Verbindung und CuSn6-Cu(Ni) Verbindung: (1. Laserleistung [W], 2.Schweißgeschwindigkeit [m/min] und 3.Fokusslage [mm]).

9.2.4 Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Zielgröße

Wie auch bei dem Screeningversuch wurden für den Hauptversuch für die beiden wichtigsten Versuchsfaktoren (Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit) beider Schweißnahtverbindungen Konturdiagramme (Abbildung 44 und 45) erstellt.

Die folgenden Konturdiagramme zeigen die Zugscherkraftverteilung in Abhängigkeit von der Laserleistung, aufgetragen auf y-Achse und der Schweißgeschwindigkeit, aufgetragen auf der X-Achse. Die Fokusslage, der dritt Wichtigste Versuchsfaktor, wurde auch bei diesen Konturdiagrammen auf einen konstanten Wert von – 0,5 mm gesetzt.

Für die Al-Al Schweißverbindung wird deutlich dass die höchsten Zugscherkräfte jeweils bei geringen Schweißgeschwindigkeiten und geringen Laserleistungen bzw. bei hohen Schweißgeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen erreicht werden. Deutlich wird auch, dass bei geringen Schweißgeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen bzw. hohen Schweißgeschwindigkeiten und geringen Laserleistungen geringe Zugscherkräfte erreicht werden.

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung sieht man dass die höchsten Zugscherkräfte bei einer geringen Schweißgeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen erreicht werden. In diesem Konturdiagramm (Abbildung 46) sieht man ein anderes Bild als bei dem Screeningversuch. Der Grund dafür liegt darin dass durch die Optimierung im Hauptversuch ein so guter Parameterbereich gewählt wurde und wir uns im Konturdiagramm zwischen (600 N und 675N) für die „schlechteste“ und für die beste Probe bewegen. Das Ergebnis dieser Erfolgreichen Optimierungsstrategie kann man sich noch einmal vor Augen führen: Im Screeningversuch betrug die Standardabweichung der CuSn6-Cu(Ni) geschweißten Proben noch um die 40% vom Mittelwert wobei sie im Hauptversuch nur noch 5% vom Mittelwert beträgt.

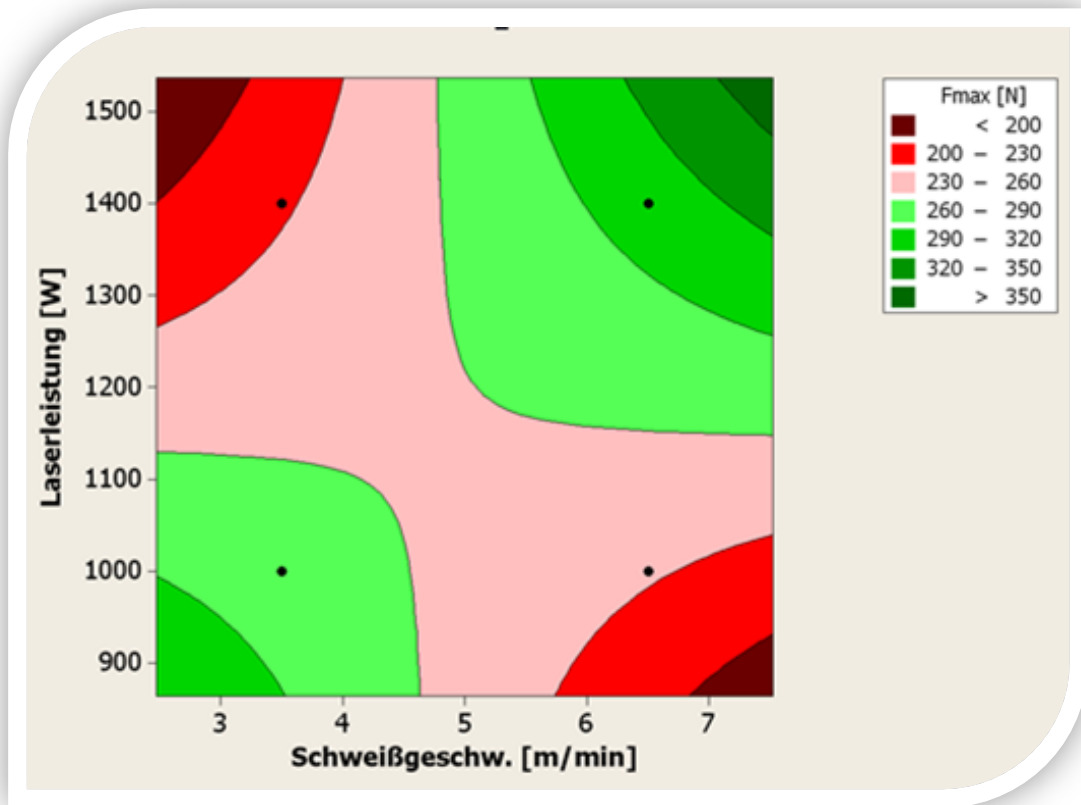


Abbildung 44 : Konturdiagramm des Hauptversuches für die Al-Al Schweißverbindung

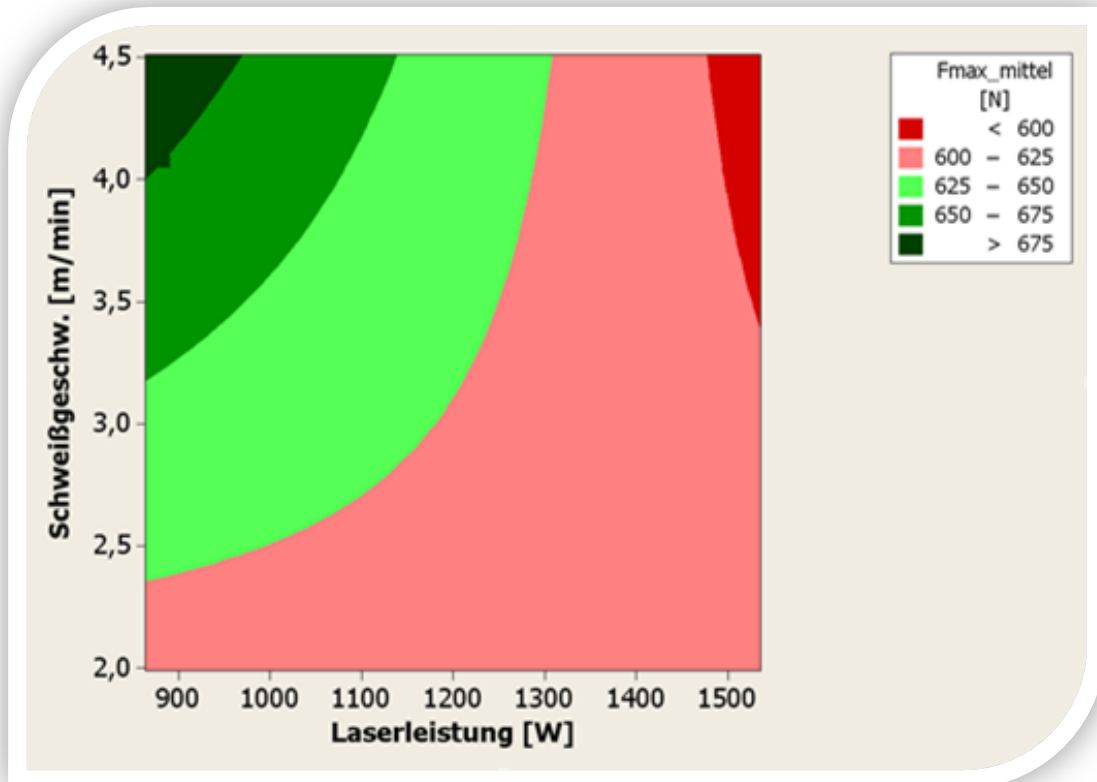


Abbildung 45 : Konturdiagramm des Hauptversuches für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

9.3 Bestätigungsversuch und Schlussfolgerung

Im Screeningversuch wurde festgestellt, dass Erreichen einer hohen Bruchkraft der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung von dem Schweißparameter Laserleistung [W], Schweißgeschwindigkeit [m/min], Fokusslage [mm] abhängt.

Im Hauptversuch wurden die Werte dieser Schweißparameter, wobei der nicht signifikante Schweißparameter (Winkel) auf einen konstanten Wert von 45° gesetzt wurden, weiter optimiert.

Damit erhielten wir die höchsten Werte mit geringster Standardabweichung der maximalen Bruchkraft der Al-Al Schweißverbindung wenn für die Laserleistung 1400 [W], Schweißgeschwindigkeit 6,5 [m/min] und bei der Fokusslage 0,6 [mm] eingestellt werden. (siehe Tabelle 43)

Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]
1400	6,5	-0,5

Tabelle 43: Optimale Parametereinstellung der Al-Al Schweißverbindung für das Laserschweißen

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung erhielten wir im ganzen Untersuchungsbereich ein sehr gutes Ergebnis. Um dieses Ergebnis zu überprüfen wurden drei Parametereinstellungen gewählt, wobei wir uns nach dem Bestätigungsversuchen, endgültig für die, so zu sagen, beste der besten Parametereinstellungen, entscheiden werden. (siehe Tabelle 44)

Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]
1000	2,5	-0,5

Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]
1000	4,0	-0,5

Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]
1400	4,0	-0,5

Tabelle 44: Drei optimale Parametereinstellung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für das Laserschweißen

Diese Faktorstufenkombinationen stellen mit der Einstellung des obengenannten, nicht signifikanten Schweißparameter auf den oben definierten Wert die optimale Parameterkombination zur Erzielung der maximalen Bruchkraft der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung.

In einem Bestätigungsversuch wurde diese optimale Parameterkombination 15 Mal jeweils für die Al-Al als auch für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung verschweißt.

Die Tabelle 45 stellt den Bestätigungsversuch für die Aluminium Verbindung und die die Tabelle 47 für die CuSn6-Cu(Ni) Verbindung mit den dazu-gehörigen maximalen Bruchkräften dar.

Die Werte der maximalen Bruchkraft variieren zwischen 251,2 N (Probe K13) und 392,3 N (Probe K11) bei der Al-Al Verbindung und zwischen 516,6 (Probe K26) und 671,95 (Probe K17) bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.

Die Standardabweichung liegt bei der Al-Al Verbindung bei 49,6N ($\leq 15,7\%$ vom Mittelwert) und bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung bei 108,93 ($\leq 8,9\%$ vom Mittelwert).

Probennr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]	Fmax [N]
K1	1400	6,5	-0,5	285,2
K2	1400	6,5	-0,5	270,6
K3	1400	6,5	-0,5	390,1
K4	1400	6,5	-0,5	266
K5	1400	6,5	-0,5	296,95
K6	1400	6,5	-0,5	312,6
K7	1400	6,5	-0,5	353,2
K8	1400	6,5	-0,5	314,15
K9	1400	6,5	-0,5	350,85
K10	1400	6,5	-0,5	276,2
K11	1400	6,5	-0,5	392,3
K12	1400	6,5	-0,5	365,6
K13	1400	6,5	-0,5	251,2
K14	1400	6,5	-0,5	366,75
K15	1400	6,5	-0,5	253,8

Tabelle 45: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Bestätigungsversuches Al-AI Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	316,4	49,6	251,2	392,3

Tabelle 46: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches Al-AI Verbindung

Probennr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]	Fmax [N]
K16	1000	2,5	-0,5	657,4
K17	1000	2,5	-0,5	671,95
K18	1000	2,5	-0,5	622,15
K19	1000	2,5	-0,5	668,75
K20	1000	2,5	-0,5	612,7
K21	1000	4,0	-0,5	670,65
K22	1000	4,0	-0,5	649,25
K23	1000	4,0	-0,5	683,9
K24	1000	4,0	-0,5	544,05
K25	1000	4,0	-0,5	656,85
K26	1400	4,0	-0,5	516,6
K27	1400	4,0	-0,5	606,55
K28	1400	4,0	-0,5	651,3
K29	1400	4,0	-0,5	670,4
K30	1400	4,0	-0,5	596,45

Tabelle 47: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	646,59	27,37	612,7	671,95
2	640,94	55,76	544,05	670,65
3	608,26	59,70	516,6	670,4

Tabelle 48: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Die Standardabweichung liegt bei der Al-Al Verbindung bei 49,6N ($\leq 15,7\%$ vom Mittelwert) und bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung bei 108,93 ($\leq 8,9\%$ vom Mittelwert).

Die Standardabweichungen bewegen sich in einem sehr guten Wertebereich und diese optimalen Parametereinstellungen können für eine robuste Serienproduktion empfohlen werden, wobei wir uns bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung auf die erste Einstellung geeinigt haben die konstant eine geringe Standardabweichung der Zugscherkraft von nur 4,2% vom Mittelwert liefert. Und dabei die höchste mittlere Zugscherkraft erreicht 646,59 N.

Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]
1000	2,5	-0,5

Tabelle 49: Optimale Parametereinstellung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für das Laserschweißen

9.4 Weitere Untersuchungen der Laserschweißverbindungen

9.4.1 Einfluss des Fügespaltes

Unter einem Fügespalt beim Laserschweißen im Überlappstoß versteht man den Abstand zwischen den beiden zu verbindenden Fügepartnern. (siehe Abbildung 46)

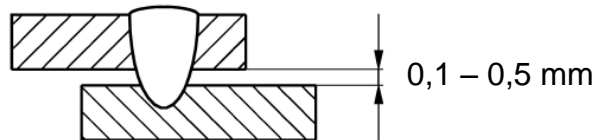


Abbildung 46 : Fügespalt

Der Fügespalt ist eine Störgröße die häufig in der Produktion durch Toleranzen in vorangehenden Prozessschritten sowie auf Grund ungenügender Spanntechnik beim Laserschweißprozess entsteht.

Um den Einfluss dieser Störgröße auf die Qualität und die Reproduzierbarkeit bei dem Verschweißen der Schweißverbindungen (Al-Al und CuSn6-Cu(Ni)) näher zu untersuchen wurden insgesamt 15 Schweißproben (Al-Al = 8 Proben und CuSn6-Cu(Ni)= 7 Proben) mit im Bestätigungsversuch definierten optimalen Parametereinstellungen verschweißt.

Die Spaltbreite zwischen den beiden Fügepartnern wurde durch Einlegen verschiedener Distanzbleche der 0,1; 0,2; 0,3 und 0,5 mm Dicke variiert. (Abbildung 47)

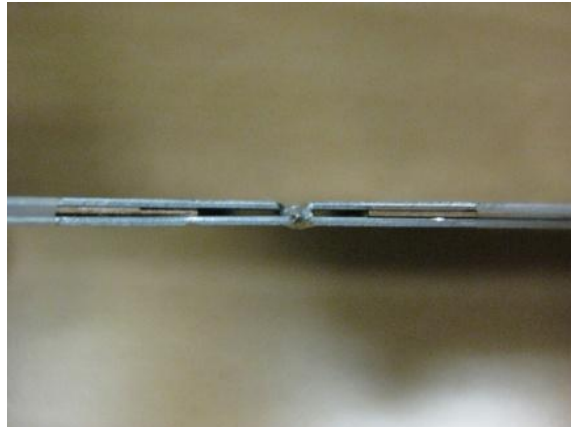


Abbildung 47 : Fügespalt und Schweißnaht an einer Al-Al Schweißverbindung

In folgender, Abbildung 48, ist die Zugscherkraft in Abhängigkeit von der Fügspaltweite für die Al-Al Schweißverbindung dargestellt.

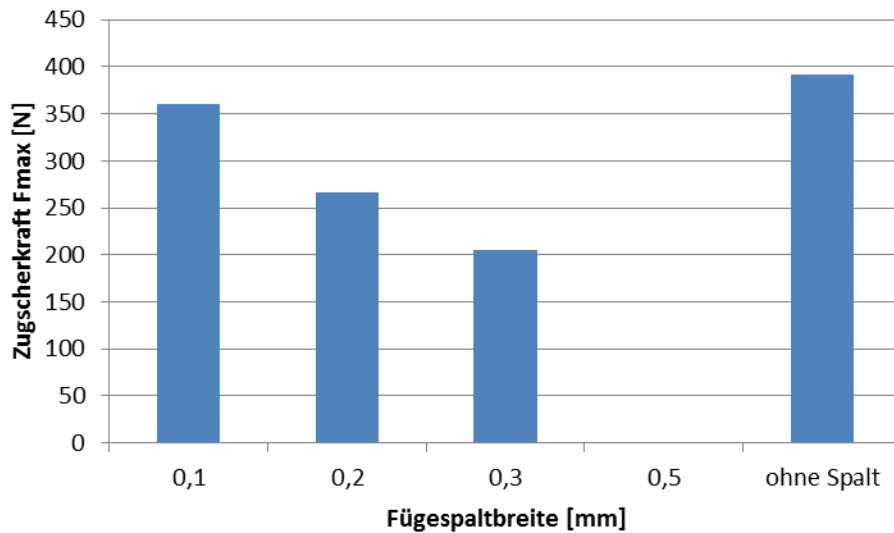


Abbildung 48 : Abhängigkeit der Zugscherkraft von der Fügespaltbreite bei der Al-Al Schweißverbindung

Aus der Abbildung 48 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Fügespaltbreite die Zugscherkraft dieser Schweißverbindung abfällt. Bei einer Fügespaltbreite von 0,5 mm ist sogar keine Schweißverbindung (siehe Abbildung 49) mehr möglich. Als Vergleich ist in der Abbildung 48 auch die Zugscherkraft der optimalen Parametereinstellung ohne Fügespalt dargestellt.



Abbildung 49 : „Schweißnaht“ an einer Al-Al Schweißverbindung bei einem Fügespalt von 0,5 mm

In folgender Abbildung 50 ist die Zugscherkraft in Abhängigkeit von der Fügspaltweite für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung dargestellt.

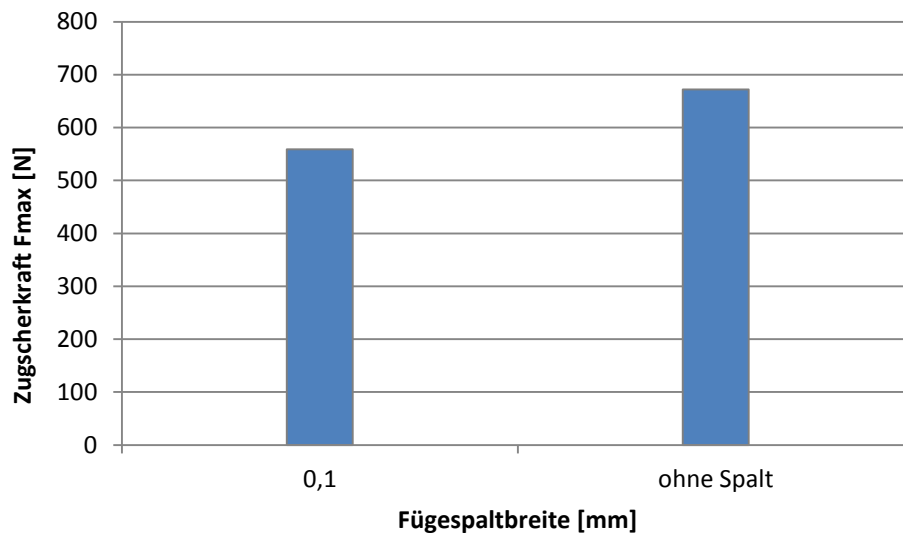


Abbildung 50 : Abhängigkeit der Zugscherkraft von der Fügspaltbreite bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung

Aus der Abbildung 50 ist zu erkennen, dass sogar eine Fügspaltbreite von nur 0,1 mm, im Verhältnis zu einer Schweißprobe die ohne Spalt hergestellt wurde, wesentlichen Einfluss auf die Zugscherkraft der Schweißverbindung hat. Dieser Einfluss ist so groß das für die Fügspaltbreiten von 0,2, 0,3 und 0,5 mm keine Schweißverbindung erzeugt werden konnte. Die Abbildung 51 zeigt eine solche Schweißprobe die nicht in Ordnung ist.



Abbildung 51 : „Schweißnaht“ an einer CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung bei einem Fügspalt von 0,3 mm

9.4.2 Herstellung der Schweißverbindung durch Steps

In Rahmen dieser Untersuchung ging es um die Analyse einer alternativen Form der Schweißnaht bei dem Verbinden der Elektrode der Batteriezelle und der Elektrode des Connector Conversion Boards durch das Laserschweißen.

Das Untersuchungsziel war es eine Schweißnaht, die nicht wie üblich über die gesamte Überlapplänge siehe Abbildung 5, sondern nur Abschnittsweise mit genau definierter Länge herzustellen (geringere Erwärmung des „Systems“). Daher kommt auch der Name für solche Schweißnähte.

Für diese Untersuchungen wurden die gleichen Probengeometrien wie bei der statistischen Optimierung verwendet. Dabei wurde die Al-Al oder CuSn6-Cu(Ni)-Probe mit zwei Steps der Länge von 10 mm (ohne Spalt) verschweißt. Nach dem Trennen durch die Nasstrennschleifmaschine, war die Breite der Probe genau wie bei der statistischen Versuchsplanung, 8mm. Die Abbildung 52 zeigt die Steps - Probe nach dem Schweißen (Bild links) und nach dem Trennen, vorbereitet für den Zugscherversuch (Bild rechts).

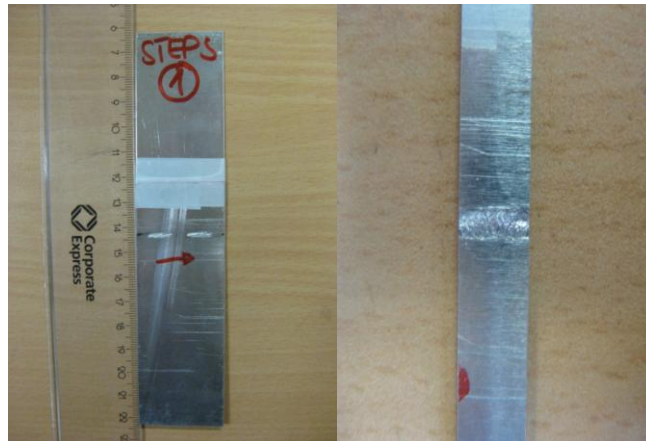


Abbildung 52 : Step-Probe nach dem Schweißen (Bild links) und nach dem Trennen (Bild rechts)

Die Tabelle 50 stellt den randomisierten Stepsversuchsplan für die Al-Al Schweißverbindung und die die Tabelle 52 für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung mit den dazugehörigen Mittelwerten der maximalen Bruchkräfte dar. Die Werte variieren zwischen 167,8 N (Probe S5) und 274,9 N (Probe S2) bei der Al-Al Verbindung und zwischen 475,7 N (Probe S12) und 628,2 (Probe S7) bei der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.

Bei der Al-Al Schweißverbindung liegen die Standardabweichungen bei 37,94 N ($\leq 16,4\%$ vom Mittelwert) und bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung bei 54,32 N ($\leq 9,32\%$ vom Mittelwert). (Tabelle 51 und 53)

Probennr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]	Fmax [N]
S1	1200	5	0	254,5
S2	1200	5	0	274,9
S3	1200	5	0	208,9
S4	1200	5	0	245,3
S5	1200	5	0	167,8
S6	1200	5	0	236,6

Tabelle 50: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) der Stepversuche der Al-Al Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	231,33	37,94	167,8	274,9

Tabelle 51: Deskriptive Statistik der Stepversuche der Al-Al Verbindung

Probennr.:	Laserleistung [W]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Focuslage [mm]	Fmax [N]
S7	1400	4	0,6	628,2
S8	1400	4	0,6	592,1
S9	1400	4	0,6	596
S10	1400	4	0,6	613,2
S11	1400	4	0,6	589,1
S12	1400	4	0,6	475,7

Tabelle 52: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) der Stepversuche der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung

Replikationen	X [N]	s [N]	Min [N]	Max [N]
1	582,38	54,32	475,7	628,2

Tabelle 53: Deskriptive Statistik der Stepversuche der Al-Al Verbindung

Während der Stepversuche wurden nicht die, durch die statistische Versuchsplanung erreichten, optimalen Parametereinstellungen verwendet weil sie zu dem Zeitpunkt der Stepversuche noch nicht feststanden. Dennoch kann gesagt werden, dass die untersuchten Einstellungen sich anhand der erreichten Zugscherkräfte für eine Produktion der Stepschweißnähte, eignen.

9.4.3 Härteprüfung

An insgesamt sechs lasergeschweißten Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindungen aus dem Screeningversuch wurden Härtemessungen durchgeführt. Dabei wurden hinsichtlich der Zugscherkraft jeweils eine schlechtere, mittlere und eine gute Probe gewählt. Im Detail wurde bei der Al-Al Schweißverbindung die Probe 1/12 mit 73,1 N als schlechte, die Probe 1/8 mit 243,15 N als mittlere und die Probe 1/14 mit 355,15 N als gute Probe gewählt.

Bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung wurde die Probe 3/2 mit 45,35 N als schlechte, die Probe 3/5 mit 408,3 N als mittlere und die Probe 3/11 mit 643,25 N als gute Probe ausgewählt.

Mit einer Prüfkraft von 2 N ($0,2 \text{ kp} = 2\text{N}$) wurden an den für die Schweißverbindung charakteristischen Stellen der Querschliffe oben genannter Proben Härtemessungen durchgeführt. Die charakteristischen Stellen die dabei geprüft wurden sind der Grundwerkstoff, die Wärmeeinflusszone (WEZ) und die Schweißnaht.

Die Abbildung 53 verdeutlicht an einer schematisch dargestellten Schweißverbindung den für die sechs Proben durchgeführten Härteverlauf. Der Härteverlauf setzt sich insgesamt aus 11 Prüfpunkten. Wobei die roten Punkte den Grundwerkstoff, die grünen Punkte die WEZ und die blauen Punkte die die Schweißnaht prüfen.

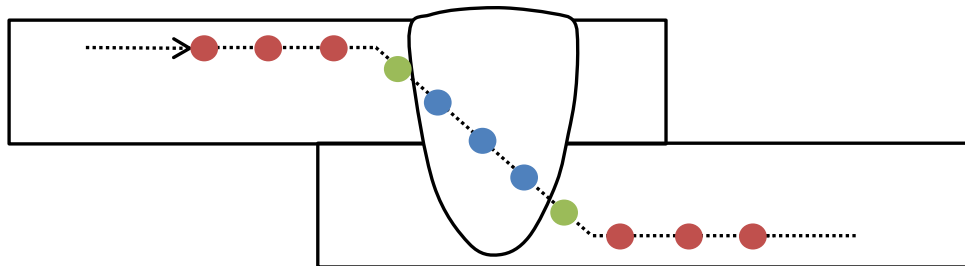


Abbildung 53 : Härteverlauf an den lasergeschweißten Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Proben

Da die WEZ bei beiden Schweißverbindungen sehr klein ist konnten nur zwei Prüfpunkte gesetzt werden. Die neben den sechs Prüfpunkten im Grundwerkstoff und drei Prüfpunkten in der Schweißnaht vollkommen ausreichend waren um einen Vergleich zwischen den schlechten, mittleren und guten Proben zu unterziehen.

Die Abbildung 54 zeigt, repräsentativ für alle drei Al-Al Schweißverbindungen, den Härteverlauf aufgetragen über die Prüfpunkte am Querschliff der Probe 1/14.

Was sofort auffällt ist eine konstante Härte im Grundwerkstoff beider Bleche aber einen Abfall in der Härte der WEZ und in der Schweißnaht.

Aufgrund der beim Laserschweißen eingebrachten Wärme wird die Versetzungsverfestigung im Bereich der Schweißnaht aufgehoben (Erholung), und in der WEZ findet eine Kornvergrößerung statt. Dies hat zur Folge, dass es zur einen Härteabfall im Bereich der Schweißnaht und der WEZ kommt. Die Höhe des Härteverlustes hängt

im Wesentlichen von der gewählten Streckenenergie ab. [47]

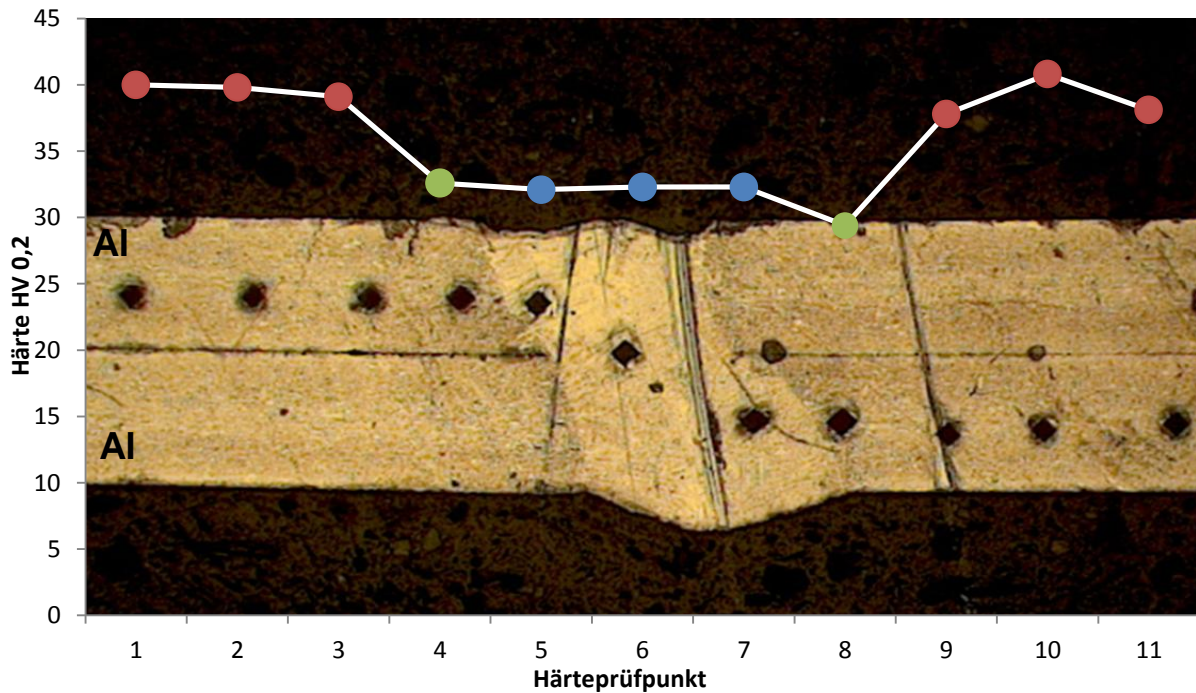


Abbildung 54 : Härteverlauf am Querschliff der Probe 14

Die Tabelle 54 fasst für alle drei Al-Al Schweißverbindungen an den die Härteprüfung durchgeführt wurde die Ergebnisse zusammen. Wobei für die drei Schweißstellen der Proben die Mittelwerte und die Standardabweichung der Härte HV 0,2 errechnet wurden. Da die Proben anhand ihrer erreichten Zugscherkraft im Zugscherversuch ausgewählt wurden ist sie, zur Orientierung, auch in dieser Tabelle angeführt.

Es konnte kein signifikanter Unterschied in der Härte der drei charakteristischen Stellen (Grundwerkstoff, WEZ und Schweißnaht) gefunden werden der uns anhand der erreichten Härte indiziert welche Schweißverbindung gut, schlecht oder mittelmäßige mechanische Festigkeitseigenschaften hat.

Probe	Prüfpunkt	X [HV 0,2]	s [HV 0,2]	Fmax [N]
Probe 1/12 (schlecht)	Grundwerkstoff	40	1,92	73,1
	WEZ	35	7,42	
	Schweißnaht	38	4,40	
Probe 1/8 (mittel)	Grundwerkstoff	38	2,11	243,15
	WEZ	31	0,21	
	Schweißnaht	37	0,71	
Probe 1/14 (gut)	Grundwerkstoff	39	1,16	355,15
	WEZ	31	2,26	
	Schweißnaht	32	0,12	

Tabelle 54: Ergebnisse der Härtemessung bei den Al-Al Schweißverbindungen

In der Abbildung 55 ist, repräsentativ für alle drei CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindungen, der Härteverlauf aufgetragen über die Prüfpunkte am Querschliff der Probe 3/11. Um die Schweißnaht leichter zu erkennen wurde sie mit der schwarzen Farbe nachgezeichnet. Weil das obere Blech aus CuSn6 und das untere Blech aus Cu(Ni) besteht und da CuSn6 eine höhere Härte des Grundwerkstoffes (ca. 200 HV 0,2) zur der Härte des Cu(Ni) Grundwerkstoffes (ca. 80 HV 0,2) bekommen wir eine ungewöhnlichen Härteverlauf, der nach der Schweißnaht nicht wieder ansteigt, sondern auf einem Niveau der Härte der Schweißnaht bleibt.

Dabei ist sehr interessant das der Prüfpunkt der WEZ am CuSn6 Blech, bei allen drei Proben, eine höhere Härte, im Bereich von 20-30 %, als der Prüfpunkt der WEZ am Cu(Ni) Blech hat (siehe auch die Standardabweichung der WEZ in der Tabelle 55). Warum es zu solch einem hohen Unterschied bei diesen beiden Prüfpunkten der WEZ kommt, zeigen folgende im Kapitel 9.4.5 dargestellten, Untersuchungen.

Wie auch bei der Al-Al Schweißverbindung kommt es auch bei der CuSn6-Cu(Ni) aufgrund hoher Wärmeeinbringung in der WEZ und der Schweißnaht zur erheblichen Härteabfall. Dabei ist das Gefüge der Schweißnaht grobkristallin und in der WEZ entsteht ein grobkörniges Gefüge geringer Härte. [31]

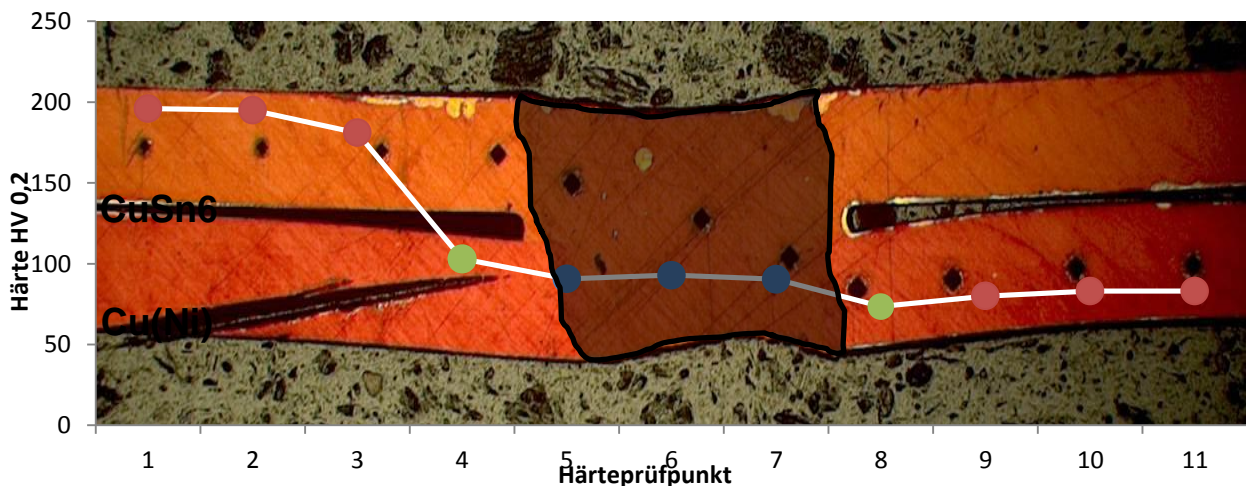


Abbildung 55 : Härteverlauf am Querschliff der Probe 11

Zum Abschluss die Ergebnisse der Härtemessung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung:

Probennr.:	Prüfpunkt	X [HV 0,2]	s [HV 0,2]	Fmax [N]
Probe 2 (schlecht)	Grundwerkstoff CuSn6	197	4,73	45,35
	Grundwerkstoff Cu(Ni)	81	1,96	
	WEZ	97	21,50	
	Schweißnaht	97	16,44	
Probe 5 (mittel)	Grundwerkstoff CuSn6	194	4,62	408,3
	Grundwerkstoff Cu(Ni)	81	1,27	
	WEZ	87	19,87	
	Schweißnaht	96	12,60	
Probe 11 (gut)	Grundwerkstoff CuSn6	191	8,39	643,25
	Grundwerkstoff Cu(Ni)	82	1,73	
	WEZ	88	20,86	
	Schweißnaht	91	1,37	

Tabelle 55: Ergebnisse der Härtemessung bei den CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindungen

9.4.4 REM Untersuchungen

Im Laufe der Auswertung der Ergebnisse der Härteprüfung für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung wurde festgestellt das die Härtewerte der Prüfpunkte der WEZ sich um 20-30% unterscheiden und das dabei, bei allen drei Proben, die höhere Härte in der WEZ im CuSn6 Blech erreicht wird. Um dieser Erkenntnis näher zu untersuchen wurden an den gleichen Schweißproben der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung d.h. an Proben 3/2,3/5 und 3/11 rasterelektronmikroskopische Untersuchungen durchgeführt.

Ein weiteres Ziel der REM-Untersuchungen war auch die Frage was mit der Nickelschicht des unteren Bleches nach dem Schweißen geschieht.

Zuerst wurde an dem Querschliff der Probe mit Hilfe der EDX-Analyse ein Flächenscan durchgeführt. Dabei wurden alle vorkommenden Elemente des Untersuchungsbereiches detektiert. Diese auftretenden Elemente werden in einem Spektrum aufgelistet und sind in der Abbildung 56 dargestellt.

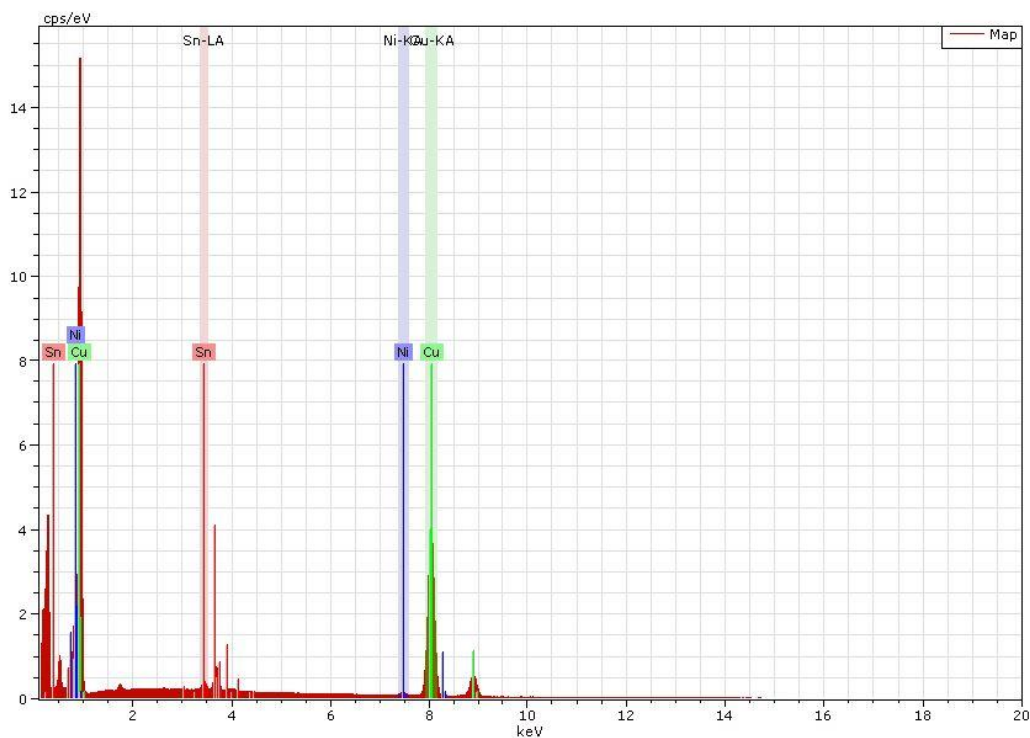


Abbildung 56 : Spektrum des Untersuchungsbereiches

Wie auch nicht anders zu erwarten wurden im diesen Untersuchungsbereich die Elemente Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zinn (Sn) aufgelistet.

Nachdem der Flächenscan durchgeführt wurde und wir die im Untersuchungsbereich auftretenden Elemente definiert haben werden Elementbilder erzeugt. Diese Elementbilder werden eingesetzt um festzustellen wo und in welcher Menge die Elemente vorhanden sind.

Die Abbildung 57 ist eine Überblendung aller auftretenden Elemente. Wobei die Atome des Kupfers grün, die des Zinns rot und die des Nickels in blauer Farbe dargestellt sind.

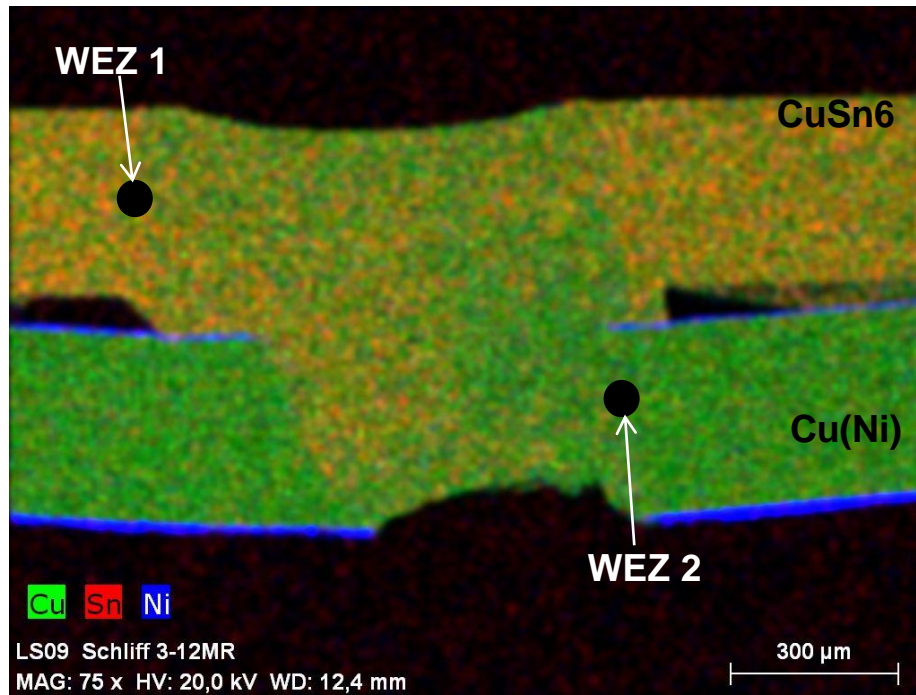


Abbildung 57 : Überblendung aller auftretenden Elemente im Untersuchungsreich

Durch die Wirkung des Laserstrahles kommt es zu einer Diffusion und Verwirbelung (siehe Abbildung 57) von den Zinn Atomen des oberen Bleches in das untere Blech. Die Kupferatome des unteren Bleches wandern dabei, aufgrund dieser Verwirbelung, in das obere Blech.

Die Nickelschicht des unteren Bleches wird dabei in der Schweißnaht total aufgelöst und kann nur an der unbeeinflussten Oberfläche des untern Bleches detektiert werden. (siehe Abbildung 59)

Im Bereich der WEZ kommt es zur einer zu geringen Aufmischung Atome beider Bleche. Sodas im oberem und im unteren Blechbereich der WEZ, keine homogenen Verteilung der Atome stattfindet. Der Härteprüfpunkt der WEZ im oberen Blech (WEZ 1) ist viel mehr von Zinn, bzw. vom Grundwerkstoff CuSn6 umgeben, welcher Härter (100 HV 0,2 zu 80 HV 0,2) ist als der Grundwerkstoff Cu(Ni) von welchem der Prüfpunkt WEZ 2 umgeben ist. Das ist auch der Grund warum bei der Härteprüfung unterschiedliche Werte in der WEZ entstanden sind.

Die Abbildungen 59 bis 61 zeigen die Elementverteilung für Zinn (Sn), Nickel (Ni) und Kupfer (Cu) der Probe 3/11.

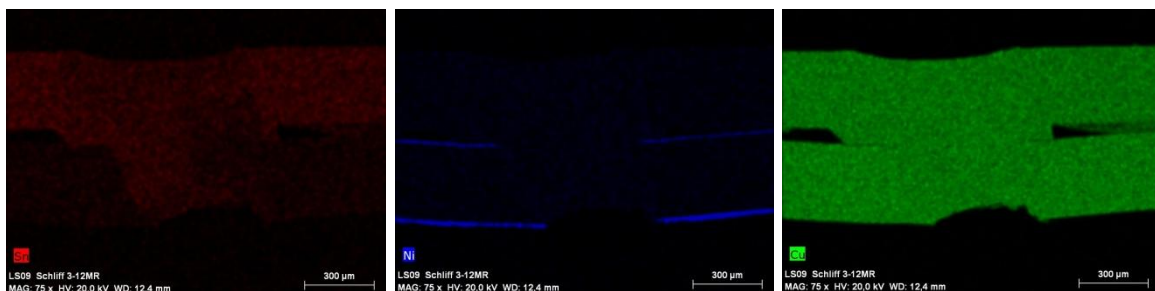


Abbildung 58 : Elementverteilung (Sn) Abbildung 59 : Elementverteilung (Ni) Abbildung 60 : Elementverteilung (Cu)

Die Bilddokumentation der zwei weitem CuSn6-Cu(Ni) Proben die mit dem REM untersucht wurden befindet sich im Anhang unter dem Kapitel 11.4.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde aufgezeigt, dass sich beide Schweißverfahren (Ultraschallschweißen und Laserschweißen) für das Verbinden der Li-Ionen Zellen mit dem Connector Conversion Board sehr gut eignen.

Ziel dabei war es auch durch die Anwendung der statistischen Versuchsplanung eine Parametereinstellung zu finden, welche die Zugscherkraft von Ultraschall- und Lasergeschweißten Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindungen maximiert und gleichzeitig einen robusten Prozess für die beiden Schweißverfahren ermöglicht.

Die potentiellen Einflussgrößen für das Ultraschallschweißen: Energie, Amplitude, Haltezeit und Schweißdruck sowie für das Laserschweißen: Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Fokusslage und Winkel des einfallenden Strahles wurden zu Beginn in einem Brainstorming ermittelt. Durch anschließende Analyse und Anwendung der statistischen Planung konnte der Einfluss dieser Faktoren bzw. deren Signifikanz auf die Zielgröße bestimmt werden.

Dabei sind der Signifikanz nach geordnet folgende Schweißparameter für das Verbinden der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung entscheidend:

Für das Ultraschallschweißen: Amplitude, Energie und Schweißdruck und für das Laserschweißen: Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokusslage.

Für die jeweils signifikantesten beiden Schweißparameter wurden physikalische Erklärungen ihres Verhaltens und Modelle aufgestellt, wobei bewiesen werden konnte, dass die Amplitude bei dem Ultraschallschweißen einen maximal Wert hat, bei dem die Schweißverbindung hohe Zugscherkräfte ertragen kann. Wird dieser optimale Wert der Amplitude überschritten, kommt es zu Einbußen in der Zugscherkraft der Schweißverbindung. Bei dem Laserschweißen konnten theoretische Überlegungen aufgestellt werden, die über die Streckenenergie (Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit) einen Rückschluss auf die erreichbare Festigkeit der Schweißverbindung ermöglichen.

Für beide Schweißverfahren und für beide Werkstoffkombinationen konnten hier die maximalen Scherzugkräfte und die Standardabweichungen des Screeningversuches deutlich verbessert werden. Diese Ergebnisse bewiesen dass sich die beiden Schweißverfahren für eine robuste Serienproduktion bei diesen Werkstoffpaarungen und den erarbeiteten optimalen Parametereinstellungen sehr gut eignen.

Durch detaillierte Untersuchungen wurde der Einfluss der Störgröße des Spaltes, die sich ungünstig auf die Zugscherkraft der Laserschweißverbindung auswirkt, aufgezeigt. Dabei wurde erkannt, dass sich schon geringe Splatdistanzen (0,1mm bzw. 0,3-0,5mm) extrem negativ auf die statische Zugfestigkeit der Verbindung auswirken. Unter weiteren Untersuchungen war auch die Möglichkeit des Laserschweißens von Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) durch so genannte Step-Schweißnähte dargestellt worden. Um weitere Erkenntnisse über die Qualität der Schweißverbindungen, vor allem beim Laserschweißen zu gewinnen, wurden Härtemessungen und REM und EDX – Untersuchungen durchgeführt.

Durch die Anwendung der statistischen Versuchsplanung konnte ein wichtiger Schritt hin zu optimalen Parametereinstellungen für das Ultraschallschweißen und Laserschweißen der Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Dünoblechverbindung gemacht werden. Die gewonnen Ergebnisse bieten eine sehr gute Ausgangslage für weiter Untersuchungen, die z.B. bei der Analyse der Dauerfestigkeit sowie der Implementierung der optimalen Parametereinstellungen im Produktionsprozess durchgeführt werden sollten.

11 Anhang

11.1 Chemische Analysen zu den verwendeten Grundwerkstoffen

11.1.1 Aluminium

Methode: AL-01
 Kommentar: AL-LEGIERUNGEN GLOBAL 9374/97
 Einzelabfunktung(en)

21.09.2009 10:51:53

Elemente: Konzentrationen

Probe: wt15539 Qualität: Proben ID:
 Bezeichnung: probe 4 Firma:

Nr	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	0.1297	0.2733	0.0673	0.0048	0.0103	0.0093	0.0024	0.0011	0.0010
2	0.1259	0.2677	0.0049	0.0047	0.0095	0.0081	0.0014	0.0010	<0.0010
3	0.1257	0.2663	0.0059	0.0046	0.0097	0.0087	0.0015	0.0010	<0.0010
4	0.1276	0.2745	0.0377	0.0048	0.0097	0.0091	0.0018	0.0010	<0.0010

Nr	Sn %	Ti %	Ag %	B %	Bi %	Ca %	Cd %	Ga %	Na %
1	0.0011	0.0130	0.0006	0.0017	<0.0010	0.0003	0.0006	0.0097	0.0003
2	<0.0010	0.0128	0.0006	0.0017	<0.0010	0.0003	0.0006	0.0097	0.0003
3	<0.0010	0.0128	0.0006	0.0018	<0.0010	0.0004	<0.0005	0.0096	0.0004
4	<0.0010	0.0130	0.0006	0.0018	<0.0010	0.0004	0.0006	0.0097	0.0003

Nr	P %	Sb %	Sr %	Li %	V %	Zr %	Co %	Al %
1	0.0008	<0.0003	<0.0005	<0.0001	0.0039	<0.0005	<0.0010	99.5
2	0.0009	<0.0003	<0.0005	<0.0001	0.0039	<0.0005	<0.0010	99.5
3	0.0008	<0.0003	<0.0005	<0.0001	0.0041	<0.0005	<0.0010	99.5
4	0.0008	<0.0003	<0.0005	<0.0001	0.0043	<0.0005	<0.0010	99.5

Methode: AL-01
 Kommentar: AL-LEGIERUNGEN GLOBAL 9374/97
 Mittelwert (n=4)

21.09.2009 10:51:53

Elemente: Konzentrationen

Probe: wt15539 Qualität: Proben ID:
 Bezeichnung: probe 4 Firma:

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
\bar{x}	0.1272	0.2704	0.0290	0.0047	0.0098	0.0088	0.0018	0.0010	<0.0010

	Sn %	Ti %	Ag %	B %	Bi %	Ca %	Cd %	Ga %	Na %
\bar{x}	<0.0010	0.0129	0.0006	0.0017	<0.0010	0.0003	0.0006	0.0097	0.0003

	P %	Sb %	Sr %	Li %	V %	Zr %	Co %	Al %
\bar{x}	0.0009	<0.0003	<0.0005	<0.0001	0.0040	<0.0005	<0.0010	99.5

11.1.2 CuSn6

Methode: CU-60 21.09.2009 09:57:57
 Kommentar: Cu/Sn/Pb Legierungen 9374/97
 Einzelabfunktung(en) Elemente: Konzentrationen

Proben Nr.: wt15539 Firma: Proben Id.:
 Bezeichnung: probe **2** Qualität:

Nr	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %
1	6.16	0.0041	0.0150	0.0935	<0.0010	0.0110	<0.0015	<0.0010	<0.0010
2	6.13	0.0055	0.0169	0.0964	<0.0010	0.0116	<0.0015	<0.0010	<0.0010
3	6.13	0.0046	0.0176	0.0918	<0.0010	0.0104	<0.0015	<0.0010	<0.0010
4	6.09	0.0044	0.0166	0.0915	<0.0010	0.0096	<0.0015	<0.0010	<0.0010

Nr	As %	Sb %	Bi %	Al %	S %	Cu %
1	0.0135	0.0043	<0.0010	<0.0010	0.0032	93.7
2	0.0145	0.0041	<0.0010	<0.0010	0.0032	93.7
3	0.0139	0.0039	<0.0010	<0.0010	0.0032	93.7
4	0.0138	0.0039	<0.0010	<0.0010	0.0031	93.8

Methode: CU-60 21.09.2009 09:57:57
 Kommentar: Cu/Sn/Pb Legierungen 9374/97
 Mittelwert (n=4) Elemente: Konzentrationen

Proben Nr.: wt15539 Firma: Proben Id.:
 Bezeichnung: probe **2** Qualität:

	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %
\bar{x}	6.13	0.0046	0.0165	0.0933	<0.0010	0.0106	<0.0015	<0.0010	<0.0010

	As %	Sb %	Bi %	Al %	S %	Cu %
\bar{x}	0.0139	0.0040	<0.0010	<0.0010	0.0032	93.7

11.1.3 Cu(Ni)

Methode: CU-10
 Kommentar: Rein Cu
 Einzelabfunkt(en)

9374/97

21.09.2009 10:12:29

Elemente: Konzentrationen

Proben Nr.: wt15539
 Proben Id.: probe 3

Qualität:

Nr	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %
1	0.0016	<0.0010	<0.0010	0.0259	<0.0010	<0.0010	0.0073	0.0016	<0.0010
2	<0.0010	0.0016	<0.0010	0.0255	<0.0010	0.0011	0.0464	0.0016	<0.0010
3	0.0013	<0.0010	<0.0010	0.0251	<0.0010	0.0065	0.0107	0.0017	0.0012
4	0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0259	<0.0010	0.0045	0.0389	0.0014	<0.0010

Nr	Cr %	Te %	As %	Se %	Sb %	Cd %	Bi %	Ag %	Co %
1	<0.0005	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0075	<0.0010
2	<0.0005	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0077	<0.0010
3	<0.0005	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0075	<0.0010
4	<0.0005	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0076	<0.0010

Nr	Al %	S %	Be %	Zr %	O %	Cu %
1	>0.0480	<0.0010	<0.0001	<0.0010	<0.0010	99.9
2	>0.0480	<0.0010	<0.0001	<0.0010	<0.0010	99.8
3	>0.0480	<0.0010	<0.0001	<0.0010	<0.0010	99.9
4	>0.0480	<0.0010	<0.0001	<0.0010	<0.0010	99.9

Methode: CU-10
 Kommentar: Rein Cu
 Mittelwert (n=4)

9374/97

21.09.2009 10:12:29

Elemente: Konzentrationen

Proben Nr.: wt15539
 Proben Id.: probe 3

Qualität:

	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %
\bar{x}	0.0012	<0.0010	<0.0010	0.0256	<0.0010	0.0032	0.0258	0.0016	<0.0010

	Cr %	Te %	As %	Se %	Sb %	Cd %	Bi %	Ag %	Co %
\bar{x}	<0.0005	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.0076	<0.0010

	Al %	S %	Be %	Zr %	O %	Cu %
\bar{x}	>0.0480	<0.0010	<0.0001	<0.0010	<0.0010	99.9

Bruker Austria GmbH
Lemböckgasse 47b
A-1230 Wien



S1 Report

Probe: RF - Analyse **Datum:** 26.10.2009 **Zeit:** 20:44
ID: Beschichtung **Dauer:** 19,9 s
Feld 1: S1 TurboSD LE
Feld 2: Bruker Austria GmbH
Methode: Metal Analyze **Typ:** GradelD Emp
Legierungen: CDA706 90Cu-10Ni (8,6)
CDA110 or CDA172 Elect Copper
CDA630 or CDA955-Alum Bronz (0,1)

Element		Konzentration	Stdabw
Mangan	Mn	0,02	0,01
Eisen	Fe	0,01	0,01
Cobalt	Co	0,01	0,01
Nickel	Ni	9,10	0,05
Kupfer	Cu	90,66	0,15
Zink	Zn	0,04	0,01
Arsen	As	0,00	0,00
Zirconium	Zr	0,02	0,00
Silber	Ag	0,03	0,02
Zinn	Sn	0,09	0,02
Antimon	Sb	0,01	0,01

Diese Messung wurde mit dem BRUKER S1 TurboSD LE Analysator durchgeführt.

Josef Schuller

11.2 Zugversuche

11.2.1 Zugversuche des Grundwerkstoffes

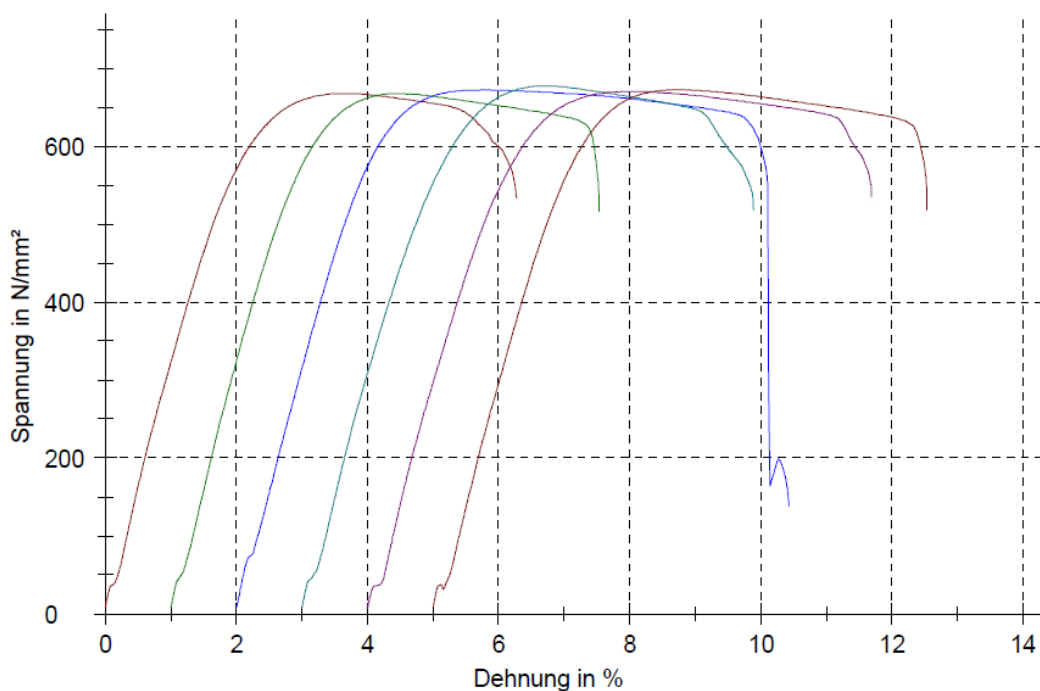
Parametertabelle:

WT-Nummer	: WT15539	Prüfer	: Mucic
Prüfung	: Zugprüfung	Datum	: 27.11.2009
Prüfnorm	: DIN EN 10002 angelehnt	Maschinendaten:	
Werkstoff	: CuSn6		

Ergebnisse:

Legende	Nr	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm ²	Rm N/mm ²	F max. N
	1	0,3	7,56	2,27	668,1	1515,2
	2	0,3	7,98	2,39	667,9	1599,0
	3	0,3	7,81	2,34	672,9	1576,7
	4	0,3	7,46	2,24	678,1	1517,5
	5	0,3	7,48	2,24	670,6	1504,7
	6	0,3	7,71	2,31	673,1	1556,9

Seriengrafik:



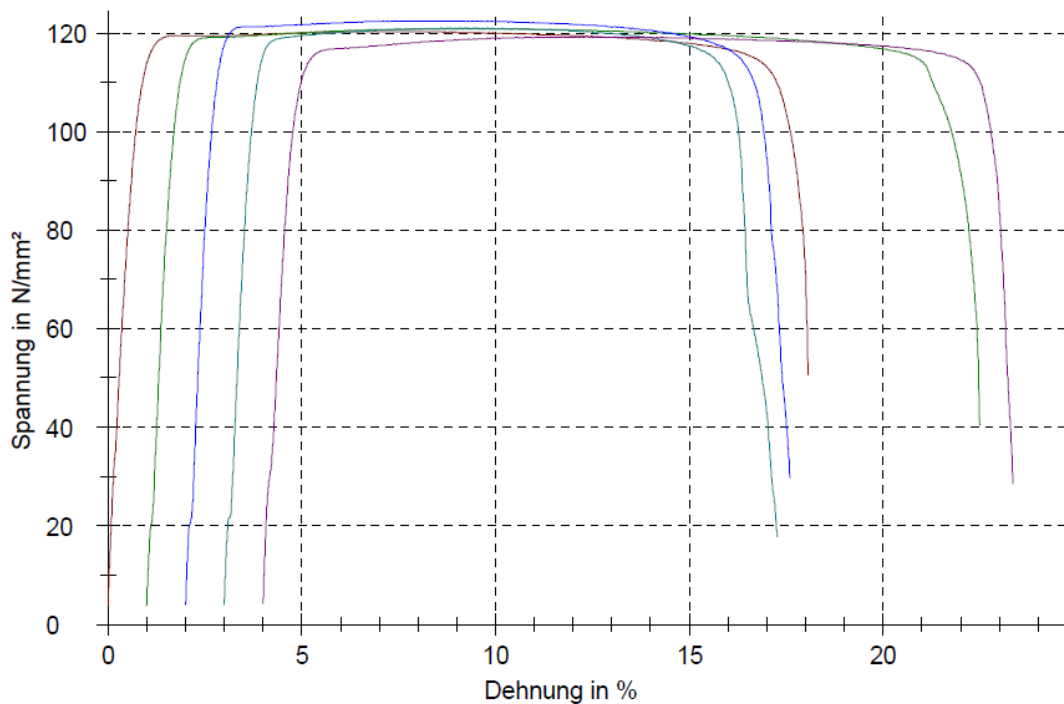
Parametertabelle:

WT-Nummer	: WT15539	Prüfer	: Mucic
Prüfung	: Zugprüfung	Datum	: 27.11.2009
Prüfnorm	: DIN EN 10002 angelehnt	Maschinendaten:	
Werkstoff	: Al 99,5%		

Ergebnisse:

Legende	Nr	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm ²	Rm N/mm ²	F max. N
	1	0,5	7,95	3,98	120,3	478,3
	2	0,5	8,04	4,02	120,9	486,1
	3	0,5	8,04	4,02	122,5	492,4
	4	0,5	7,92	3,96	121,0	479,1
	5	0,5	8,04	4,02	119,2	479,1

Seriengrafik:



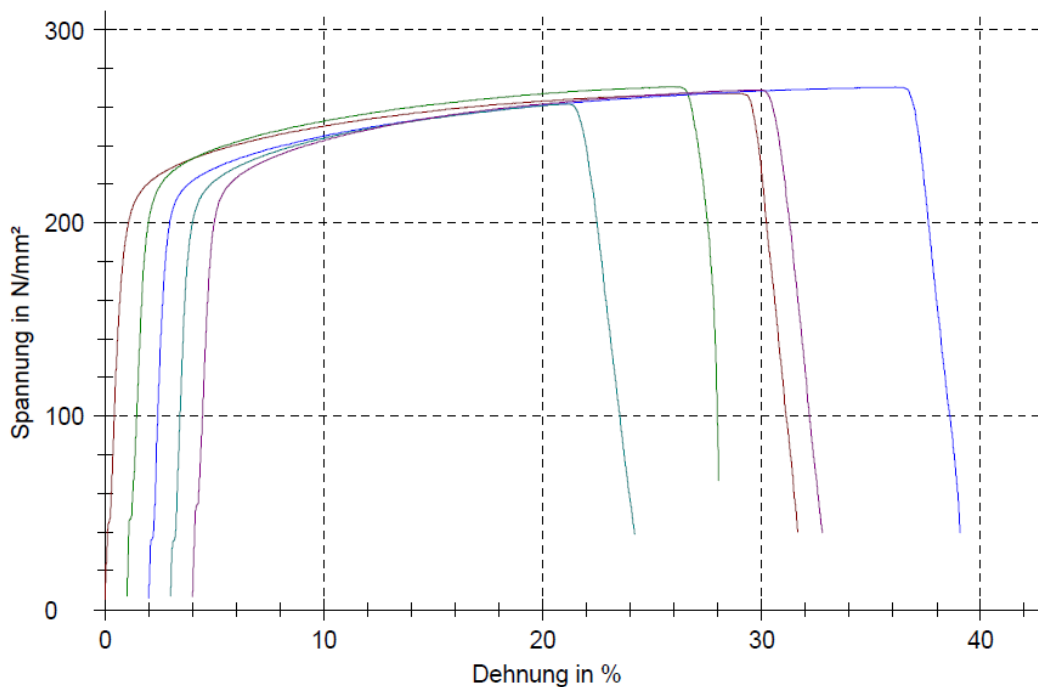
Parametertabelle:

WT-Nummer	: WT15539	Prüfer	: Mucic
Prüfung	: Zugprüfung	Datum	: 27.11.2009
Prüfnorm	: DIN EN 10002 angelehnt	Maschinendaten:	
Werkstoff	: Cu (Ni)		

Ergebnisse:

Legende	Nr	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	S0 mm ²	Rm N/mm ²	F max. N
	1	0,3	8,09	2,43	267,1	648,2
	2	0,3	7,84	2,35	270,5	636,2
	3	0,3	7,9	2,37	270,3	640,7
	4	0,3	7,96	2,39	261,5	624,4
	5	0,3	7,98	2,39	268,8	643,6

Seriengrafik:



11.2.2 Zugversuche des Screeningversuchs für das Ultraschallschweißen (Al-Al)

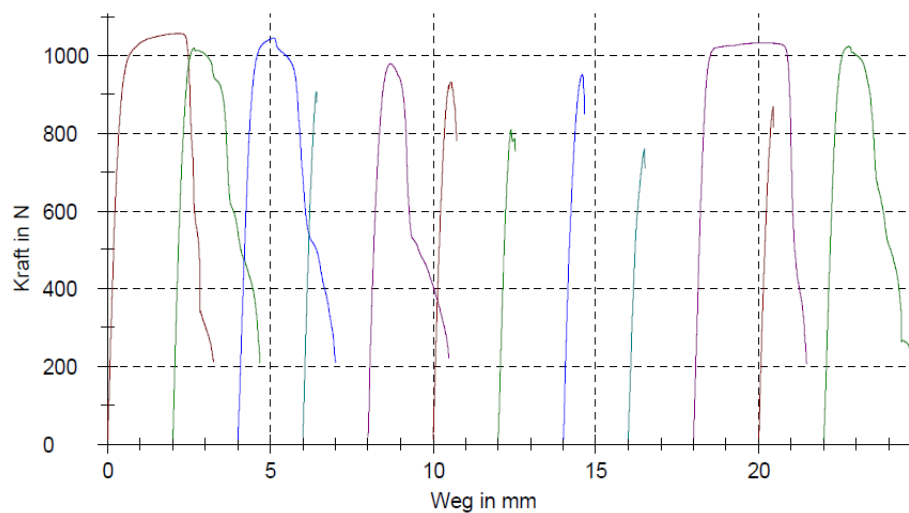
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 1-1 bis 1-12
 Benennung : Dünnblechverbindungen Al-Al US Vorversuch
 Prüfer : Vidovic
 Datum : 09.10.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	17 mm	1057,1	64
	2	17 mm	1020,1	64
	3	17 mm	1045,5	64
	4	17 mm	906,4	64
	5	17 mm	979,0	64
	6	17 mm	931,6	64
	7	17 mm	809,1	64
	8	17 mm	950,6	64
	9	17 mm	759,6	64
	10	17 mm	1032,6	64
	11	17 mm	868,1	64
	12	17 mm	1023,6	64

Seriengrafik:



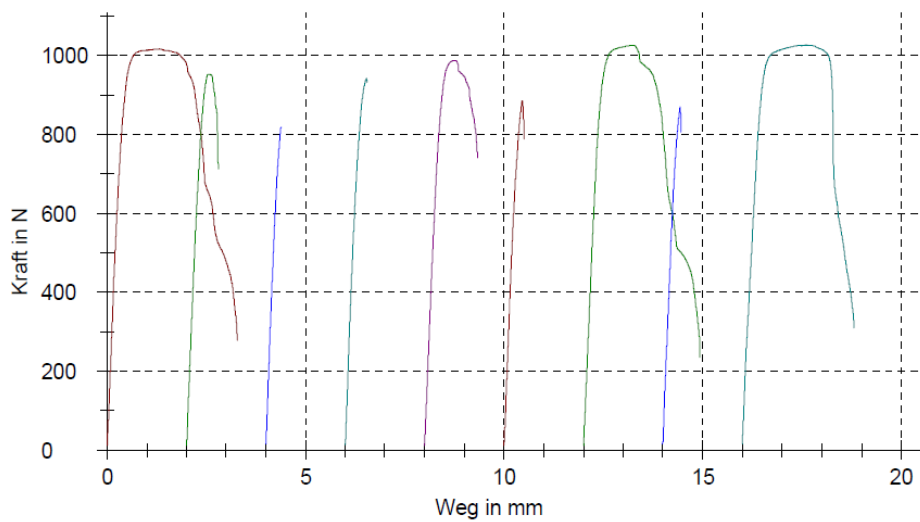
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 1-13 bis 1-21
 Benennung : Dünnblechverbindungen Al-Al US (Vorversuch)
 Prüfer : Mucic
 Datum : 09.10.2009
 Prüfungsgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	13	17 mm	1017,2	64
	14	17 mm	953,1	64
	15	17 mm	818,1	64
	16	17 mm	942,3	64
	17	17 mm	988,1	64
	18	17 mm	885,2	64
	19	17 mm	1026,2	64
	20	17 mm	869,1	64
	22	17 mm	1026,8	64

Seriengrafik:



11.2.3 Zugversuche des Screeningversuchs für das Ultraschallschweißen (CuSn6-Cu(Ni))

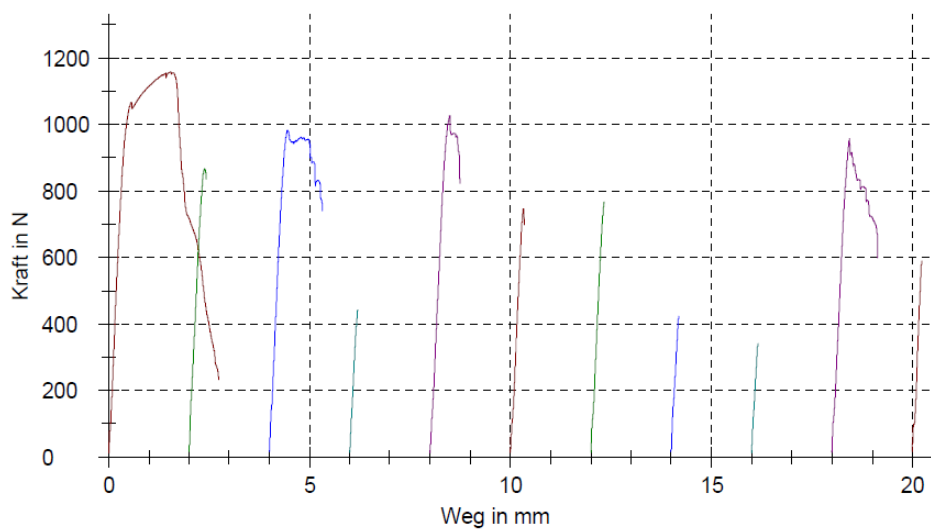
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 3-1 bis 3-11
 Benennung : Dünnblechverbindung CuSn6-Cu(Ni) US (Vorversuch)
 Prüfer : Mucic
 Datum : 09.10.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	17 mm	1157,5	64
	2	17 mm	866,6	64
	3	17 mm	983,1	64
	4	17 mm	442,1	64
	5	17 mm	1027,3	64
	6	17 mm	746,4	64
	7	17 mm	766,9	64
	8	17 mm	423,0	64
	9	17 mm	341,2	64
	10	17 mm	958,2	64
	11	17 mm	590,1	64

Seriengrafik:



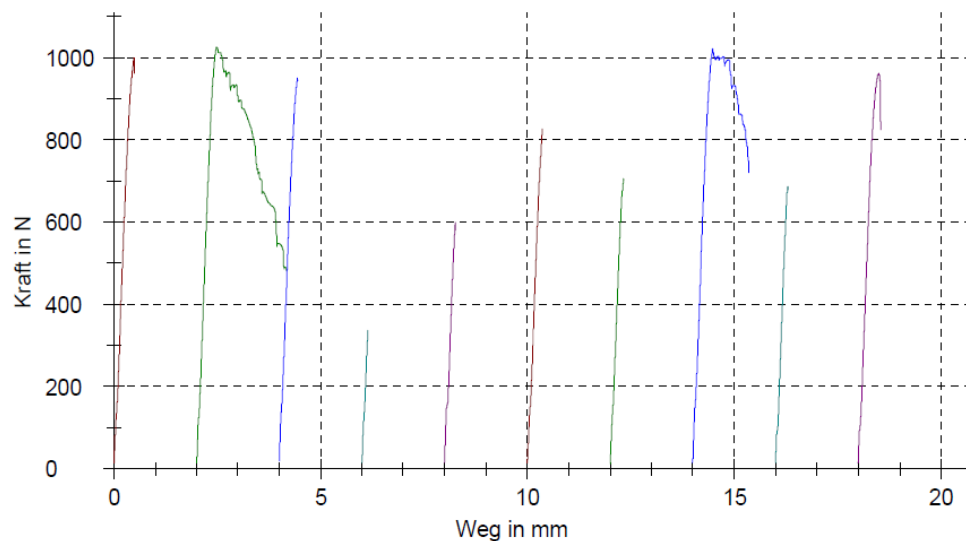
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 3-12 bis 3-21
 Benennung : Dünoblechverbindung CuSn6-Cu(Ni) US
 (Vorversuch)
 Prüfer : Mucic
 Datum : 09.10.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	12	17 mm	1000,2	64
	13	17 mm	1025,6	64
	14	17 mm	950,9	64
	15	17 mm	337,1	64
	16	17 mm	598,9	64
	17	17 mm	827,6	64
	18	17 mm	706,5	64
	19	17 mm	1022,4	64
	20	17 mm	687,1	64
	21	17 mm	961,5	64

Seriengrafik:















11.2.4 Zugversuche des Hauptversuches für das Ultraschallschweißen (Al-Al)

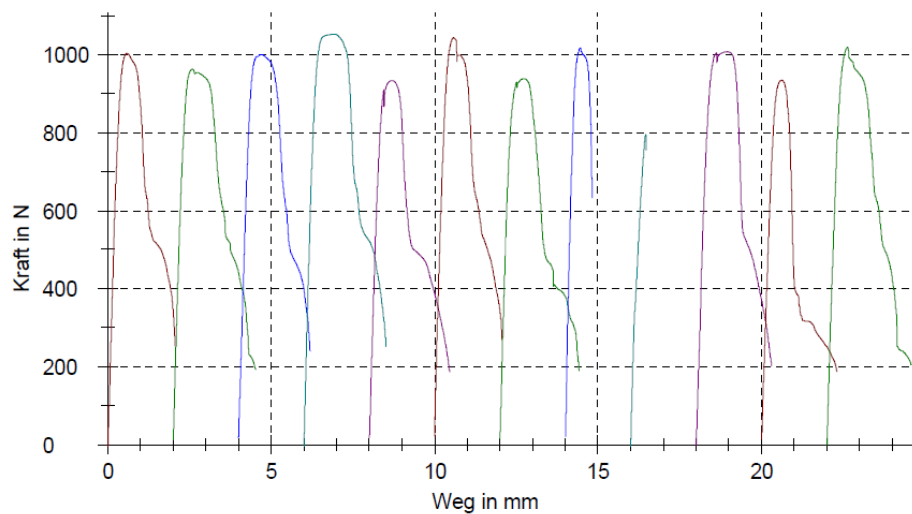
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer : WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 5/1 - 5/12
 Benennung : Dünnblechverbindungen Alu-Alu
 Prüfer : Vidovic
 Datum : 27.11.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten : 10SN3A WN:157542
 Traversenwegaufnehmer WN:157542
 Kraftsensor ID:0 WN:147774 10 kN
 Bemerkung/Abweichung: 5/9 u. 5/8 spannproblem

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	17 mm	1003,4	64
	2	17 mm	962,9	64
	3	17 mm	1000,7	64
	4	17 mm	1053,5	64
	5	17 mm	933,8	64
	6	17 mm	1044,5	64
	7	17 mm	938,7	64
	8	17 mm	1017,1	64
	9	17 mm	795,3	64
	10	17 mm	1007,9	64
	11	17 mm	935,0	64
	12	17 mm	1019,3	64

Seriengrafik:



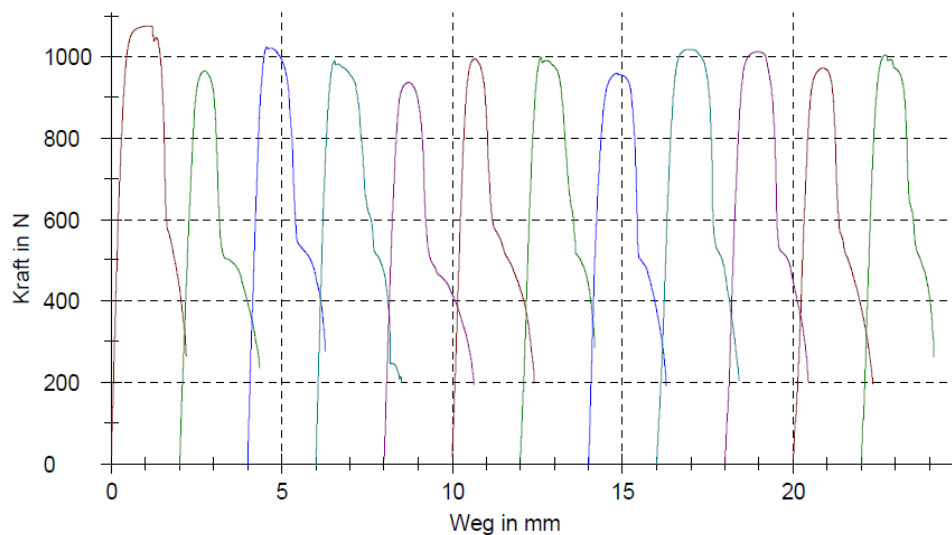
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 5/13 bis 5/24
 Benennung : Dünnblechverbindungen Al-Al US (Hauptversuch)
 Prüfer : Mucic
 Datum : 27.11.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	13	17 mm	1075,8	64
	14	17 mm	965,1	64
	15	17 mm	1024,1	64
	16	17 mm	990,2	64
	17	17 mm	936,8	64
	18	17 mm	995,3	64
	19	17 mm	998,9	64
	20	17 mm	959,1	64
	21	17 mm	1018,5	64
	22	17 mm	1012,5	64
	23	17 mm	971,6	64
	24	17 mm	1004,3	64

Seriengrafik:



11.2.5 Zugversuche des Hauptversuchesversuchs für das Ultraschallschweißen (CuSn6-Cu(Ni))

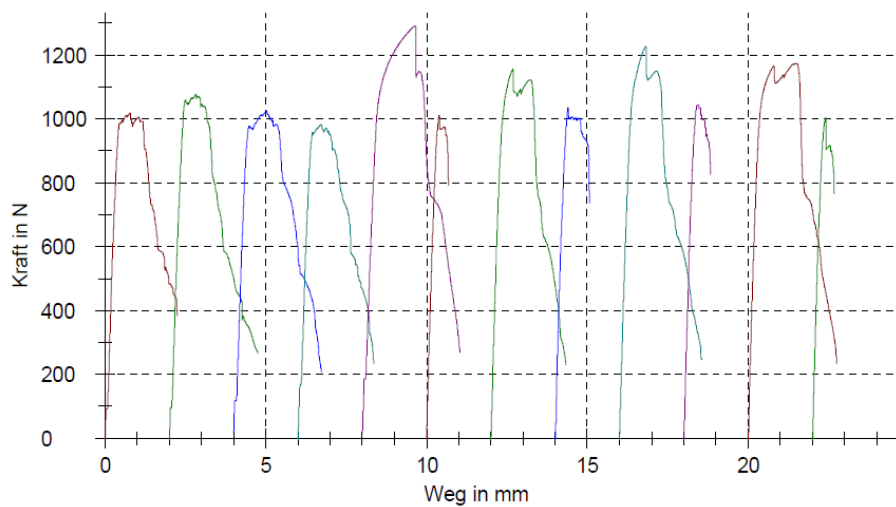
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 6/1 - 6/12
 Benennung : Dünnblechverbindung CuSn6-Cu(Ni) US
 (Hauptversuch)
 Prüfer : Mucic
 Datum : 27.11.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	17 mm	1017,1	64
	2	17 mm	1077,1	64
	3	17 mm	1023,8	64
	4	17 mm	981,9	64
	5	17 mm	1289,9	64
	6	17 mm	1011,1	64
	7	17 mm	1155,5	64
	8	17 mm	1034,5	64
	9	17 mm	1227,8	64
	10	17 mm	1044,3	64
	11	17 mm	1173,4	64
	12	17 mm	1002,8	64

Seriengrafik:



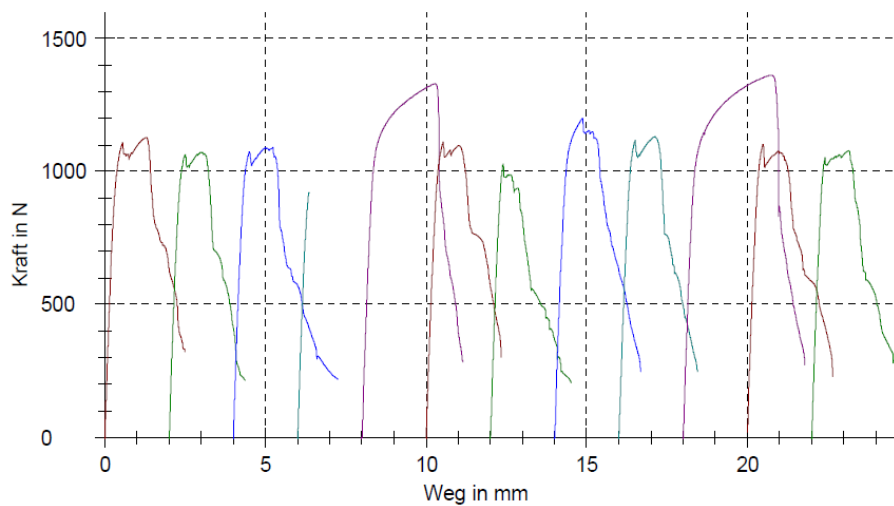
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 6/13 - 6/24
 Benennung : Dünnblechverbindung CuSn6-Cu(Ni) US
 (Hauptversuch)
 Prüfer : Mucic
 Datum : 27.11.2009
 Prüfungsgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Breite	F max N	S0 mm ²
	13	17 mm	1126,6	64
	14	17 mm	1072,4	64
	15	17 mm	1089,5	64
	16	17 mm	921,1	64
	17	17 mm	1329,8	64
	18	17 mm	1111,4	64
	19	17 mm	1027,7	64
	20	17 mm	1200,5	64
	21	17 mm	1130,0	64
	22	17 mm	1361,2	64
	23	17 mm	1101,2	64
	24	17 mm	1077,9	64

Seriengrafik:



11.2.6 Zugversuche des Bestätigungsversuchs für das Ultraschallschweißen (Al-Al)

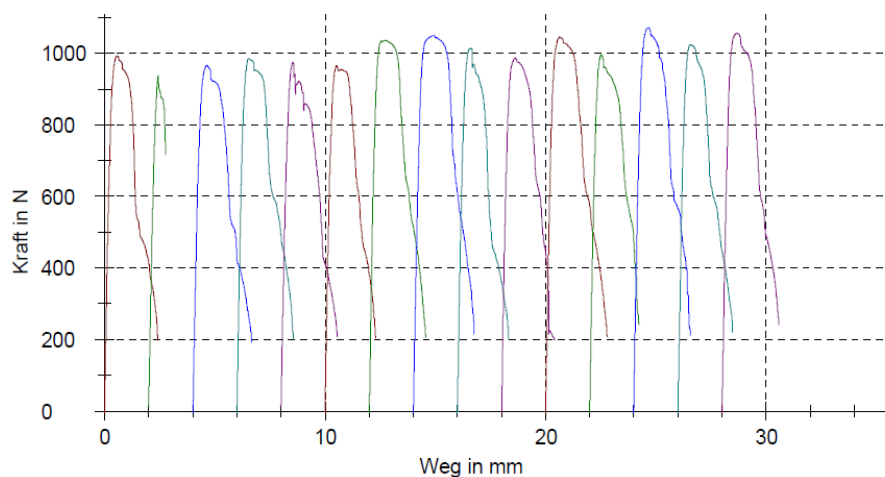
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung K1 - K15
 Benennung : Dünnblechverbindungen AL - AL US
 (Bestätigungsversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 11.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	K1	8 mm	993,1
	2	K2	8 mm	938,1
	3	K3	8 mm	966,5
	4	K4	8 mm	985,4
	5	K5	8 mm	975,0
	6	K6	8 mm	966,2
	7	K7	8 mm	1036,1
	8	K8	8 mm	1050,3
	9	K9	8 mm	1013,7
	10	K10	8 mm	986,8
	11	K11	8 mm	1045,4
	12	K12	8 mm	995,3
	13	K13	8 mm	1071,7
	14	K14	8 mm	1024,5
	15	K15	8 mm	1055,8

Seriengrafik:



11.2.7 Zugversuche des Bestätigungsversuchs für das Ultraschallschweißen (CuSn6-Cu(Ni))

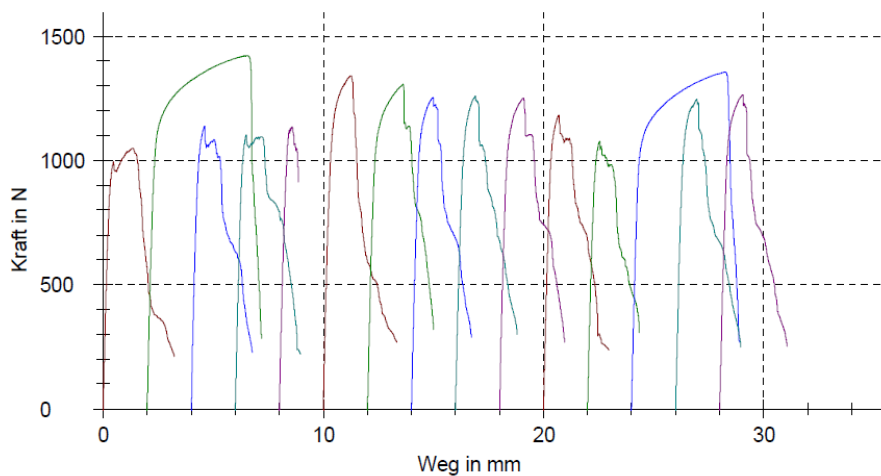
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung K16 - K30
 Benennung : Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Vidovic
 Datum : 11.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten : 10SN3A WN:157542
 Traversenwegaufnehmer WN:157542
 Kraftsensor ID:0 WN:147774 10 kN

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	K16	8 mm	1049,2
	2	K17	8 mm	1422,6
	3	K18	8 mm	1139,1
	4	K19	8 mm	1102,4
	5	K20	8 mm	1134,7
	6	K21	8 mm	1339,2
	7	K22	8 mm	1306,5
	8	K23	8 mm	1254,5
	9	K24	8 mm	1259,1
	10	K25	8 mm	1252,0
	11	K26	8 mm	1182,3
	12	K27	8 mm	1076,3
	13	K28	8 mm	1355,8
	14	K29	8 mm	1248,2
	15	K30	8 mm	1264,9

Seriengrafik:



11.2.8 Zugversuche des Screeningversuchs für das Laserschweißen (Al-Al)

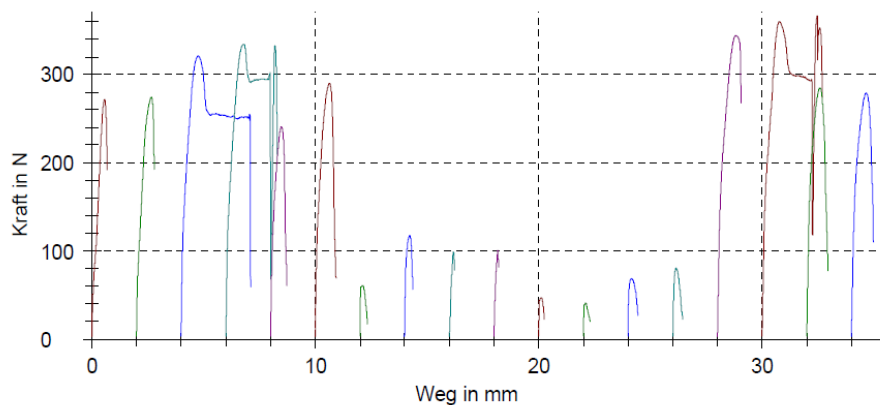
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung ZL 1/1 - ZR 1/11
 Benennung : Dünnblechverbindungen Al-Al LS (Vorversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 29.10.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	ZL 1/1	8 mm	271,5	4
	2	ZR 1/1	8 mm	274,2	4
	3	ZL 1/3	8 mm	321,0	4
	4	ZR 1/3	8 mm	334,1	4
	5	ZL 1/4	8 mm	240,9	4
	6	ZR 1/4	8 mm	289,9	4
	7	ZL 1/5	8 mm	60,9	4
	8	ZR 1/5	8 mm	117,7	4
	9	ZL 1/7	8 mm	99,0	4
	10	ZR 1/7	8 mm	100,7	4
	11	ZL 1/8	8 mm	47,1	4
	12	ZR 1/8	8 mm	40,9	4
	13	ZL 1/9	8 mm	68,5	4
	14	ZR 1/9	8 mm	80,7	4
	15	ZL 1/10	8 mm	344,0	4
	16	ZR 1/10	8 mm	366,3	4
	17	ZL 1/11	8 mm	284,8	4
	18	ZR 1/11	8 mm	278,9	4

Seriengrafik:



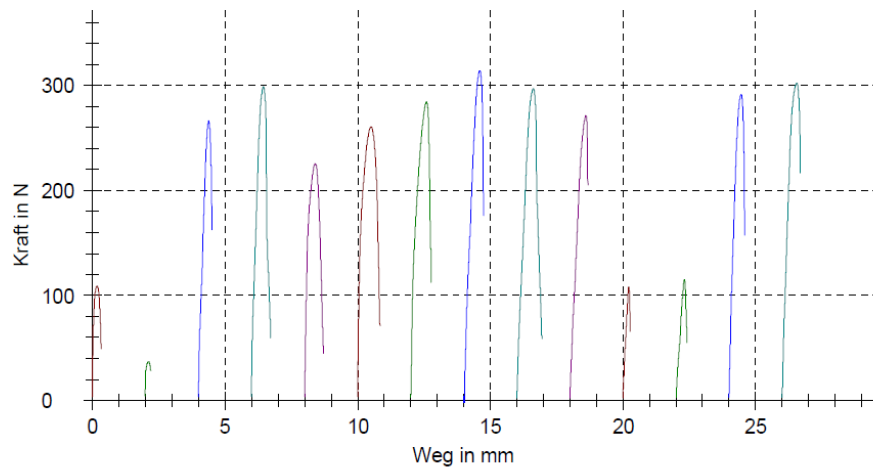
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung ZL 1/12 - ZR 1/21
 Benennung : Dünnblechverbindungen Al-Al LS (Vorversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 29.10.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	ZL 1/12	8 mm	109,1	4
	2	ZR 1/12	8 mm	37,1	4
	3	ZL 1/13	8 mm	266,3	4
	4	ZR 1/13	8 mm	298,9	4
	5	ZL 1/15	8 mm	225,7	4
	6	ZR 1/15	8 mm	260,6	4
	7	ZL 1/16	8 mm	284,9	4
	8	ZR 1/16	8 mm	314,5	4
	9	ZL 1/19	8 mm	297,4	4
	10	ZR 1/19	8 mm	271,7	4
	11	ZL 1/20	8 mm	107,9	4
	12	ZR 1/20	8 mm	115,2	4
	13	ZL 1/21	8 mm	291,7	4
	14	ZR 1/21	8 mm	302,6	4

Seriengrafik:



11.2.9 Zugversuche des Screeningversuchs für das Laserschweißen (CuSn6-Cu(Ni))



Werkstofftechnik

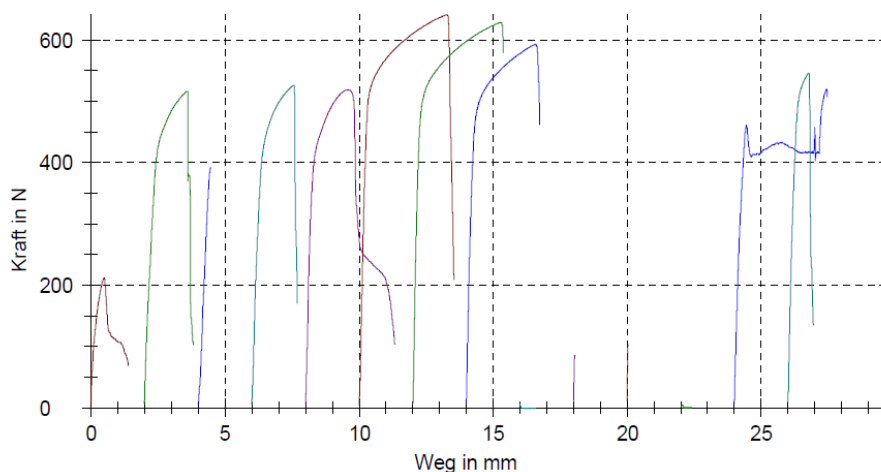
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung ZL 3/1 - ZR 3/10
 Benennung : Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni) LS
 (Vorversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 29.10.2009
 Prüfungsgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	ZL 3/1	8 mm	212,2	3,2
	2	ZR 3/1	8 mm	516,2	3,2
	3	ZL 3/3	8 mm	391,6	3,2
	4	ZR 3/3	8 mm	525,9	3,2
	5	ZL 3/5	8 mm	518,4	3,2
	6	ZR 3/5	8 mm	641,1	3,2
	7	ZL 3/7	8 mm	628,3	3,2
	8	ZR 3/7	8 mm	592,4	3,2
	9	ZL 3/8	8 mm	5,2	3,2
	10	ZR 3/8	8 mm	85,5	3,2
	11	ZL 3/9	8 mm	102,2	3,2
	12	ZR 3/9	8 mm	4,3	3,2
	13	ZL 3/10	8 mm	519,5	3,2
	14	ZR 3/10	8 mm	545,7	3,2

Seriengrafik:



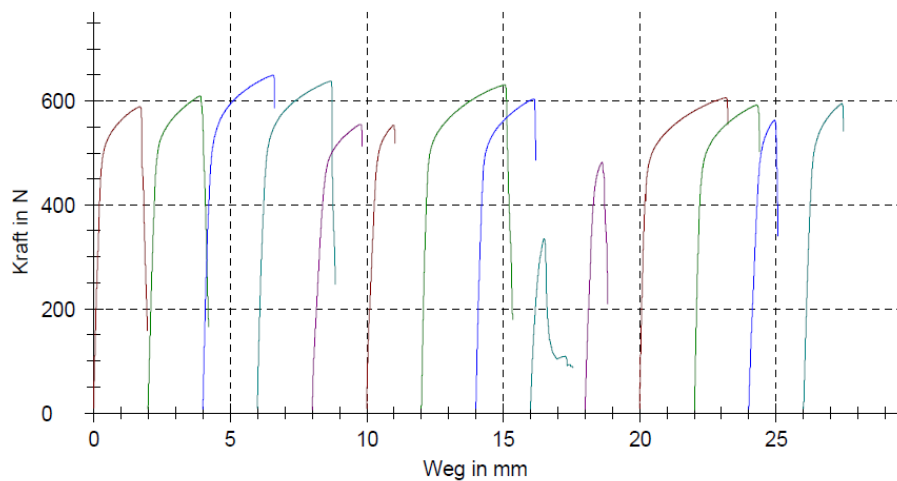
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung ZL 3/11 - ZR 3/21
 Benennung : Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni) LS
 (Vorversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 29.10.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	ZL 3/11	8 mm	588,8	3,2
	2	ZR 3/11	8 mm	609,1	3,2
	3	ZL 3/12	8 mm	649,1	3,2
	4	ZR 3/12	8 mm	637,4	3,2
	5	ZL 3/13	8 mm	554,9	3,2
	6	ZR 3/13	8 mm	552,8	3,2
	7	ZL 3/15	8 mm	631,0	3,2
	8	ZR 3/15	8 mm	603,8	3,2
	9	ZL 3/19	8 mm	334,8	3,2
	10	ZR 3/19	8 mm	481,8	3,2
	11	ZL 3/20	8 mm	606,0	3,2
	12	ZR 3/20	8 mm	591,8	3,2
	13	ZL 3/21	8 mm	562,5	3,2
	14	ZR 3/21	8 mm	594,4	3,2

Seriengrafik:



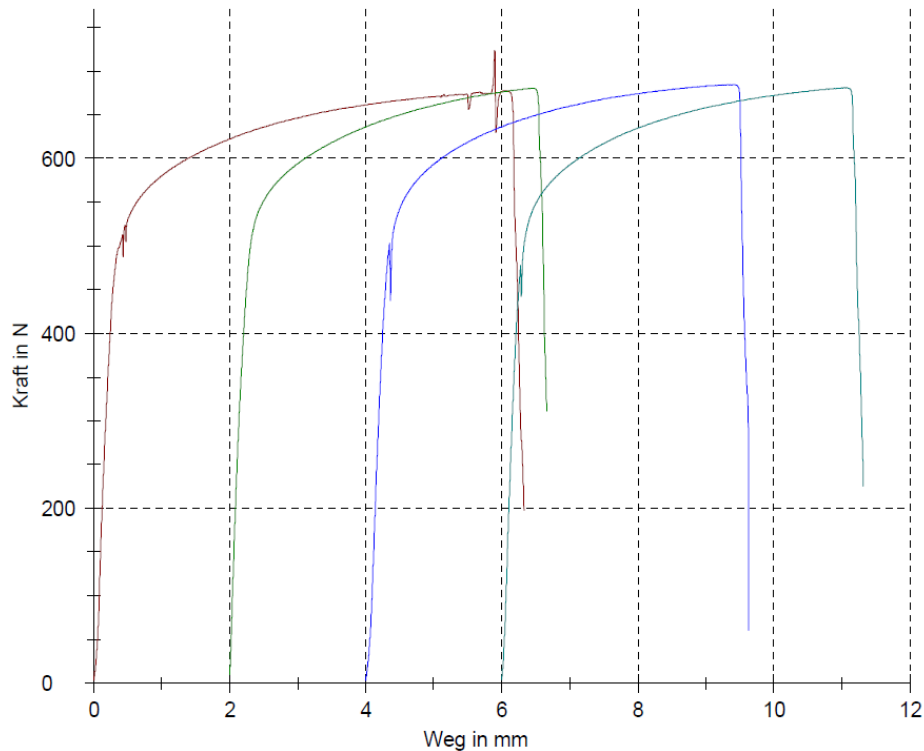
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung ZR 3/4,ZL 3/4,ZR 3/16,ZL 3/16
 Benennung : Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni) LS
 (Vorversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 13.11.2009
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N	S0 mm ²
	1	ZR 3/4	8 mm	723,5	3,2
	2	ZL 3/4	8 mm	680,3	3,2
	3	ZR 3/16	8 mm	684,3	3,2
	4	ZL 3/16	8 mm	680,8	3,2

Seriengrafik:



11.2.10 Zugversuche des Hauptversuches für das Laserschweißen (Al-Al)

Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

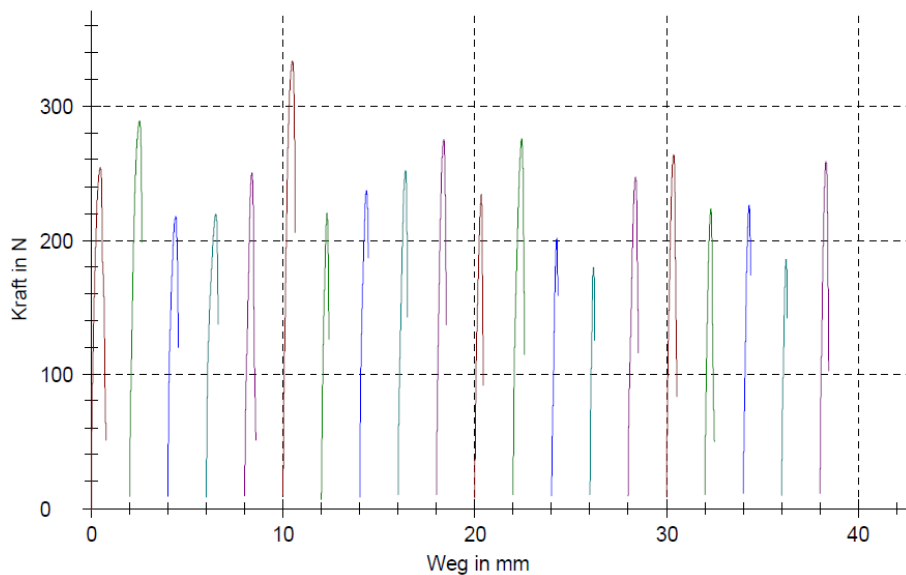
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 5-1 ZR - 5-10 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen AL-AL LS (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 18.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
1	1	5-1 ZR	8 mm	254,1
2	2	5-1 ZL	8 mm	289,2
3	3	5-2 ZR	8 mm	217,8
4	4	5-2 ZL	8 mm	219,3
5	5	5-3 ZR	8 mm	250,1
6	6	5-3 ZL	8 mm	333,6
7	7	5-4 ZR	8 mm	220,4
8	8	5-4 ZL	8 mm	237,0
9	9	5-5 ZR	8 mm	251,9
10	10	5-5 ZL	8 mm	275,1

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
11	11	5-6 ZR	8 mm	234,0
12	12	5-6 ZL	8 mm	275,8
13	13	5-7 ZR	8 mm	201,4
14	14	5-7 ZL	8 mm	179,9
15	15	5-8 ZR	8 mm	247,1
16	16	5-8 ZL	8 mm	263,7
17	17	5-9 ZR	8 mm	223,3
18	18	5-9 ZL	8 mm	226,1
19	19	5-10 ZR	8 mm	185,5
20	20	5-10 ZL	8 mm	258,6

Seriengrafik:



Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

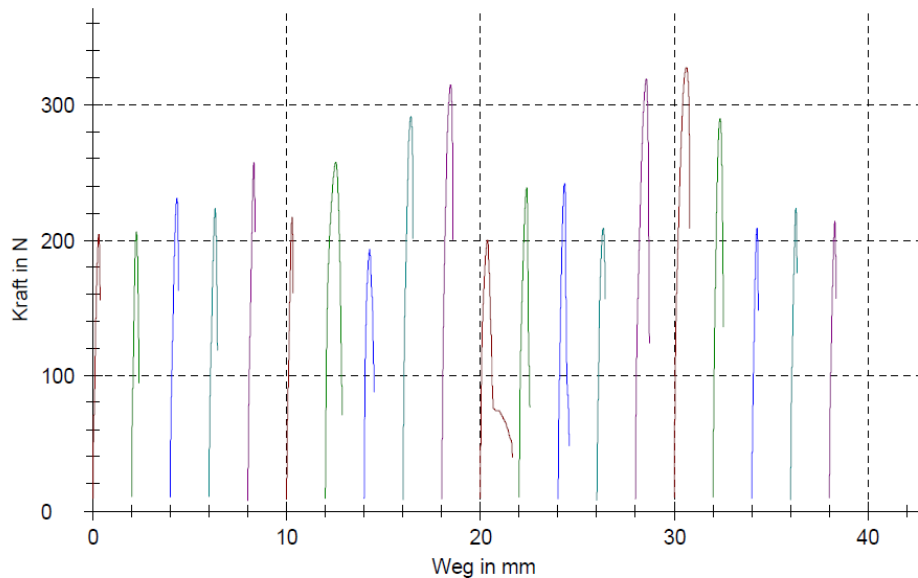
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 5-11 ZR - 5-20 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen AL-AL LS (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 18.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	5-11 ZR	8 mm	204,3
	2	5-11 ZL	8 mm	206,2
	3	5-12 ZR	8 mm	230,9
	4	5-12 ZL	8 mm	223,3
	5	5-13 ZR	8 mm	257,6
	6	5-13 ZL	8 mm	216,9
	7	5-14 ZR	8 mm	257,3
	8	5-14 ZL	8 mm	193,1
	9	5-15 ZR	8 mm	291,2
	10	5-15 ZL	8 mm	314,4

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	11	5-16 ZR	8 mm	199,9
	12	5-16 ZL	8 mm	238,9
	13	5-17 ZR	8 mm	242,0
	14	5-17 ZL	8 mm	208,9
	15	5-18 ZR	8 mm	319,1
	16	5-18 ZL	8 mm	327,7
	17	5-19 ZR	8 mm	289,6
	18	5-19 ZL	8 mm	208,6
	19	5-20 ZR	8 mm	223,4
	20	5-20 ZL	8 mm	214,1

Seriengrafik:



Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

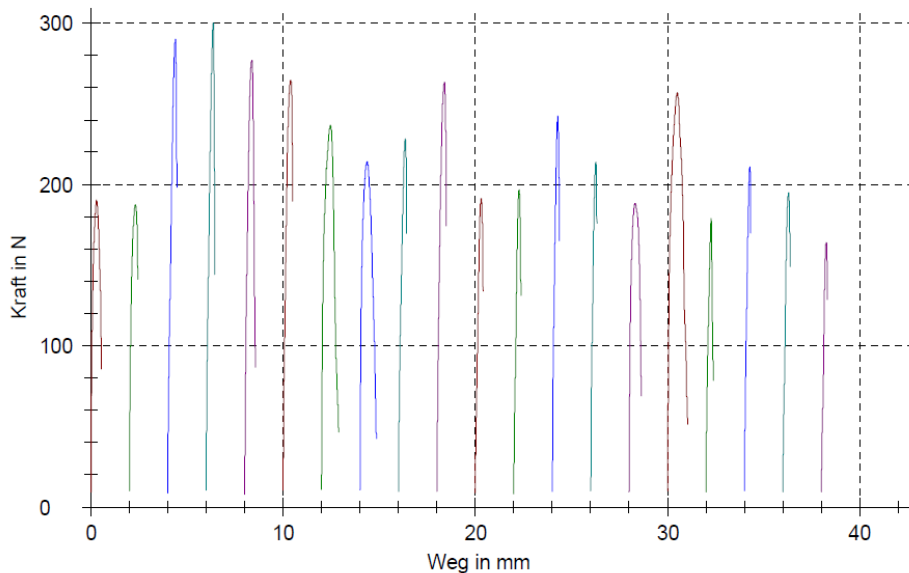
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 5-21 ZR - 5-30 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen AL-AL LS (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 18.01.2010
 Prüfungsgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	5-21 ZR	8 mm	190,1
	2	5-21 ZL	8 mm	187,3
	3	5-22 ZR	8 mm	290,2
	4	5-22 ZL	8 mm	299,8
	5	5-23 ZR	8 mm	277,2
	6	5-23 ZL	8 mm	264,8
	7	5-24 ZR	8 mm	236,7
	8	5-24 ZL	8 mm	214,2
	9	5-25 ZR	8 mm	228,3
	10	5-25 ZL	8 mm	263,4

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	11	5-26 ZR	8 mm	191,1
	12	5-26 ZL	8 mm	196,5
	13	5-27 ZR	8 mm	242,3
	14	5-27 ZL	8 mm	213,7
	15	5-28 ZR	8 mm	188,2
	16	5-28 ZL	8 mm	257,0
	17	5-29ZR	8 mm	178,6
	18	5-29ZL	8 mm	210,6
	19	5-30ZR	8 mm	195,0
	20	5-30ZL	8 mm	164,1

Seriengrafik:



11.2.11 Zugversuche des Hauptversuches für das Laserschweißen (CuSn6-Cu(Ni))

Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

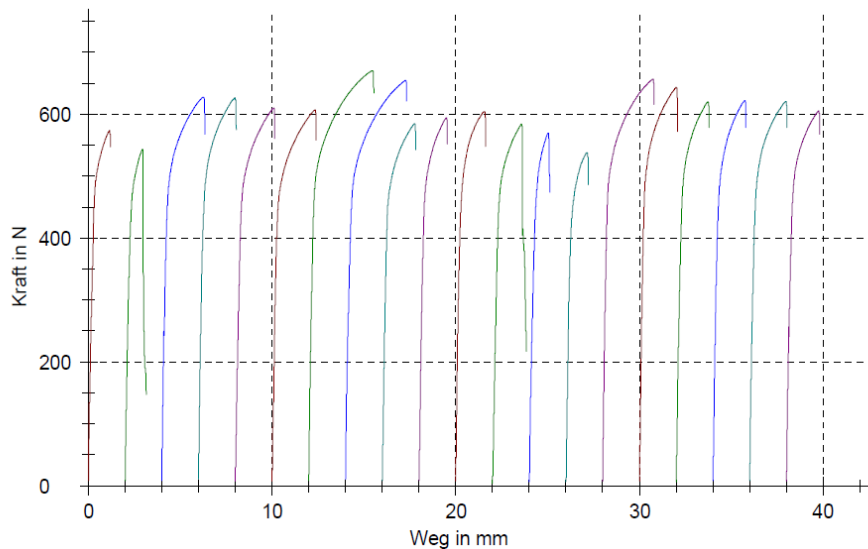
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 6-1 ZR - 6-10 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen Cu(Ni)-CuSn6 LS
 (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 19.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	6-1 ZR	8 mm	574,2
	2	6-1 ZL	8 mm	544,0
	3	6-2 ZR	8 mm	628,4
	4	6-2 ZL	8 mm	627,2
	5	6-3 ZR	8 mm	610,2
	6	6-3 ZL	8 mm	607,4
	7	6-4 ZR	8 mm	670,8
	8	6-4 ZL	8 mm	655,1
	9	6-5 ZR	8 mm	585,3
	10	6-5 ZL	8 mm	595,1

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	11	6-6 ZR	8 mm	605,0
	12	6-6 ZL	8 mm	585,0
	13	6-7 ZR	8 mm	570,0
	14	6-7 ZL	8 mm	538,7
	15	6-8 ZR	8 mm	656,9
	16	6-8 ZL	8 mm	643,8
	17	6-9 ZR	8 mm	620,4
	18	6-9 ZL	8 mm	622,6
	19	6-10 ZR	8 mm	621,2
	20	6-10 ZL	8 mm	606,0

Seriengrafik:



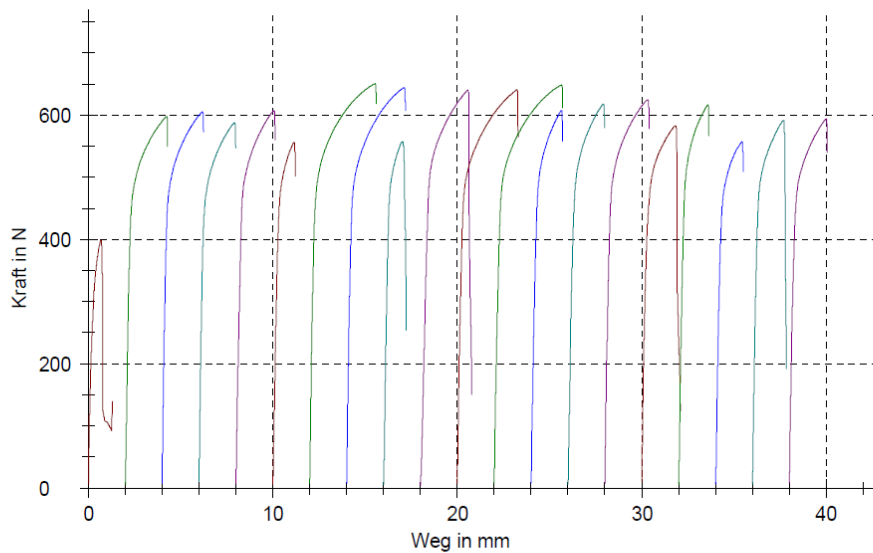
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 6-11 ZR - 6-20 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen Cu(Ni)-CuSn6 LS
 (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 19.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N	Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	6-11 ZR	8 mm	398,8		11	6-16 ZR	8 mm	641,1
	2	6-11 MR	8 mm	598,3		12	6-16 ZL	8 mm	649,2
	3	6-12 ZR	8 mm	605,8		13	6-17 ZR	8 mm	608,1
	4	6-12 ZL	8 mm	588,4		14	6-17 ZL	8 mm	618,3
	5	6-13 ZR	8 mm	607,8		15	6-18 ZR	8 mm	625,6
	6	6-13 ZL	8 mm	556,6		16	6-18 ZL	8 mm	583,5
	7	6-14 ZR	8 mm	651,0		17	6-19 ZR	8 mm	617,2
	8	6-14 ZL	8 mm	644,7		18	6-19 ZL	8 mm	557,9
	9	6-15 ZR	8 mm	558,1		19	6-20 ZR	8 mm	592,5
	10	6-15 ZL	8 mm	640,8		20	6-20 ZL	8 mm	594,6

Seriengrafik:



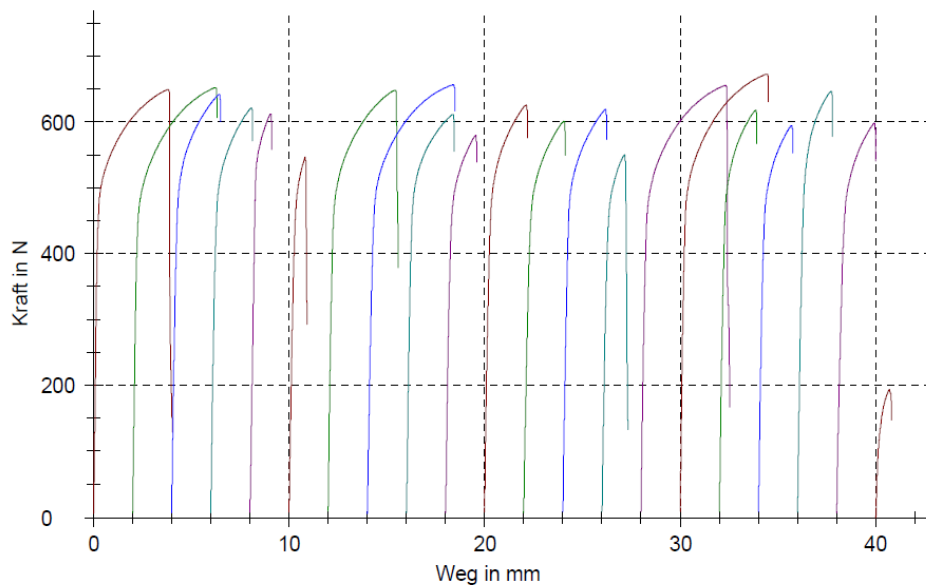
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 6-21 ZR - 6-30 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen AL-AL LS (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 20.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	6-21 ZR	8 mm	649,8
	2	6-21 ZL	8 mm	652,4
	3	6-22 ZR	8 mm	642,3
	4	6-22 ZL	8 mm	621,9
	5	6-23 ZR	8 mm	612,9
	6	6-23 ZL	8 mm	546,6
	7	6-24 ZR	8 mm	649,0
	8	6-24 ZL	8 mm	656,9
	9	6-25 ZR	8 mm	611,8
	10	6-25 ZL	8 mm	580,3
	11	6-26 ZR	8 mm	626,1
	12	6-26 ZL	8 mm	601,0
	13	6-27 ZR	8 mm	619,5
	14	6-27 ZL	8 mm	550,8
	15	6-28 ZR	8 mm	655,9
	16	6-28 ZL	8 mm	673,0
	17	6-29 ZR	8 mm	618,1
	18	6-29 ZL	8 mm	595,2
	19	6-30 MR	8 mm	647,1
	20	6-30 ZR	8 mm	598,8
	21	6-30 ZL	8 mm	194,1

Seriengrafik:



Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

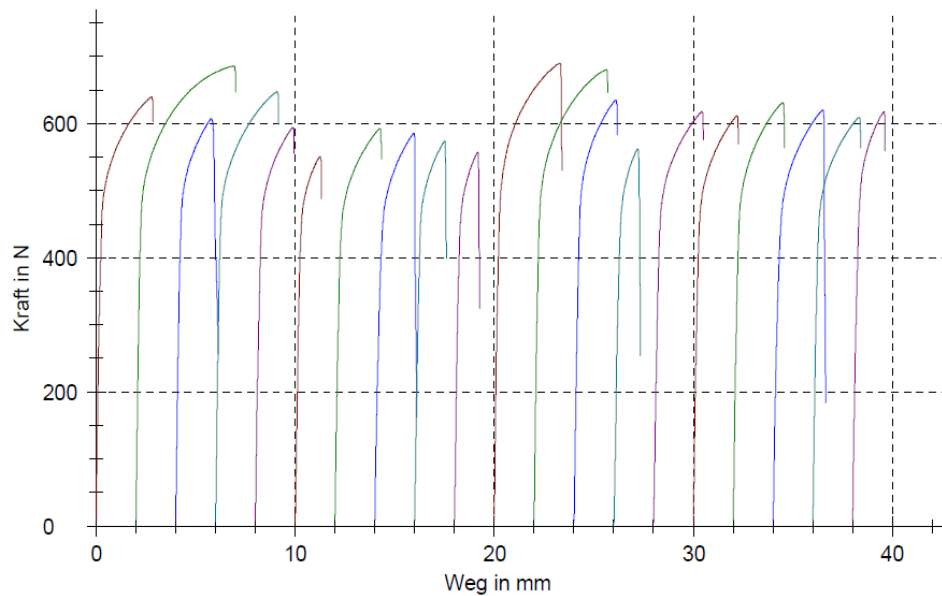
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 6-31 ZR - 6-40 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen Cu(Ni)-CuSn6 LS
 (Hauptversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 20.01.2010
 Prüfungsgeschwindigkeit: 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	6-31 ZR	8 mm	640,4
	2	6-31 ZL	8 mm	686,6
	3	6-32 ZR	8 mm	607,9
	4	6-32 ZL	8 mm	648,2
	5	6-33 ZR	8 mm	595,1
	6	6-33 ZL	8 mm	551,6
	7	6-34 ZR	8 mm	593,3
	8	6-34 ZL	8 mm	586,0
	9	6-35 ZR	8 mm	574,7
	10	6-35 ZL	8 mm	557,8

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	11	6-36 ZR	8 mm	690,7
	12	6-36 ZL	8 mm	681,1
	13	6-37 ZR	8 mm	635,8
	14	6-37 ZL	8 mm	562,5
	15	6-38 ZR	8 mm	618,4
	16	6-38 ZL	8 mm	612,0
	17	6-39 ZR	8 mm	631,5
	18	6-39 ZL	8 mm	620,6
	19	6-40 ZR	8 mm	609,7
	20	6-40 ZL	8 mm	618,2

Seriengrafik:



11.2.12 Zugversuche des Bestätigungsversuches für das Laserschweißen (Al-Al)

Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

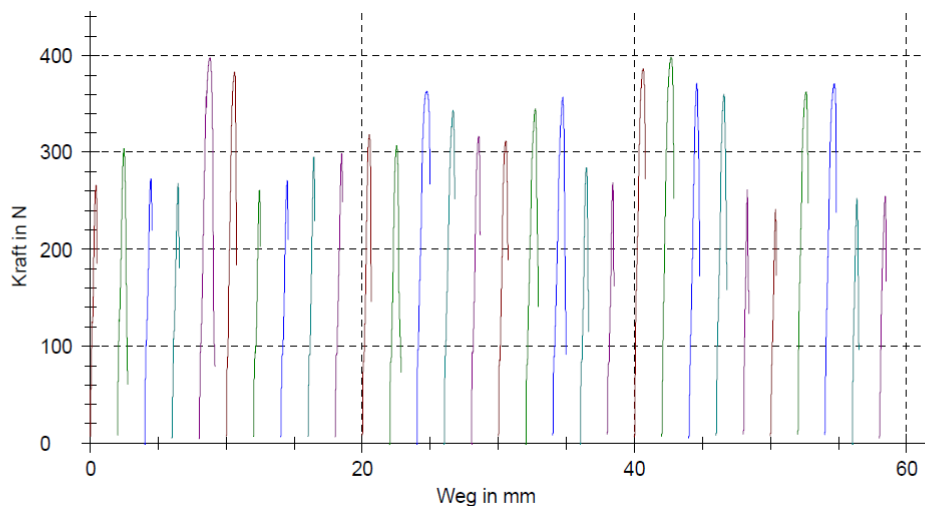
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung K1 ZR - K15 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen Al-Al LS
 (Bestätigungsversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 23.03.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	K1 ZR	8 mm	266,4
	2	K1 ZL	8 mm	304,0
	3	K2 ZR	8 mm	273,0
	4	K2 ZL	8 mm	268,2
	5	K3 ZR	8 mm	397,6
	6	K3 ZL	8 mm	382,6
	7	K4 ZR	8 mm	261,1
	8	K4 ZL	8 mm	270,9
	9	K5 ZR	8 mm	295,2
	10	K5 ZL	8 mm	298,7
	11	K6 ZR	8 mm	318,5
	12	K6 ZL	8 mm	306,7
	13	K7 ZR	8 mm	363,1
	14	K7 ZL	8 mm	343,3
	15	K8 ZR	8 mm	316,7

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	16	K8 ZL	8 mm	311,6
	17	K9 ZR	8 mm	344,8
	18	K9 ZL	8 mm	356,9
	19	K10 ZR	8 mm	284,0
	20	K10 ZL	8 mm	268,4
	21	K11 ZR	8 mm	386,5
	22	K11 ZL	8 mm	398,1
	23	K12 ZR	8 mm	371,2
	24	K12 ZL	8 mm	360,0
	25	K13 ZR	8 mm	261,2
	26	K13 ZL	8 mm	241,2
	27	K14 ZR	8 mm	362,4
	28	K14 ZL	8 mm	371,1
	29	K15 ZR	8 mm	252,4
	30	K15 ZL	8 mm	255,2

Seriengrafik:



11.2.13 Zugversuche des Bestätigungsversuches für das Laserschweißen (CuSn6-Cu(Ni))

Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

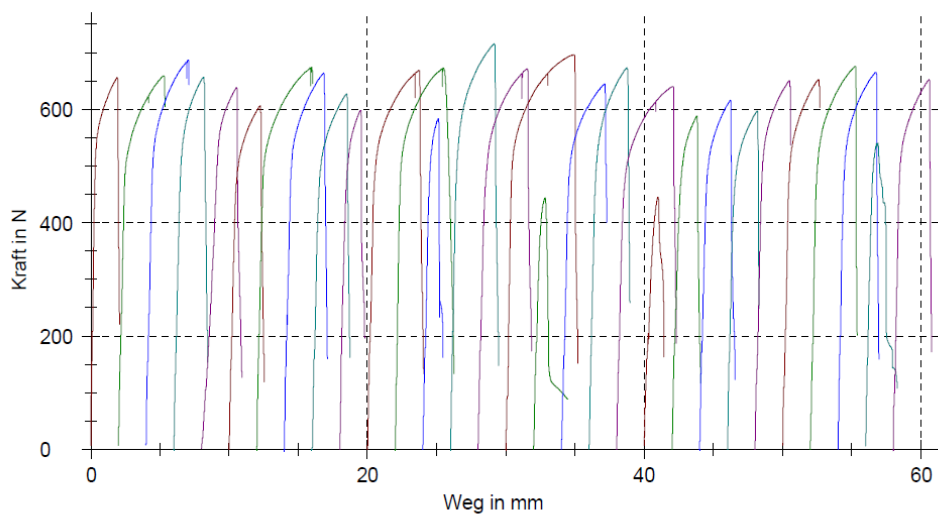
Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung K16 ZR - K30 ZL
 Benennung : Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni) LS
 (Bestätigungsversuch)
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 23.03.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	K16 ZR	8 mm	655,7
	2	K16 ZL	8 mm	659,1
	3	K17 ZR	8 mm	686,7
	4	K17 ZL	8 mm	657,2
	5	K18 ZR	8 mm	638,1
	6	K18 ZL	8 mm	606,2
	7	K19 ZR	8 mm	673,9
	8	K19 ZL	8 mm	663,6
	9	K20 ZR	8 mm	627,0
	10	K20 ZL	8 mm	598,4
	11	K21 ZR	8 mm	668,6
	12	K21 ZL	8 mm	672,7
	13	K22 ZR	8 mm	583,3
	14	K22 ZL	8 mm	715,2
	15	K23 ZR	8 mm	671,6

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	16	K23 ZL	8 mm	696,2
	17	K24 ZR	8 mm	443,4
	18	K24 ZL	8 mm	644,7
	19	K25 ZR	8 mm	673,1
	20	K25 ZL	8 mm	640,6
	21	K26 ZR	8 mm	445,1
	22	K26 ZL	8 mm	588,1
	23	K27 ZR	8 mm	616,0
	24	K27 ZL	8 mm	597,1
	25	K28 ZR	8 mm	650,2
	26	K28 ZL	8 mm	652,4
	27	K29 ZR	8 mm	675,4
	28	K29 ZL	8 mm	665,4
	29	K30 ZR	8 mm	540,7
	30	K30 ZL	8 mm	652,2

Seriengrafik:



11.2.14 Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Spalt - (Al-Al)

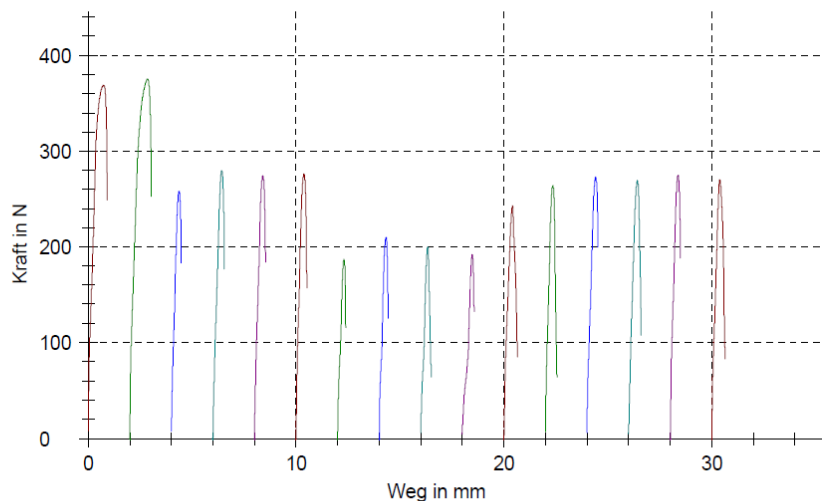
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 1ZR-12ZL
 Benennung : Spalt -Dünnblechverbindungen Al-Al LS
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 22.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	1 ZR	8 mm	368,9
	2	1 ZL	8 mm	375,1
	3	2 ZR	8 mm	258,1
	4	2 ZL	8 mm	279,6
	5	3 ZR	8 mm	274,4
	6	3 ZL	8 mm	276,4
	7	6 ZR	8 mm	186,9
	8	6 ZL	8 mm	209,7
	9	7 ZR	8 mm	200,1
	10	7 ZL	8 mm	191,7
	11	10 ZR	8 mm	243,1
	12	10 ZL	8 mm	264,0
	13	11 ZR	8 mm	272,9
	14	11 ZL	8 mm	269,3
	15	12 ZR	8 mm	275,0
	16	12 ZL	8 mm	270,3

Seriengrafik:



11.2.15 Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Spalt - (CuSn6-Cu(Ni))

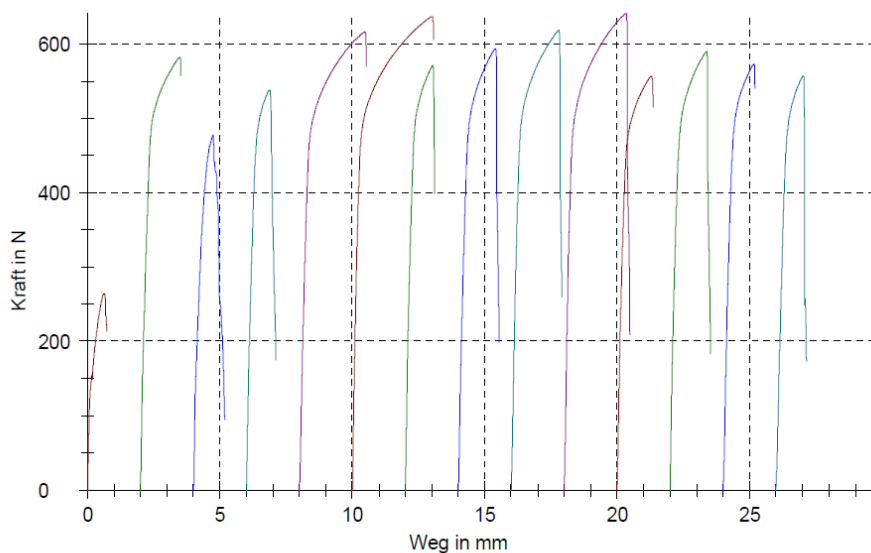
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung 1ZR-9ZL
 Benennung : Spalt -Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni) LS
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 22.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	1 ZR	8 mm	264,5
	2	1 ZL	8 mm	582,4
	3	2 ZR	8 mm	477,9
	4	2 ZL	8 mm	538,6
	5	4 ZR	8 mm	616,6
	6	4 ZL	8 mm	637,3
	7	6 ZR	8 mm	571,3
	8	6 ZL	8 mm	594,1
	9	7 ZR	8 mm	618,9
	10	7 ZL	8 mm	641,4
	11	8 ZR	8 mm	557,0
	12	8 ZL	8 mm	590,1
	13	9 ZR	8 mm	573,0
	14	9 ZL	8 mm	557,2

Seriengrafik:



11.2.16 Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Step - (Al-Al)



Werkstofftechnik

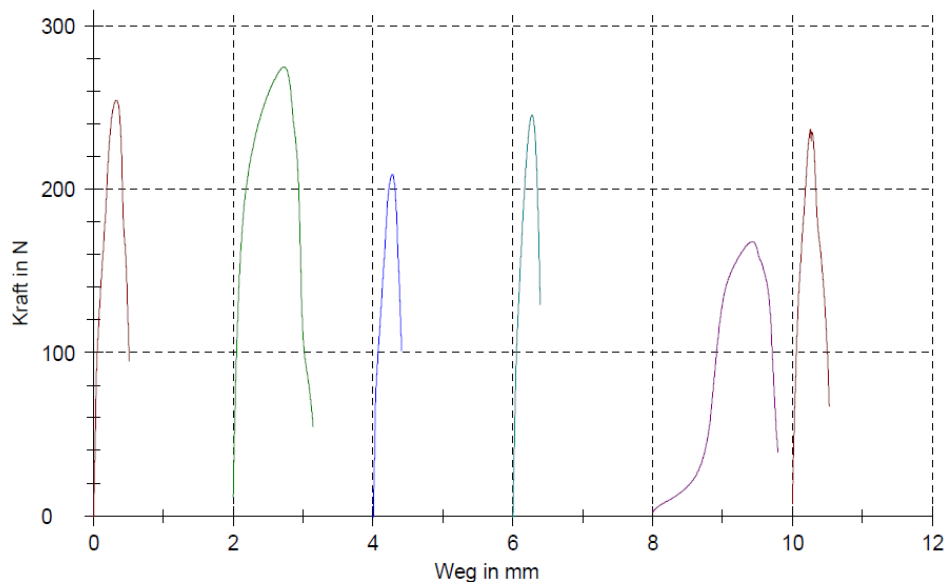
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung S 1R- S 3L
 Benennung : Step -Dünnblechverbindungen Al-Al LS
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 22.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	S 1R	8 mm	254,5
	2	S 1L	8 mm	274,9
	3	S 2R	8 mm	208,9
	4	S 2L	8 mm	245,3
	5	S 3R	8 mm	167,8
	6	S 3L	8 mm	236,6

Seriengrafik:



11.2.17 Zugversuche der weiteren Untersuchungen für das Laserschweißen Step - (CuSn6-Cu(Ni))



Werkstofftechnik

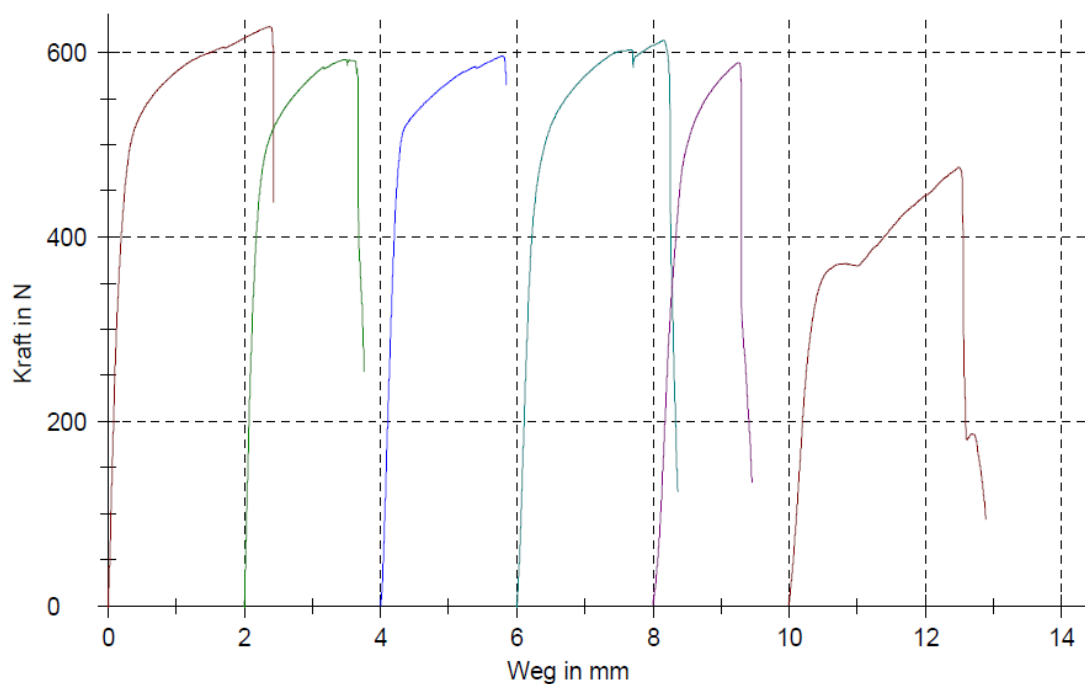
Prüfung auf Universalprüfmaschine nach AA-QW-121

Prüfberichtsnummer: WT15539
 Prüfung : Zugprüfung S 1R- S 3L
 Benennung : Step -Dünnblechverbindungen CuSn6-Cu(Ni) LS
 Spannlänge : 40 mm
 Prüfer : Mucic
 Datum : 22.01.2010
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min
 Maschinendaten :

Ergebnisse:

Legende	Nr	Bezeichnung	Breite	F max N
	1	S 1R	8 mm	628,2
	2	S 1L	8 mm	592,1
	3	S 2R	8 mm	596,0
	4	S 2L	8 mm	613,2
	5	S 3R	8 mm	589,1
	6	S 3L	8 mm	475,7

Seriengrafik:

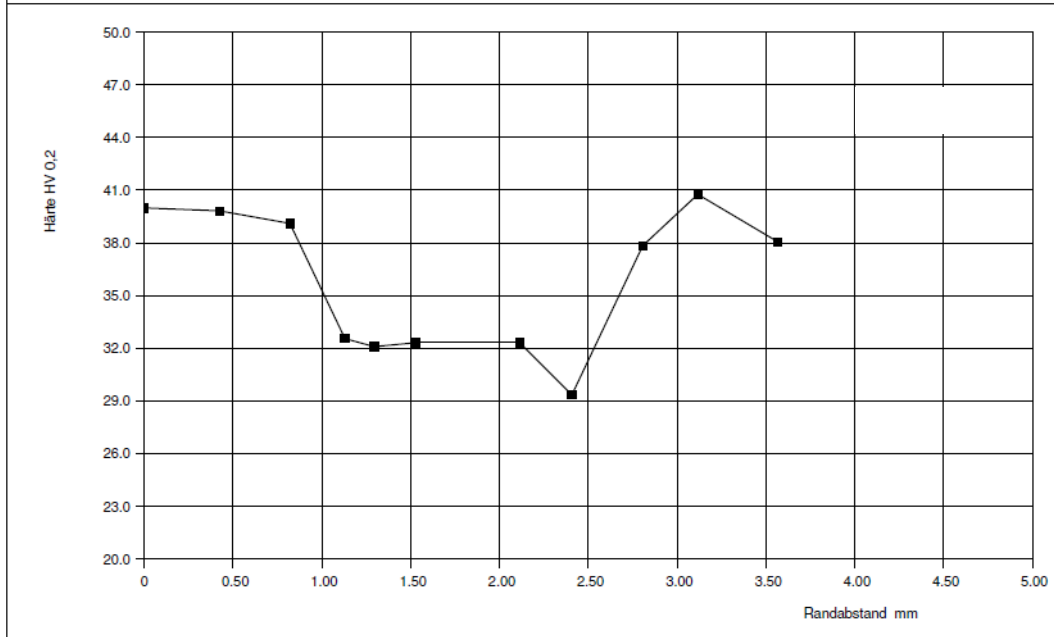


11.3 Härteprüfung

11.3.1 Probe:1/14MR

Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Werkstofftechnik		Härteprüfung n.AA-QW-109
		Datum : 21.01.2010
Prüfverfahren Verlauf / HV 0,2 Oberfläche / HV 10 Kern / HV 10		Einwirkdauer in sec 10
:		:
Prüfberichtsnummer : WT15539 Benennung : Laserschweissung 1/10R Teilenummer : - Werkstoff : Al-Al Sollwert - EHT/Grenzhärte : - Sollwert - Oberflächenhärte : Härteverlauf Sollwert - Kernhärte : - Prüfer : Mucic Datum : 21.01.2010		

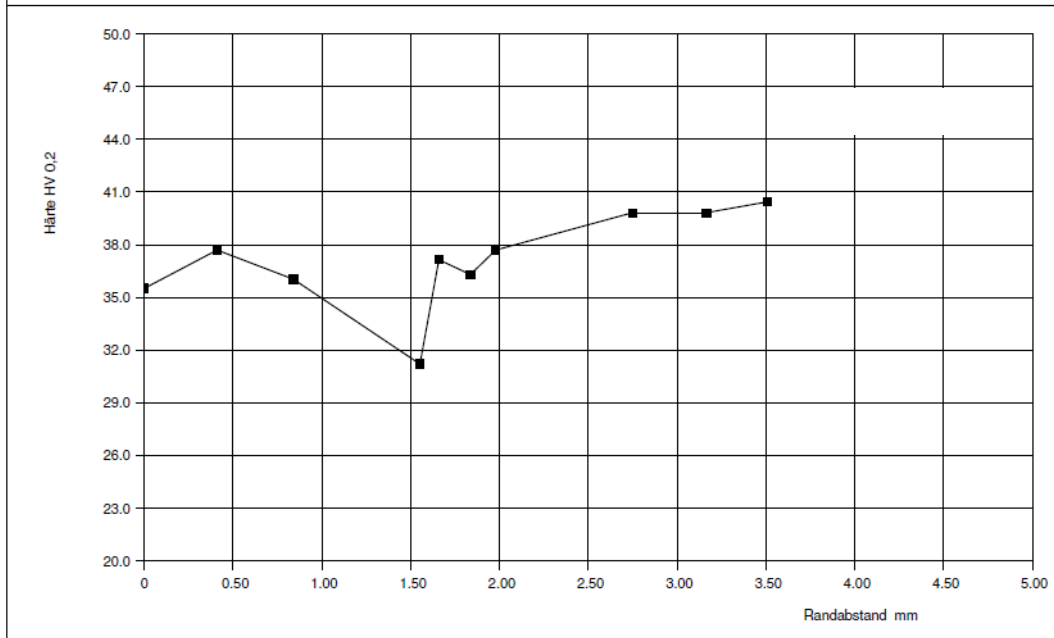
Nr.	Randabst. Härte		Nr.	Randabst. Härte		Nr.	Randabst. Härte		Nr.	Oberfl.-Härte		Nr.	Kern-Härte	
	mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		HV 10	HV 10			
1		40.0	16			31			1			1		
2	0.4240	39.8	17			32			2			2		
3	0.8190	39.1	18			33			3			3		
4	1.1290	32.6	19			34			4			4		
5	1.2940	32.1	20			35			5			5		
6	1.5260	32.3	21			36			6			6		
7	2.1130	32.3	22			37			7			7		
8	2.4070	29.4	23			38			8			8		
9	2.8060	37.8	24			39			9			9		
10	3.1150	40.8	25			40			10			10		
11	3.5670	38.1	26			41			11			11		
12			27			42			12			12		
13			28			43			13			13		
14			29			44			14			14		
15			30			45			15			15		
									Xm			Xm		



11.3.2 Probe 1/8MR

Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Werkstofftechnik		Härteprüfung n.AA-QW-109
		Datum : 21.01.2010
Prüfverfahren Verlauf / HV 0,2 Oberfläche / HV 10 Kern / HV 0,2		Einwirkdauer in sec 10
:	:	:
Prüfberichtsnummer : WT15539 Benennung : Laserschweissung 1/11MR Teilenummer : - Werkstoff : Al-Al Sollwert - EHT/Grenzhärte : - Sollwert - Oberflächenhärte : Härteverlauf Sollwert - Kernhärte : - Prüfer : Mucic Datum : 21.01.2010		

■	Randabst. Härte		■	Randabst. Härte		■	Randabst. Härte		■	Oberfl.-Härte		■	Kern-Härte	
	mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		Nr.	HV 10		Nr.	HV 0,2
1		35.5	16			31			1			1		
2	0.4110	37.7	17			32			2			2		
3	0.8380	36.1	18			33			3			3		
4	1.5500	31.2	19			34			4			4		
5	1.6570	37.2	20			35			5			5		
6	1.8370	36.3	21			36			6			6		
7	1.9780	37.7	22			37			7			7		
8	2.7480	39.8	23			38			8			8		
9	3.1640	39.8	24			39			9			9		
10	3.5100	40.5	25			40			10			10		
11			26			41			11			11		
12			27			42			12			12		
13			28			43			13			13		
14			29			44			14			14		
15			30			45			15			15		
									Xm			Xm		



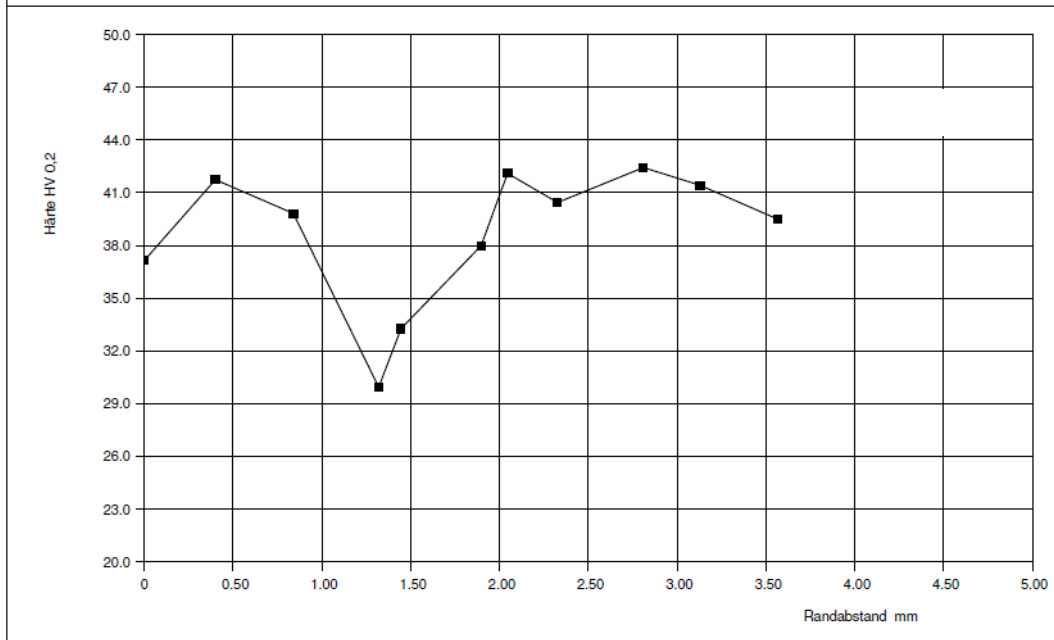
11.3.3 Probe 1/12MR

Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Werkstofftechnik		Härteprüfung n.AA-QW-109
		Datum : 21.01.2010
Prüfverfahren Verlauf / HV 0,2 Oberfläche / HV 10 Kern / HV 0,2		Einwirkdauer in sec 10
:	:	:
Prüfberichtsnummer : WT15539 Benennung : Laserschweissung 1/12R Teilenummer : - Werkstoff : Al-Al Sollwert - EHT/Grenzhärte : - Sollwert - Oberflächenhärte : Härteverlauf Sollwert - Kernhärte : - Prüfer : Mucic Datum : 21.01.2010		

Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte
	mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		mm	HV 0,2
1		37.2	16			31		
2	0.4000	41.8	17			32		
3	0.8380	39.8	18			33		
4	1.3200	30.0	19			34		
5	1.4460	33.3	20			35		
6	1.8980	38.0	21			36		
7	2.0460	42.1	22			37		
8	2.3270	40.5	23			38		
9	2.8090	42.4	24			39		
10	3.1280	41.4	25			40		
11	3.5670	39.5	26			41		
12			27			42		
13			28			43		
14			29			44		
15			30			45		

Nr.	Oberfl.-Härte
	HV 10
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
Xm	

Nr.	Kern-Härte
	HV 0,2
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
Xm	



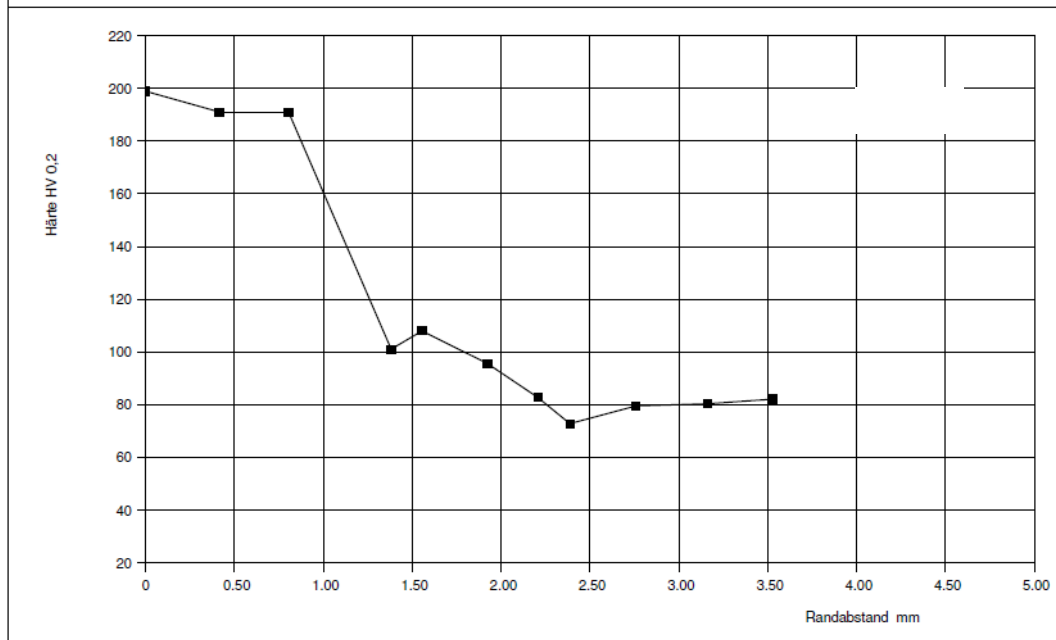
11.3.4 Probe: 3/2 MR

Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Werkstofftechnik		Härteprüfung n.AA-QW-109																																																																																																																																																																																																																																										
		Datum : 21.01.2010																																																																																																																																																																																																																																										
Prüfverfahren Verlauf / HV 0,2 Oberfläche / HV 10 Kern / HV 0,2			Einwirkdauer in sec 10																																																																																																																																																																																																																																									
:		:																																																																																																																																																																																																																																										
Prüfberichtsnummer : WT15539 Benennung : Laserschweissung 3/8 MR Teilenummer : - Werkstoff : CuSn6-Cu(Ni)																																																																																																																																																																																																																																												
Sollwert - EHT/Grenzhärte : - Sollwert - Oberflächenhärte : Härteverlauf Sollwert - Kernhärte : - Prüfer : Mucic Datum : 21.01.2010																																																																																																																																																																																																																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: small;"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Randabst.</th> <th>Härte</th> <th>Nr.</th> <th>Randabst.</th> <th>Härte</th> <th>Nr.</th> <th>Randabst.</th> <th>Härte</th> <th>Nr.</th> <th>Oberfl.-Härte</th> <th>Nr.</th> <th>Kern-Härte</th> </tr> <tr> <th>■</th> <th>mm</th> <th>HV 0,2</th> <th></th> <th>mm</th> <th>HV 0,2</th> <th></th> <th>mm</th> <th>HV 0,2</th> <th></th> <th>HV 10</th> <th></th> <th>HV 0,2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td>202,0</td><td>16</td><td></td><td></td><td>31</td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>0,3830</td><td>195,0</td><td>17</td><td></td><td></td><td>32</td><td></td><td></td><td>2</td><td></td><td>2</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>0,7810</td><td>193,0</td><td>18</td><td></td><td></td><td>33</td><td></td><td></td><td>3</td><td></td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>1,6210</td><td>112,0</td><td>19</td><td></td><td></td><td>34</td><td></td><td></td><td>4</td><td></td><td>4</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>1,6940</td><td>103,0</td><td>20</td><td></td><td></td><td>35</td><td></td><td></td><td>5</td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>1,7200</td><td>109,0</td><td>21</td><td></td><td></td><td>36</td><td></td><td></td><td>6</td><td></td><td>6</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>1,7880</td><td>78,0</td><td>22</td><td></td><td></td><td>37</td><td></td><td></td><td>7</td><td></td><td>7</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>2,1630</td><td>81,6</td><td>23</td><td></td><td></td><td>38</td><td></td><td></td><td>8</td><td></td><td>8</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>2,8040</td><td>78,5</td><td>24</td><td></td><td></td><td>39</td><td></td><td></td><td>9</td><td></td><td>9</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>3,1280</td><td>81,9</td><td>25</td><td></td><td></td><td>40</td><td></td><td></td><td>10</td><td></td><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>3,5570</td><td>81,9</td><td>26</td><td></td><td></td><td>41</td><td></td><td></td><td>11</td><td></td><td>11</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td>27</td><td></td><td></td><td>42</td><td></td><td></td><td>12</td><td></td><td>12</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>28</td><td></td><td></td><td>43</td><td></td><td></td><td>13</td><td></td><td>13</td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td>29</td><td></td><td></td><td>44</td><td></td><td></td><td>14</td><td></td><td>14</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td>30</td><td></td><td></td><td>45</td><td></td><td></td><td>15</td><td></td><td>15</td><td></td></tr> <tr> <td colspan="4"></td> <td colspan="4"></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Xm</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Xm</td> </tr> </tbody> </table>				Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Oberfl.-Härte	Nr.	Kern-Härte	■	mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		HV 10		HV 0,2	1		202,0	16			31			1		1		2	0,3830	195,0	17			32			2		2		3	0,7810	193,0	18			33			3		3		4	1,6210	112,0	19			34			4		4		5	1,6940	103,0	20			35			5		5		6	1,7200	109,0	21			36			6		6		7	1,7880	78,0	22			37			7		7		8	2,1630	81,6	23			38			8		8		9	2,8040	78,5	24			39			9		9		10	3,1280	81,9	25			40			10		10		11	3,5570	81,9	26			41			11		11		12			27			42			12		12		13			28			43			13		13		14			29			44			14		14		15			30			45			15		15										Xm		Xm	
Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Oberfl.-Härte	Nr.	Kern-Härte																																																																																																																																																																																																																																
■	mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		HV 10		HV 0,2																																																																																																																																																																																																																																
1		202,0	16			31			1		1																																																																																																																																																																																																																																	
2	0,3830	195,0	17			32			2		2																																																																																																																																																																																																																																	
3	0,7810	193,0	18			33			3		3																																																																																																																																																																																																																																	
4	1,6210	112,0	19			34			4		4																																																																																																																																																																																																																																	
5	1,6940	103,0	20			35			5		5																																																																																																																																																																																																																																	
6	1,7200	109,0	21			36			6		6																																																																																																																																																																																																																																	
7	1,7880	78,0	22			37			7		7																																																																																																																																																																																																																																	
8	2,1630	81,6	23			38			8		8																																																																																																																																																																																																																																	
9	2,8040	78,5	24			39			9		9																																																																																																																																																																																																																																	
10	3,1280	81,9	25			40			10		10																																																																																																																																																																																																																																	
11	3,5570	81,9	26			41			11		11																																																																																																																																																																																																																																	
12			27			42			12		12																																																																																																																																																																																																																																	
13			28			43			13		13																																																																																																																																																																																																																																	
14			29			44			14		14																																																																																																																																																																																																																																	
15			30			45			15		15																																																																																																																																																																																																																																	
								Xm		Xm																																																																																																																																																																																																																																		

11.3.5 Probe 3/5 MR

Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Werkstofftechnik		Härteprüfung n.AA-QW-109
		Datum : 21.01.2010
Prüfverfahren Verlauf / HV 0,2 Oberfläche / HV 10 Kern / HV 0,2		Einwirkdauer in sec 10
:		:
Prüfberichtsnummer : WT15539 Benennung : Laserschweissung 3/12 MR Teilenummer : - Werkstoff : CuSn6-Cu(Ni) Sollwert - EHT/Grenzhärte : - Sollwert - Oberflächenhärte : Härteverlauf Sollwert - Kernhärte : - Prüfer : Mucic Datum : 21.01.2010		

Nr.		Randabst.	Härte	Nr.		Randabst.	Härte	Nr.		Randabst.	Härte	Nr.		Oberfl.-Härte	Nr.		Kern-Härte		
		mm	HV 0,2			mm	HV 0,2			mm	HV 0,2			HV 10			HV 0,2		
1			199.0	16				31						1					
2	0.4140		191.0	17				32						2					
3	0.8040		191.0	18				33						3					
4	1.3820		101.0	19				34						4					
5	1.5540		108.0	20				35						5					
6	1.9210		95.8	21				36						6					
7	2.2070		82.8	22				37						7					
8	2.3870		72.9	23				38						8					
9	2.7580		79.6	24				39						9					
10	3.1610		80.5	25				40						10					
11	3.5290		82.1	26				41						11					
12				27				42						12					
13				28				43						13					
14				29				44						14					
15				30				45						15					
												Xm							Xm



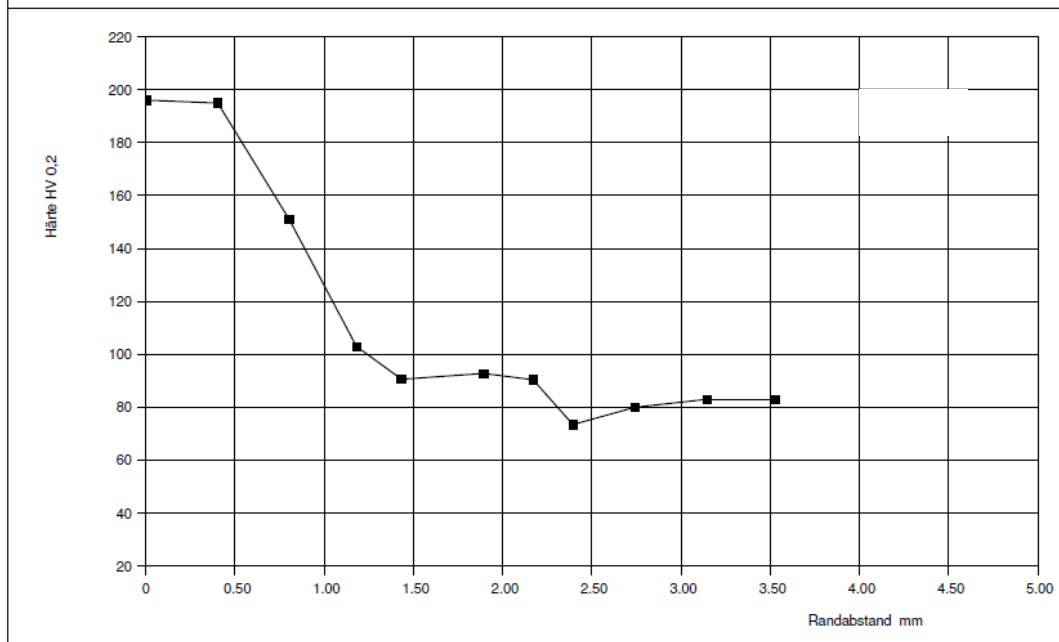
11.3.6 Probe 3/11 MR

Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Werkstofftechnik		Härteprüfung n.AA-QW-109
		Datum : 21.01.2010
Prüfverfahren Verlauf / HV 0,2 Oberfläche / HV 10 Kern / HV 0,2		Einwirkdauer in sec 10
:	:	:
Prüfberichtsnummer	: WT15539	
Benennung	: Laserschweissung 3/19 MR	
Teilenummer	: -	
Werkstoff	: CuSn6-Cu(Ni)	
Sollwert - EHT/Grenzhärte	: -	
Sollwert - Oberflächenhärte	: Härteverlauf	
Sollwert - Kernhärte	: -	
Prüfer	: Mucic	
Datum	: 21.01.2010	

Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte	Nr.	Randabst.	Härte
■	mm	HV 0,2		mm	HV 0,2		mm	HV 0,2
1	0.0020	196.0	16			31		
2	0.4020	195.0	17			32		
3	0.8030	151.0	18			33		
4	1.1800	103.0	19			34		
5	1.4330	90.7	20			35		
6	1.8940	92.9	21			36		
7	2.1700	90.4	22			37		
8	2.3930	73.5	23			38		
9	2.7430	80.0	24			39		
10	3.1490	83.0	25			40		
11	3.5260	83.0	26			41		
12			27			42		
13			28			43		
14			29			44		
15			30			45		

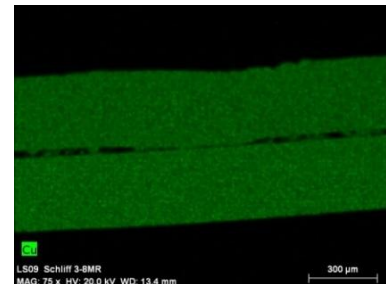
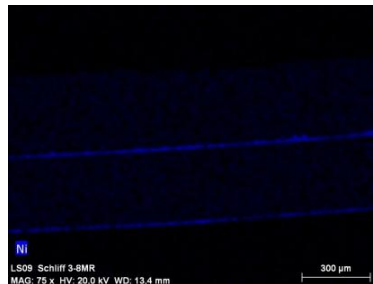
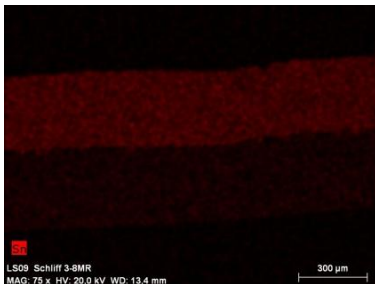
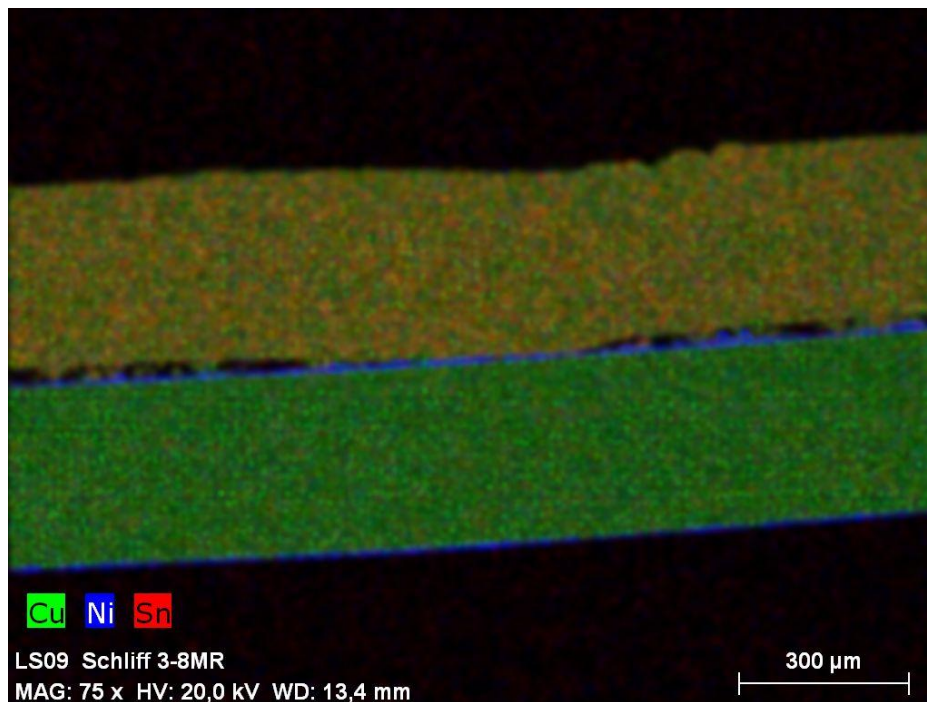
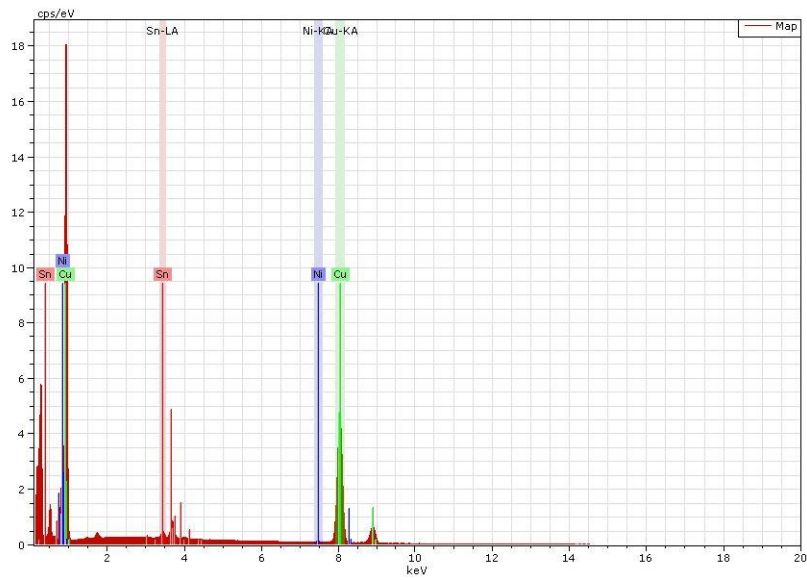
Nr.	Oberfl.-Härte
	HV 10
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
Xm	

Nr.	Kern-Härte
	HV 0,2
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
Xm	

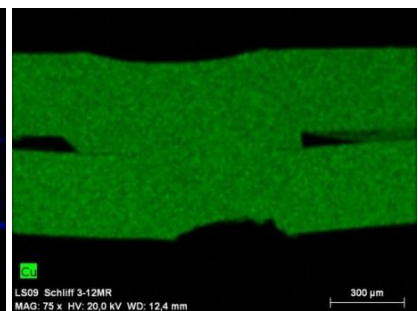
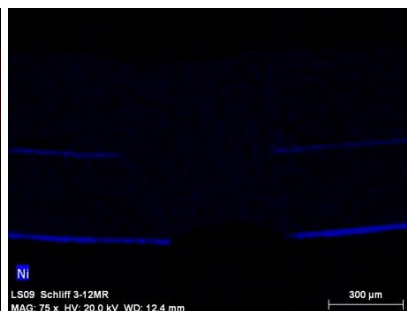
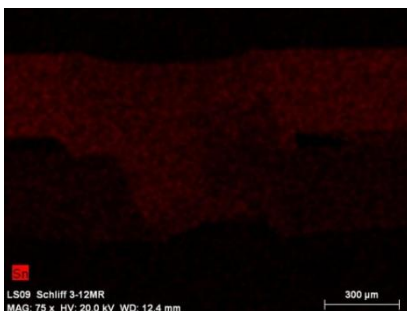
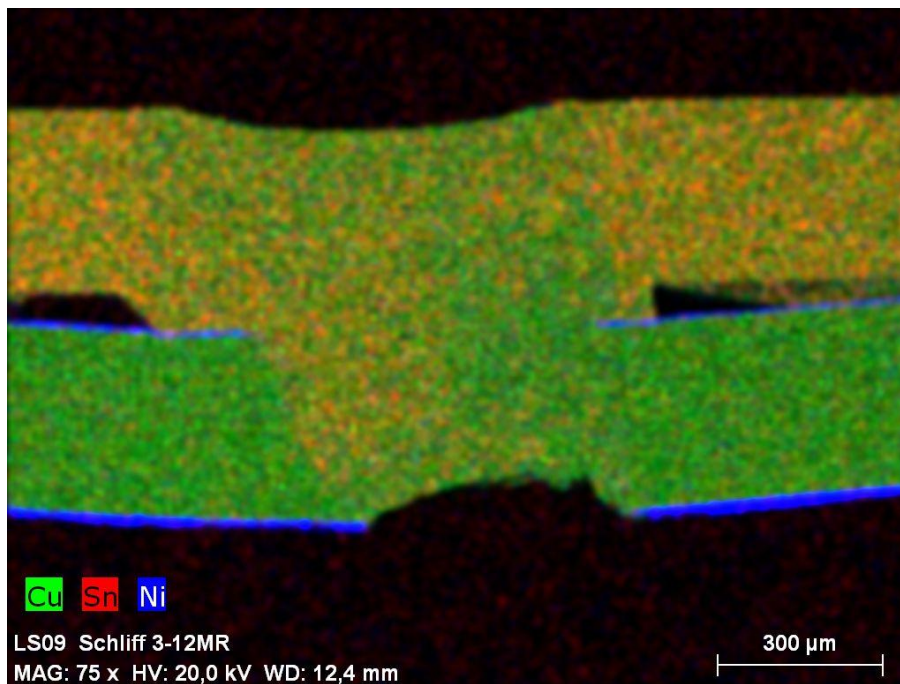
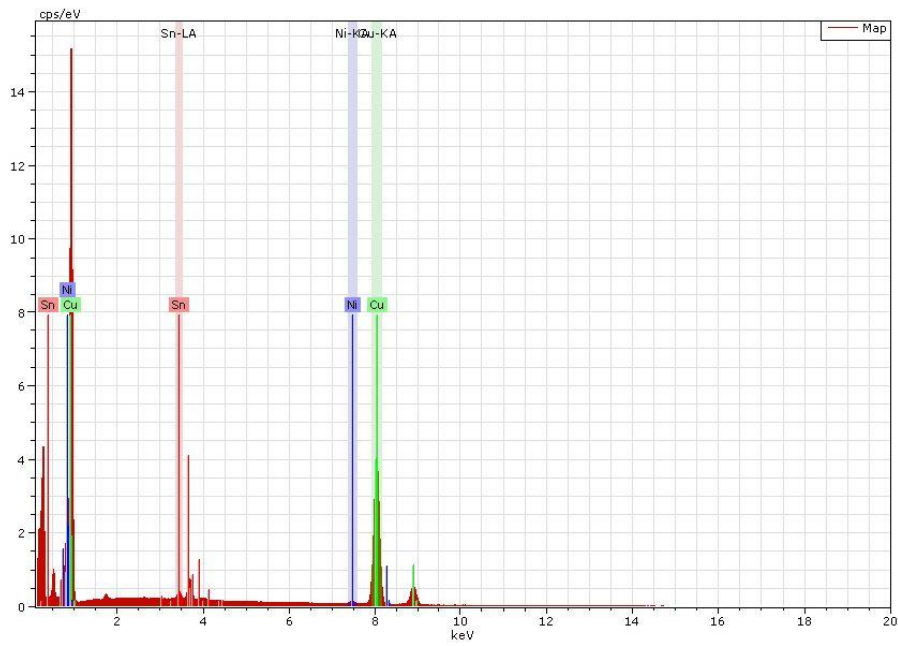


11.4 REM und EDX-Untersuchungen

11.4.1 Probe 3/2 MR



11.4.2 Probe 3/5 MR



12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ragone Diagramm [2]	9
Abbildung 2: Zusammensetzung der Li-Ionen Batterie [50]	11
Abbildung 3: Aufbau einer Lithium-galvanischer Zelle [3]	12
Abbildung 4: Verbinden der Li-Ionen Zelle mit dem BMS [3]	14
Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau einer Ultraschallschweißanlage [15,18]	20
Abbildung 6: Arbeitsprozess des Ultraweld®-L20 von Branson Amtech [58]	23
Abbildung 7: Verwendete Ultraschallschweißanlage (Ultraweld®- L20) [58]	27
Abbildung 8: Spontane Emission von Photonen [29]	28
Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau des Faserlasers [54]	30
Abbildung 10: Aufbau der Faser des Faserlasers [54]	30
Abbildung 11: Doppelkernfaser [56]	31
Abbildung 12: Querschnitt der Doppelkernfaser [56]	31
Abbildung 13: Wärmeleitungsschweißen [51]	32
Abbildung 14: Tiefschweißen [51]	32
Abbildung 15: Einfluss der Fokuslage zu Beginn des Laserschweißprozesses	34
Abbildung 16 : Äußerer Aufbau des Lasers [55]	36
Abbildung 17 : Sichtprüfung an einer ultraschallgeschweißten Al-Al Schweißverbindung	37
Abbildung 18 : Vickers-Härteprüfung [35]	38
Abbildung 19 : Universalprüfmaschine Zwick Z250 [35]	39
Abbildung 20 : Probengeometrie Ultraschallschweißen	39
Abbildung 21 : Probengeometrie Laserschweißen	40
Abbildung 22 : Probengeometrie für den metallographischen Schliff	41
Abbildung 23 : REM Aufnahme einer Ultraschallgeschweißten Fügestelle	42
Abbildung 24 : Spektrum der vorkommenden Elemente im Untersuchungsbereich	42
Abbildung 25 : Zielgröße beim statischen Zugscherversuch	48
Abbildung 26 : Ishikawa-Diagramm für das Ultraschallschweißen	50
Abbildung 27 : Grafische Darstellung des Screeningversuchsplanes	52
Abbildung 28 : Pareto-Diagramm-Ultraschallschweißen Al-Al Schweißverbindung	55
Abbildung 29 : Pareto-Diagramm-Ultraschallschweißen CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	55
Abbildung 30 : 3D-Oberflächendiagramm der Al-Al Schweißverbindung für den Screeningversuch	57
Abbildung 31 : 3D-Oberflächendiagramm für der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für den Screeningversuch	57
Abbildung 32 : 3D-Oberflächendiagramm der Al-Al Schweißverbindung für den Hauptversuch	61
Abbildung 33 : 3D-Oberflächendiagramm der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für den Hauptversuch	62
Abbildung 34 : Verlauf der Zugscherkraft in Abhängigkeit von der Amplitude für Al-Al Verbindung	62
Abbildung 35 : Ishikawa-Diagramm für das Laserschweißen	67
Abbildung 36 : Grafische Darstellung des Screeningversuchsplanes	69
Abbildung 37 : Pareto-Diagramm-Laserschweißen Al-Al Schweißverbindung	72
Abbildung 38 : Pareto-Diagramm-Laserschweißen CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	72
Abbildung 39 : Konturdiagramm des Screeningversuches für die Al-Al Schweißverbindung	74
Abbildung 40 : Konturdiagramm des Screeningversuches für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	74
Abbildung 41 : Bestimmung der Nahtquerschnittsfläche mittels AxioVision®	75
Abbildung 42 : Abhängigkeit der Zugscherkraft von der Streckenenergie und der Nahtquerschnittsfläche	75
Abbildung 43 : Graphische Darstellung des Parameteruntersuchungsbereiches mit dem CCD Versuchsplan für drei Faktoren	77
Abbildung 44 : Konturdiagramm des Hauptversuches für die Al-Al Schweißverbindung	83
Abbildung 45 : Konturdiagramm des Hauptversuches für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	83
Abbildung 46 : Fügespalt	87
Abbildung 47 : Fügespalt und Schweißnaht an einer Al-Al Schweißverbindung	87
Abbildung 48 : Abhängigkeit der Zugscherkraft von der Fügespaltbreite bei der Al-Al Schweißverbindung	88
Abbildung 49 : „Schweißnaht“ an einer Al-Al Schweißverbindung bei einem Fügespalt von 0,5 mm ..	88
Abbildung 50 : Abhängigkeit der Zugscherkraft von der Fügespaltbreite bei der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	89
Abbildung 51 : „Schweißnaht“ an einer CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung bei einem Fügespalt von 0,3 mm	89
Abbildung 52 : Step-Probe nach dem Schweißen (Bild links) und nach dem Trennen (Bild rechts)	90
Abbildung 53 : Härteverlauf an den lasergeschweißten Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Proben	92

Abbildung 54 : Härteverlauf am Querschliff der Probe 14.....	93
Abbildung 55 : Härteverlauf am Querschliff der Probe 11.....	94
Abbildung 56 : Spektrum des Untersuchungsbereiches	95
Abbildung 57 : Überblendung aller auftretenden Elemente im Untersuchungsreich	96
Abbildung 58 : Elementverteilung (Sn) Abbildung 59 : Elementverteilung (Ni) Abbildung 60 : Elementverteilung (Cu).....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Aluminiumwerkstoffe	16
Tabelle 2: Serien von Aluminiumlegierungen [10,11].....	16
Tabelle 3: Verwendetes Aluminiumblech	17
Tabelle 4: Eigenschaften der Kupferwerkstoffe.....	17
Tabelle 5: Verwendetes vernickeltes Kupferblech (Cu(Ni))	18
Tabelle 6: Eigenschaften der Zinnbronzewerkstoffe (CuSn6).....	18
Tabelle 7: Verwendetes Zinnbronzeblech (CuSn6)	18
Tabelle 8: Frequenzbereich der mechanischen Schwingungen	19
Tabelle 9: Moderne Hochleistungslaser	29
Tabelle 10: Vor- und Nachteile des Laserschweißens	35
Tabelle 11: Technische Daten des Lasers IPG YLR 2000 [55].....	36
Tabelle 12: Einzelschritte bei der statistischen Versuchsplanung	44
Tabelle 13: Versuchsfaktoren und deren Faktorstufen des Screeningversuches für das Ultraschallschweißen	(1psi = 6,9 *10 ³ Pa) 51
Tabelle 14: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Screeningversuches Al-Al Verbindung	53
Tabelle 15: Deskriptive Statistik des Screeningversuches Al-Al Verbindung	54
Tabelle 16: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche)des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.....	54
Tabelle 17: Deskriptive Statistik des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	54
Tabelle 18: Signifikante Schweißparameter für die Al-Al Schweißverbindung	56
Tabelle 19: Signifikante Schweißparameter für die CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	56
Tabelle 20: Versuchsfaktoren und deren Faktorstufen des Hauptversuches	58
Tabelle 21: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches Al- Al Verbindung.....	59
Tabelle 22: Deskriptive Statistik des Hauptversuches Al-Al Verbindung	60
Tabelle 23: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.....	60
Tabelle 24: Deskriptive Statistik des Hauptversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	61
Tabelle 25: Optimale Parametereinstellung der Al-Al Schweißverbindung für das Ultraschallschweißen	63
Tabelle 26: Optimale Parametereinstellung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für das Ultraschallschweißen.....	63
Tabelle 27: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche)des Bestätigungsversuches	64
Tabelle 28: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches Al-Al Verbindung.....	64
Tabelle 29: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	65
Tabelle 30: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.....	65
Tabelle 31: Versuchsfaktoren und deren Faktorstufen des Screeningversuches für das Laserschweißen	68
Tabelle 32: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Screeningversuches Al-Al Verbindung	70
Tabelle 33: Deskriptive Statistik des Screeningversuches Al-Al Verbindung	70
Tabelle 34: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung.....	71
Tabelle 35: Deskriptive Statistik des Screeningversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	71
Tabelle 36: Signifikante Schweißparameter für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	73
Tabelle 37: Versuchsfaktoren für das Laserschweißen und deren Faktorstufen des Hauptversuches	77
Tabelle 38: Grafische darstellung des Hauptversuchsplanes für die Al-Al und CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung	78
Tabelle 39: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches der Al-Al Verbindung.....	80

Tabelle 40: Deskriptive Statistik des Hauptversuches der Al-Al Verbindung	81
Tabelle 41: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Hauptversuches der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	82
Tabelle 42: Deskriptive Statistik des Hauptversuches der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	82
Tabelle 43: Optimale Parametereinstellung der Al-Al Schweißverbindung für das Laserschweißen ...	84
Tabelle 44: Drei optimale Parametereinstellung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für das Laserschweißen	84
Tabelle 45: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Bestätigungsversuches Al-Al Verbindung	85
Tabelle 46: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches Al-Al Verbindung	85
Tabelle 47: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	85
Tabelle 48: Deskriptive Statistik des Bestätigungsversuches CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	85
Tabelle 49: Optimale Parametereinstellung der CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindung für das Laserschweißen	86
Tabelle 50: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) der Stepversuche der Al-Al Verbindung	91
Tabelle 51: Deskriptive Statistik der Stepversuche der Al-Al Verbindung	91
Tabelle 52: Versuchsplan (mit Ergebnissen der durchgeführten Zugversuche) der Stepversuche der CuSn6-Cu(Ni) Verbindung	91
Tabelle 53: Deskriptive Statistik der Stepversuche der Al-Al Verbindung	91
Tabelle 54: Ergebnisse der Härtemessung bei den Al-Al Schweißverbindungen	93
Tabelle 55: Ergebnisse der Härtemessung bei den CuSn6-Cu(Ni) Schweißverbindungen	94

13 Literaturverzeichnis

- [1] Internetquelle : „Kleine Zeitung“
<http://www.kleinezeitung.at/steiermark/graz/graz/2015156/index.do> (10.09.09)
- [2] Internetquelle: „Wikipedia“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Ragone-Diagramm>
(15.09.09)
- [3] Vezzini A.: „Lithiumionen-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge“, Bulletin, (2009).
- [4] Internetquelle: „Wikipedia“
<http://de.wikipedia.org/wiki/Batteriemanagementsystem> (15.09.09)
- [5] Internetquelle: „Electropaedia“ <http://www.mpoweruk.com/bms.htm> (15.09.09)
- [6] Internetquelle: „Imeactia“ http://www.ime-actia.de/web_onboard/steuergeraete/bms.htm (15.09.09)
- [7] Internetquelle: „Wikipedia“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium> (11.12.09)
- [8] Adam T.: „Ultraschallschweißen ausgewählter Aluminiumlegierungen mit erhöhter Festigkeit“, Dissertation, Otto von Guericke Universität Magdeburg, (1999).
- [9] Internetquelle: „uni-protokolle“
<http://www.uniprotokolle.de/Lexikon/Legierung.html> (11.12.09)
- [10] DIN EN 1780-1, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Bezeichnung von legiertem Aluminium in Masseln, Vorlegierungen und Gussstücken, Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem, (2003).
- [11] DIN EN 573-1, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug, Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem, (2004).
- [12] Cerjak H.: „Skriptum zur Vorlesung Werkstoffkunde SS2000“, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, TU Graz (2000).
- [13] Internetquelle: „Wikipedia“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kupfer> (11.12.09)
- [14] Mayer G.: „Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen“, Deutsches Kupferinstitut, (2009).

- [15] F.Balle, G.Wagner, D.Eifler: Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites, Adv.Eng.Mat., 11, No. 1- 2, (2009).
- [16] DIN ISO 857-1, Schweißen und verwendete Prozesse- Begriffe- Teil 1: Metall-Schweißprozesse (1998).
- [17] Siebertz K., Van Beber D., Hochkirchen T.:“Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)“, (2010).
- [18] D. Eifler, G. Wagner: „Metall-Ultraschallschweißen von flexiblen Flachleiterkabeln“, Abschlussbericht AIF-Forschungsorhaben Nr.:15.112 N, Technische Universität Kaiserslautern, (2009).
- [19] G. Wagner: „Ultraschallschweißen von Glas und Glaskeramik mit Metallen sowie Erzeugung von Glas, Glas-Verbunden“, Werkstoffkundliche Berichte, Band 2, Technische Universität Kaiserslautern,(1997).
- [20] S. Krüger: „Ultraschallschweißen von Glasfasertextilien und Glasfaserverbundwerkstoffen mit Blechen“ Werkstoffkundliche Berichte, Band 14, Technische Universität Kaiserslautern, (2005).
- [21] H.-D. Gode: „Ultraschall-Metallschweißen: Funktionsweise und Anwendung einer hochwertigen Verbindungstechnik“, Verlag Moderne Industrie, (1995).
- [22] J. Wodara: „Ultraschallfügen und – trennen“, DVS-Verlag, Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 151 Düsseldorf, (2004).
- [23] H. Kucker: „Ultraschall-Torsionsschweißen spröd-duktiler Werkstoffverbunde“ Werkstoffkundliche Berichte, Band 10, Technische Universität Kaiserslautern, (2003).
- [24] R. Killing, U. Killing: „Kompendium der Schweißtechnik Band 1 – Verfahren der Schweißtechnik“, Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 128/1, DVS-Verlag Düsseldorf, (2002).
- [25] H.Kreye,I.Wittkamp: “Über den Bindemechanismus beim Ultraschallpunktschweißen“. In:Schweißen und Schneiden 27 Nr.3, (1975).
- [26] E. Beyer: „Laserstrahltechnologien in der Schweißtechnik“ Abschnitt 1, (2001).
- [27] G. Herziger, P.Loosen: Werkstoffberbeitung mit Laserstrahlung Grundlagen – Systeme – Verfahren, Hanser, (1993).
- [28] L. Dorn, H. Grutzeck, S. Jafari: „Schweißen und Löten mit Festkörperlasern“, Springer-Verlag, (1992).
- [29] R. Schneider: „Untersuchung der Einflussgrößen beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mit dem Nd:YAG-Laser“, (1994).
- [30] L.Quintino, A.Costa, R.Miranda, D.Yapp, V.Kumar, C.J. Kong:”Weldingwith high power fiber lasers – A preliminary study Mat. And Des. 28 (2007).
- [31] K.Y.Benyounis,A.G.Olabi, M.S.J Hashmi:”Effect of laser welding parameters on the heat input and weld- bead profile”, Journal of Materials Processing Technology 164-165, (2005).
- [32] G.Padmanaban, V.Balasubramanian: “Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy”, Optics & Laser Technology 42, (2010).
- [33] Gobrecht J., Rumpler E.:“Werkstofftechnik – Metalle“, Oldenbourg; Auflage: 2., überarb. A. (2006).
- [34] Internetquelle: „Wikipedia“ <http://de.wikipedia.org/wiki/H%C3%A4rte> (14.04.10)
- [35] Internetquelle: „Wikipedia“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Vickers> (14.04.10)
- [36] Dillinger J., Dobler H., Doll W.:“ Fachkunde Metall“, Europa Lehrmittel Verlag; Auflage: 55. A. (2007).
- [37] E. Hornbogen, H. Warlimont Metalle: „Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen“, Springer, Berlin; Auflage: 5., neu bearb. Aufl. (2006).

- [38] B.Klein: „Versuchsplanung DoE - Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, (2004).
- [39] W.Kleppmann: „Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse Optimieren“, Hanser, (2003).
- [40] E.Dietrich, A.Schulze: „Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozeßqualifikation“, Hanser, (1996).
- [41] E.Lichtenegger: „Statistische Versuchsplanung zur Optimierung der Parametrisierung von Klebprozessen“, Diplomarbeit, Institut für Statistik, Technische Universität Graz, (2007).
- [42] Box G., Hunter J, Hunter W.:”Statistics for Experimenters; Design, Innovation, and Discovery“, Second Edition, John Wiley & Sons, (2005).
- [43] Czitrom, V.: “One-Factor-at-a-Time Versus Designed Experiments“, Teacher’s Corner - The American Statistician, Vol. 53, No.2, (1999)
- [44] Krottmaier, J.: „Versuchsplanung - Ein integraler Bestandteil der TQM-Strategie, Dritte überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Industrielle Organisation Zürich, Verlag TÜV Rheinland, Köln, (1994).
- [45] Internetquelle: “Symposion“:
http://www.symposion.de/hr/?cmslesen/q7001001_25300201 (12.12.2010)
- [46] B.Heine,;“Werkstoffprüfung: Ermittlung von Werkstoffeigenschaften“, Hanser Fachbuchverlag; Auflage: 1 (2003).
- [47] Dilthey, U. :“Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2, Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, Schweißen von Aluminium“ (2009).
- [48] Sandner, W. : „Jahrhundert des Photons“ Adlershof Magazin (LOB 2002), Spezialausgabe (2002).
- [49] Kapp, H.: “Mit dem Laser zu innovativen Rohr-und Profilkonstruktionen im Automobilbau“ Trennen und Verbinden (2010).
- [50] Internetquelle : “ Mitsubishi-Motors“:
http://www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/environment/e/miev.html
(11.01.11)
- [51] Internetquelle : “ACSYS Lasertechnik“
:<http://www.acsys.de/laserschweissen/metallschweissen.html> (12.10.2009)
- [52] Internetquelle : “Wikipedia“
:<http://de.wikipedia.org/wiki/Rasterelektronenmikroskop> (11.10.2009)
- [53] Internetquelle : “Wikipedia“ : <http://de.wikipedia.org/wiki/Taguchi-Methode>
(12.12.2010)
- [54] Internetquelle: „Uni-Jena“: http://www.personal.uni-jena.de/~p3dosv/pdf/Faserlaser_Script.pdf (12.10.2009)
- [55] Benutzerhandbuch YLR 2000 S (Ytterbium Faser Laser) – IPG Laser GmbH;(2005).
- [56] Tünnermann, A. : „High-Power-Faserlaser: Aufbau- und Verbindungstechniken für photonische Kristallfasern“ , Laser+Produktion Spezial, (2008).
- [57] Möller K., Winter M.,: „Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien“ Skriptum zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie, TU Graz, (2005).
- [58] N.N.,:“ Schulungsunterlagen Branson Amtech- Ultrasonic Metal Welding“(2009).