

Montanuniversität Leoben - University of Leoben

Department Metallurgie - Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie - Nonferrous Metallurgy



www.unileoben.ac.at

# DIPLOMARBEIT

Thema:

## Schweißlöten von Aluminium mit unverzinktem Stahl unter Verwendung des CMT-Verfahrens



Ersteller:

Alexander Marout

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch

Leoben, Februar 2007

## **Schweißblöten von Aluminium mit unverzinktem Stahl unter Verwendung des CMT- Verfahrens**

In der Automobilindustrie bekommt der Leichtbau einen immer größeren Stellenwert, da aufgrund gesteigener Anforderungen an die passive Sicherheit, den Komfort und die Betriebsfestigkeit das Fahrzeuggewicht von Generation zu Generation stetig zunimmt. Aus diesem Grund werden seit einiger Zeit Mischverbunde aus Stahl und Aluminium eingesetzt, jedoch ergeben sich allein durch die sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften Schwierigkeiten im Bereich des Schweißens. Ein weiteres Problem dieser Werkstoffverbindung ist die Bildung einer sehr harten und spröden intermetallischen Legierungsschicht.

Ziel der Diplomarbeit ist die Herstellung von Schweißproben mittels des von Fronius International entwickelten ColdMetalTransfer-Verfahrens. Dabei ist die Stahlplatte nicht verzinkt, wodurch Probleme bezüglich der Schweißbarkeit auftreten.

Vor der Durchführung der praktischen Versuchsreihen soll eine einschlägige Literaturrecherche bezüglich der Herstellung, Wirkungsweise der verschiedenen Legierungselemente, Eigenschaften und Verhalten der Schweißverbindungen erfolgen.

Der praktisch Teil der Arbeit umfasst die Herstellung von Schweißproben und deren Untersuchung. Besonderes Augenmerk wird auf die intermetallische Phase gelegt. Deren Schichtdicke, Morphologie und die Art der entstehenden Phase bestimmt die Eigenschaften der gesamten Schweißverbindungen. Die Charakterisierung der intermetallischen Phase erfolgte durch die Analyseergebnisse aus dem REM-EDX in Kombination mit Untersuchungen am Nanointender und weiters durch eine Überprüfung mittels eines thermodynamischen Berechnungsmodells. Zugversuche zur Bestimmung der Festigkeiten der einzelnen Verbindungen werden durchgeführt. Weitere Versuchsreihen, speziell zur Bestimmung der Benetzungsfähigkeit des Stahles gegenüber den verschiedenen Lotwerkstoffen sind ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit.

Leoben, im September 2006

## ***Schweißlöten von Aluminium mit unverzinktem Stahl unter Verwendung des CMT-Verfahrens***

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Herstellung, Mikrostruktur und Eigenschaften von thermisch gefügten Stahl-Aluminium Hybridplatten untersucht.

Die Verbindung erfolgte unter Verwendung des Cold-Metal-Transfer-Lichtbogenschweißverfahrens von Fronius International. Die Dicke der auftretenden intermetallischen Phase ist von der Wärmeeinbringung abhängig und stellt das größte Problem bei den thermischen Fügeverfahren dar. Aus diesem Grund geht die Entwicklung in diese Richtung, dass versucht wird die Phasensaumbildung in geringen Grenzen zu halten bzw. die Bildung dieser Schicht gänzlich zu verhindern. Bei dem angewandten Schweißverfahren wird nur das Aluminium flüssig – der Stahl-Grundwerkstoff verbleibt im festen Zustand. Daher auch die Bezeichnung „Schweißlöten“. Durch eine mechanische Pulsung des Zusatzwerkstoffes während des Schweißprozesses zeichnet sich dieses Verfahren durch eine sehr geringe Wärmeeinbringung aus und ist somit zur Verbindung dieser Werkstoffkombinationen sehr geeignet. Die vorliegenden Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Einfluss von verschiedenen Lotlegierungen auf die Dicke und Morphologie und der Charakterisierung des in der Fügezone auftretenden intermetallischen Phasensaums (IMP). Zur Bestimmung der intermetallischen Phasen erfolgten Nanohärtemessungen sowie rasterelektronenmikroskopische Bestimmungen aber auch eine Überprüfung mittels thermodynamischem Modell. Die Festigkeitseigenschaften wurden in quasistatischen Zugversuchen untersucht.

## ***Welding of aluminium to non-galvanized steel by using the CMT- process***

Subject of the thesis are manufacturing, microstructure and properties of thermally joined steel-aluminium hybrid tailored blanks.

The joints were produced by using the Cold-Metal-Transfer arc welding process developed by Fronius International. The thickness of the intermetallic phases depends on the heat input rate and is a problem in thermal joining. Due to this problem the nowadays used processes have been designed to keep the formation of intermetallic phases within defined limits or even to prevent them. In this welding-process there is only the aluminium in fluid condition – the steel base material is still in solid state. Therefore it is called „weld-soldering“. By mechanically pulsing the solder wire during the welding process it is, caused by low welding heat, suitable to join such material compounds.

Investigations concerning the influence of various solder alloys on the thickness and morphology and the characterisation of the intermetallic layer which is formed in the welding zone were carried out. The determination of the intermetallic layer was made by nano-hardness-measurement and scanning-electron-microscopy as well by a validation with a thermodynamic model. The mechanical properties were tested in quasistatic tension tests.



Montanuniversität Leoben - University of Leoben

Department Metallurgie - Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie - Nonferrous Metallurgy

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Alexander Marout

# Danksagung

*Die vorliegende Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Fronius International, Wels, durchgeführt.*

*Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Michael Potesser, für die Übertragung und Betreuung dieser Diplomarbeit.*

*Gleichzeitig danke ich Herrn Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch für seine wertvollen Anregungen, die ständige Diskussionsbereitschaft und die Begutachtung der Arbeit.*

*Ein herzliches Dankeschön auch an alle Mitarbeiter der Firma Fronius für das angenehme Arbeitsklima, die herzliche Aufnahme und die große Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Versuche.*

*Für die wertvollen Anregungen, und die ständige Diskussionsbereitschaft bedanke ich mich bei meinem Betreuer seitens der Firma Fronius, Herrn Dipl.-Ing.Dr. Herbert Staufer.*

*Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing.(FH) Jörg Kazmaier für die Hilfe bei der Durchführung der zahlreichen Schweißversuche.*

*Danken will ich auch allen Mitgliedern des Institutes für Nichteisenmetallurgie für die Unterstützung.*

*Weiters möchte ich mich natürlich bei meiner ganzen Familie und meinen Freunden bedanken, die all die Jahre fest hinter mir gestanden sind.*

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>SCHWIERIGKEITEN BEIM VERBINDEN VON STAHL MIT ALUMINIUM</b> .....	<b>5</b>
2.1	Gegenüberstellung der Basismetalle .....	5
2.2	Metallurgische Probleme .....	6
2.2.1	Das System Eisen-Aluminium .....	7
2.2.2	Intermetallische Phasen im binären System Eisen-Aluminium .....	8
2.2.2.1	Fe <sub>2</sub> Al <sub>7</sub> (ε-Phase): 63 at% Al .....	9
2.2.2.2	FeAl <sub>2</sub> (ζ-Phase): 66 - 67 at% Al .....	9
2.2.2.3	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> (η-Phase): 69,7 - 73,2 at% Al .....	9
2.2.2.4	FeAl <sub>3</sub> (θ-Phase): 74 - 76 at% Al .....	9
2.2.3	Auswirkungen der IMP auf die geschweißte Verbindung.....	10
2.2.3.1	Einfluss der Schichtdicke.....	10
2.2.3.2	Einfluss der Gitterstruktur und der Bindungskräfte.....	11
<b>3</b>	<b>EINFLUSS VERSCHIEDENER LEGIERUNGSELEMENTE</b> .....	<b>11</b>
3.1	Einfluss von Silizium, Mangan und Magnesium .....	11
3.2	Einfluss von Zink.....	11
3.2.1	Ablauf der Eisen-Zink Reaktion bei der Verzinkung .....	11
3.2.2	Wirkung des Zinks auf die Schweißverbindung .....	13
<b>4</b>	<b>SCHWEIßVERFAHREN IM ÜBERBLICK</b> .....	<b>14</b>
4.1	Kaltpressschweißen.....	14
4.2	Warmwalzen.....	14
4.3	Explosionsschweißen .....	15
4.4	Reibschweißen .....	15
4.5	Verbundstrangpressen.....	16
4.6	Abbrennstumpfschweißen .....	16
4.7	Diffusionsschweißen.....	16
4.8	Elektronenstrahlschweißen .....	17
4.9	Löten .....	17
4.10	Metall-Schutzgasschweißen .....	18
4.10.1	Schutzgase .....	19
4.10.1.1	Argon .....	19
4.10.1.2	Helium.....	19
4.10.2	Energiequellen und Lichtbogenarten.....	20
4.10.2.1	Kurzlichtbogen.....	20
4.10.2.2	Sprühlichtbogen .....	21

---

4.10.2.3	Langlichtbogen .....	21
4.10.2.4	Impulslichtbogen .....	21
4.11	Schweißlöten – im Detail CMT .....	22
<b>5</b>	<b>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>24</b>
5.1	Methoden der Werkstoffcharakterisierung.....	25
5.1.1	Lichtmikroskopie .....	25
5.1.2	Rasterelektronenmikroskop (REM-EDX).....	25
5.1.3	Nanointender .....	25
5.1.4	Zugprüfung .....	26
5.1.5	Phasenbestimmung mittels eines thermodynamischen Modells.....	28
5.1.5.1	Einfluss von Silizium.....	28
5.1.5.2	Einfluss von Mangan .....	28
5.1.5.3	Einfluss von Mangan und Silizium .....	29
5.1.5.4	Modellierung der thermodynamischen Betrachtungen .....	30
5.1.5.5	Anwendung des Modells .....	31
5.1.6	Benetzungsversuche .....	31
5.1.7	Oberflächencharakterisierung – optische Profilometrie .....	31
5.1.7.1	Messprinzip .....	31
5.1.7.2	Begriffe der Oberflächenrauigkeit nach DIN EN ISO 4287.....	32
5.2	Werkstoffkombinationen .....	34
5.3	Vorversuche .....	34
5.3.1	Überlappnähte .....	35
5.3.2	Bördelstoss .....	35
5.3.3	Spezielle Geometrieform.....	36
5.4	Herstellung der Schweißproben.....	36
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>38</b>
6.1	Ergebnisse der Profilometeruntersuchungen .....	38
6.2	Ergebnisse der Benetzungsversuche.....	39
6.3	Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff Al 99,5.....	40
6.3.1	Aluminiumplatine Al 99,5.....	40
6.3.1.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	40
6.3.1.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX) .....	41
6.3.1.3	Versuche am Nanointender .....	42
6.3.1.4	Thermodynamisches Modell.....	43
6.3.1.5	Zugprüfung.....	43
6.3.2	Aluminiumplatine AlMgSi1 .....	44
6.3.2.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	44
6.3.2.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX) .....	45
6.3.2.3	Versuche am Nanointender .....	45
6.3.2.4	Zugprüfung.....	46
6.3.2.5	Thermodynamisches Modell.....	46
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse des Zusatzwerkstoffs Al 99,5.....	46

---

---

6.5	Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff AlSi5.....	46
6.5.1	Aluminiumplatine Al 99,5.....	46
6.5.1.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	47
6.5.1.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX) .....	47
6.5.1.3	Versuche am Nanointender .....	48
6.5.1.4	Zugprüfung.....	48
6.5.1.5	Thermodynamisches Modell.....	49
6.5.2	Aluminiumplatine AlMgSi1 .....	49
6.5.2.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	49
6.5.2.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX) .....	50
6.5.2.3	Versuche am Nanointender .....	51
6.5.2.4	Zugprüfung.....	51
6.5.2.5	Thermodynamisches Modell.....	52
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse des Zusatzwerkstoffs AlSi5 .....	52
6.7	Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff AlSi3Mn.....	53
6.7.1	Aluminiumplatine Al 99,5.....	53
6.7.1.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	53
6.7.1.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX) .....	54
6.7.1.3	Versuche am Nanointender .....	54
6.7.1.4	Zugprüfung.....	55
6.7.1.5	Thermodynamisches Modell.....	55
6.7.2	Aluminiumplatine AlMgSi1 .....	56
6.7.2.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	56
6.7.2.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX) .....	56
6.7.2.3	Zugprüfung.....	57
6.7.2.4	Versuche am Nanointender .....	57
6.7.2.5	Thermodynamisches Modell.....	57
6.8	Zusammenfassung der Ergebnisse des Zusatzwerkstoffs AlSi3Mn .....	58
6.9	Zusammenfassende Ergebnisse.....	59
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>62</b>
<b>9</b>	<b>TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>I</b>



# 1 Einleitung

Da an Bauteile oft sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt werden, ist es in vielen Fällen aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten notwendig, diese aus unkonventionellen Werkstoffkombinationen herzustellen. Voraussetzung für die Anwendung solcher Verbindungen ist eine ausreichende Festigkeit der Fugestelle zwischen den beiden Werkstoffpartnern gegenüber den auftretenden Belastungen.

Eine Materialpaarung, mit der ein breites Eigenschaftsspektrum abgedeckt werden kann, bilden die beiden noch immer wichtigsten Metallgruppen in der heutigen Technik, nämlich Aluminium und Stahl.

Insbesondere im Bereich des Automobilbaus werden vermehrt Bauteilkombinationen aus Aluminiumlegierungen und Stahl aus Gründen der Gewichtsersparnis eingesetzt. Hauptgrund dafür sind gestiegene Anforderungen an die passive Sicherheit, den Komfort und auch die Betriebsfestigkeit. Doch speziell bei der Verbindung dieser in der Technik am häufigsten verwendeten Werkstoffgruppen ergeben sich aufgrund stark unterschiedlicher chemischer und physikalischer Eigenschaften sowie durch die Bildung sehr spröder intermetallischer Phasen Schwierigkeiten.

Von allen Verfahren, die zum Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe geeignet sind, bringt die Schweißtechnik die größten technischen und wirtschaftlichen Vorteile. Von entscheidender Bedeutung für die Güte einer Schweißverbindung ist grundsätzlich das Verfahren selbst. Je höher die Wärmeeinbringung, desto größer ist der Anteil an abgeschmolzenen Grundmetall und umso leichter erfolgt die Bildung der gefährlichen Eisenaluminide. Die höhere Temperatur führt zusätzlich zu größerer Diffusivität der Atome im Schweißbad und begünstigt somit das Entstehen und Wachsen der intermetallischen Phasen.

Ein modifiziertes Lichtbogenschweißverfahren in Verbindung mit speziellen Vorkehrungen bei der Lotlegierung und der Verbindungsherstellung bzw. -gestaltung, wird als ein Weg angesehen, Fügeverbindungen hoher Qualität herzustellen. Das verwendete CMT-Verfahren erfüllt diese Anforderung und weist während des Schweißprozesses einen geringen Wärmeeintrag in die Fugestelle auf. Erreicht wird dies hauptsächlich durch eine mechanische Pulsung des Zusatzwerkstoffes. Des Weiteren spricht auch die gute Regelbarkeit dieses Verfahrens für das Fügen solcher Werkstoffe.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, schweißgelötete Platinen aus unverzinktem Stahl und Aluminium herzustellen. Weiters soll der Einfluss einer Kaltverfestigung der Stahlplatine auf einen Zusammenhang zwischen den Legierungselementen, der Ausbildung der intermetallischen Phase und den Festigkeitseigenschaften untersucht werden.

## 2 Schwierigkeiten beim Verbinden von Stahl mit Aluminium

Im Folgenden sollen die grundsätzlichen Probleme dargestellt werden, die bei der Verbindung dieser beiden Werkstoffe auftreten

### 2.1 Gegenüberstellung der Basismetalle

In Tabelle 1 sind die physikalischen Eigenschaften von Eisen und Aluminium angeführt. Die Problematik beim Fügen dieser beiden Werkstoffe, aufgrund ihrer großen Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften, ist hier bereits zu erkennen.

Besonders die großen Differenzen in den thermischen Eigenschaften, wie die Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung sowie auch die Wärmekapazität können zu sehr ausgeprägten Spannungsfeldern in der Fügezone beim Abkühlen führen.

Im Extremfall führen diese Spannungsfelder auch ohne Belastung des Bauteils zum Bruch führen. Durch die Wahl eines geeigneten Schweißprozesses und in weiterer Folge auch durch entsprechende Schweißparameter können die entstehenden Spannungsfelder deutlich minimiert werden [13].

<b>Eigenschaften</b>	<b>Einheit</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>
Dichte bei 20°C	[kg/m <sup>3</sup> ]	7870	2700
Atomgewicht	[g/mol]	55,84	26,98
Atomdurchmesser	[nm]	0,248	0,287
Kristallaufbau	-	krz, kfz	kfz
Gitterkonstanten	[nm]	0,286(krz), 0,368(kfz)	0,405
Schmelzpunkt	[°C]	1536	660
Spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]	460	896
Spezifische Schmelzwärme	[J/g]	272	397
Mittlere Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	75	230
Lineare Wärmeausdehnung	[1/K]	12·10 <sup>-6</sup>	24·10 <sup>-6</sup>
Oxide	-	FeO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Schmelzpunkte der Oxide	[°C]	1400, 1600, 1455	2050
Elastizitätsmodul	[GPa]	210	71
Elektrochemisches Potential	[V]	- 0,44	- 1,66

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Al 99,5 bzw. Eisen [2],[7],[13]

Ein weiterer großer Unterschied in den physikalischen Eigenschaften ist der Schmelzpunkt der beiden Werkstoffe. Aluminium schmilzt bei 660 °C, Stahl hingegen befindet sich bei diesen Temperaturen im festen Zustand. Wird beim Schweißprozess sehr viel Wärme eingebracht, sodass sich beide Metalle im schmelzflüssigen Zustand befinden, so werden durch die Überhitzung des Aluminiums die Diffusionsvorgänge sehr beschleunigt, und die intermetallische Phase erfährt ein starkes Wachstum. In weiterer Folge führt dies zu sehr spröden intermetallischen Phasen, die begünstigt durch die Überhitzung eine große Schichtdicke erreichen [27].

Aus diesem Grund heraus wird nun ein Schweißverfahren angestrebt, welches eine möglichst geringe Wärmeeinbringung aufweist.

## 2.2 Metallurgische Probleme

Bei den verschiedenen Fügeverfahren wird in die Kontaktzone zwischen den beiden zu verbindenden Werkstoffen thermische Energie eingebracht, wobei es an der Grenzfläche zur Bildung eines mehr oder weniger großen Legierungsbereiches kommt. Die Ausbildung dieses Bereiches ist, wenn einer oder auch beide Werkstoffpartner während des Schweißprozesses den flüssigen Phasenzustand erreichen, sowohl von Diffusionsvorgängen als auch von Konvektionsbewegungen im flüssigen Gebiet bestimmt. Bleiben beide Materialien fest, so beeinflussen nur Diffusionsvorgänge die Ausbildung der Legierungsschicht. Die Zusammensetzung der Legierung ergibt sich aus dem chemischen und physikalischen Verhalten der beiden Werkstoffe zueinander. Zwischen Eisen und Aluminium bilden sich in diesem Legierungsbereich sehr harte und spröde intermetallische Phasen, welche die Verbindung stark beeinflussen.

Bei Schmelzschweißverfahren wird in die zu verschweißenden Werkstücke nur in einem schmalen Bereich entlang der Schweißnaht Wärme eingebracht. Die Erstarrung und die weitere Abkühlung des in diesem Gebiet entstehenden Schmelzbades erfolgt aufgrund der an die Schweißnaht angrenzenden nicht erwärmten Werkstückmassen und der hohen Wärmeleitfähigkeit in Aluminium sehr rasch. Durch die schnelle Abkühlung entstehen in der Schweißnaht im allgemeinen Phasen, die nicht den thermodynamischen Gleichgewichtszusammensetzungen entsprechen, wie sie aus Zustandsdiagrammen entnommen werden können. Dennoch können diese binären Systeme für Gefügeabschätzungen herangezogen werden, und sind ein wertvolles Hilfsmittel [22],[23].

## 2.2.1 Das System Eisen-Aluminium

Aus dem Zustandsdiagramm Eisen-Aluminium in Abbildung 1 ist zu entnehmen, dass Aluminium im festen Zustand praktisch kein Eisen lösen kann, sowie Eisen mit Aluminium eine Reihe von intermettallischen Phasen bildet.

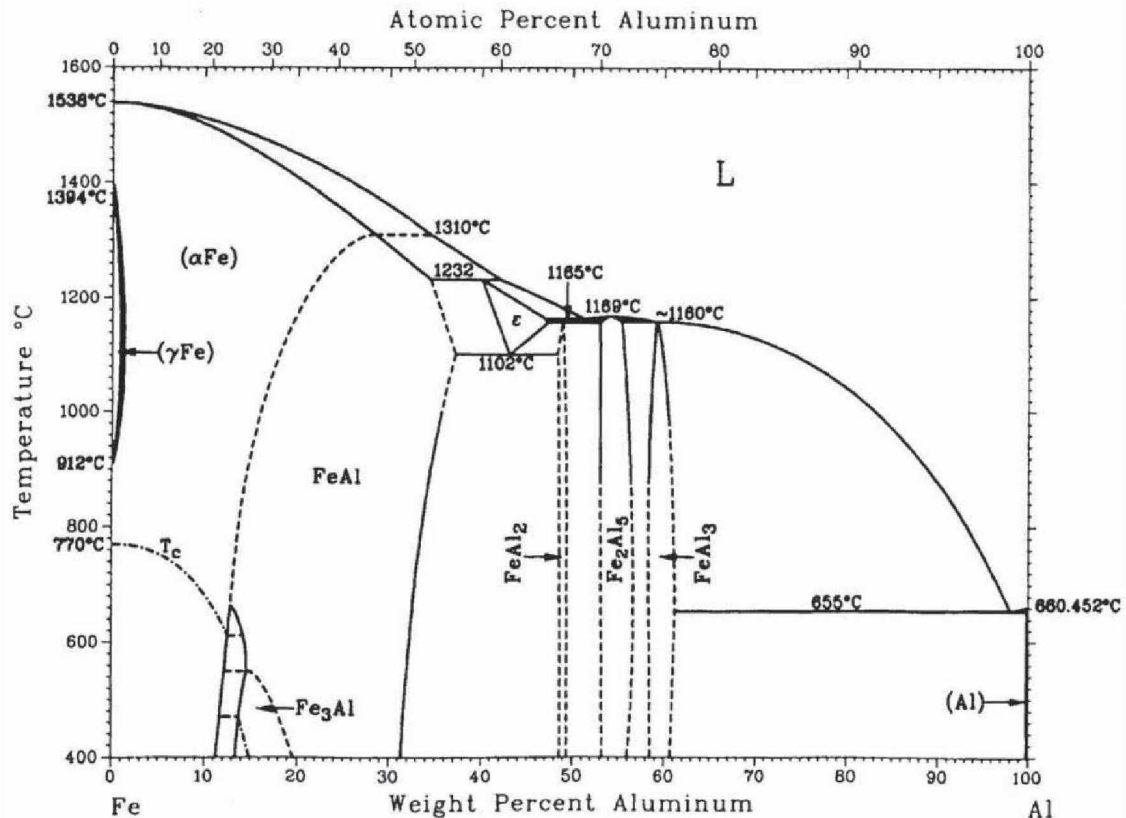


Abbildung 1: Binäres System Eisen – Aluminium [16]

Aluminium gehört zu den Ferritbildnern, das heißt, es schnürt den Existenzbereich des Austeniten stark ein. Das Zweiphasengebiet  $\alpha + \gamma$  erstreckt sich bei 1160 °C von 1,55 bis 1,93 at% Aluminium, entspricht 0,75 bis 0,94 gew.% Aluminium. Über 1 gew.% Aluminium ist der Ferrit demnach in allen Temperaturbereichen beständig. Bis 18,5 at% Aluminium ist die Anordnung der Atome im kubisch raumzentrierten Gitter des Ferrits vollkommen regellos, unabhängig von der vorangegangenen Wärmebehandlung. Zwischen 18,5 und 25 at% Aluminium ist diese zufällige Anordnung bei raschem Abkühlen von Temperaturen über 600 °C nach wie vor enthalten. Bei langsamer Abkühlung auf Raumtemperatur hingegen bildet sich eine Ordnungsphase der Zusammensetzung Fe<sub>3</sub>Al, wobei der Ordnungsgrad bei 25 at% Aluminium einen Höchstwert von 92 % erreicht [23].

Das Gitter der  $\beta_1$ -Phase ist vom BiF<sub>3</sub>-Typ (kubisch) und besitzt eine doppelt so große Gitterkonstante wie jenes des Ferrits. Zwischen 25 und 34 at% Aluminium besteht die Struktur bei langsamer Abkühlung aus  $\beta_1$ , allmählich übergehend in  $\beta_2$  und nach rascher Abkühlung aus  $\beta_2$ , entspricht FeAl, mit dem Gittertyp CsCl. Über 34 at% Aluminium tritt

sowohl bei rascher als auch bei langsamer Abkühlung nur mehr  $\beta_2$  auf. Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Bildung der  $\beta_2$ -Überstruktur durch rasches Abkühlen nicht unterdrückt werden kann. Etwas neuere Arbeiten zeigen, dass sich in diesem Legierungsbereich aus dem untergeordneten Gitter eine Reihe geordneter Strukturen bilden (z.B.  $\text{Fe}_{13}\text{Al}_3$ ), deren Entstehung von Zusammensetzung, Temperatur und thermischer Vorgeschichte abhängt [22],[23].

Die Bildung dieser Überstrukturen benötigt viel Zeit, und aus diesem Grund werden diese Ordnungsphasen beim Schweißlöten von Stahl und Aluminium nicht auftreten.

## 2.2.2 Intermetallische Phasen im binären System Eisen-Aluminium

In einem Legierungssystem können Kristallarten auftreten, die im Gegensatz zu den beiden Legierungselementen völlig andere Eigenschaften aufweisen, und in einem eigenen Gittertyp kristallisieren. Die dabei entstehenden intermetallischen Kristallarten können dabei exakt stöchiometrisch sein, wie im Falle der  $\zeta$ -Phase ( $\text{FeAl}_2$ ) im binären System Aluminium- Eisen. Die entstehenden intermetallischen Phasen sind aber auch innerhalb bestimmter Konzentrationsbereiche existent, wie im Falle der  $\eta$ -( $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ) und der  $\theta$ -Phase ( $\text{FeAl}_3$ ). Solche Abweichungen von der exakten stöchiometrischen Zusammensetzung entstehen durch Platzwechselforgänge, d.h. das sich A-Atome auf B-Plätze setzen und umgekehrt. Weiters kann es auch der Fall sein, dass sich konstitutionelle Leerstellen einbauen.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der im System Aluminium-Eisen auftretenden Gleichgewichtsphasen. Dargestellt sind die Kristallstrukturen, die stöchiometrischen Zusammensetzungen, aber auch die Verhältnisse e/a [22],[23].

<b>Phase</b>	<b>Kristallstruktur</b>	<b>Zusammensetzung [at% Al]</b>	<b>Mikrohärte [HV]</b>	<b>e/a</b>
$\alpha_{\text{Fe}}$	k.r.z.	0	96 – 140	3/4
$\beta_1$ $\text{Fe}_3\text{Al}$	kubisch	25	344 – 368	3/2
$\beta_2$ $\text{FeAl}$	kubisch	50	491 – 667	n.b.
$\varepsilon$ $\text{Fe}_2\text{Al}_7$	k.r.z.	63	650 - 680	6/3
$\zeta$ $\text{FeAl}_2$	rhomboedrisch	66 - 67	1070 – 1058	15/7
$\eta$ $\text{Fe}_2\text{Al}_5$	orthorhombisch	69,7 - 73,2	1000 – 1158	9/4
$\theta$ $\text{FeAl}_3$	monoklin	74 - 76	750 (772 – 1017)	n.b.
$\alpha_{\text{Al}}$	k.f.z.	100		n.b.

Tabelle 2: Gleichgewichtsphasen des Zweistoffsystems Eisen-Aluminium [2],[13],[18],[21]

### 2.2.2.1 $\text{Fe}_2\text{Al}_7$ ( $\epsilon$ -Phase): 63 at% Al

Diese Phase wird entweder durch eine peritektische Umwandlung aus  $\alpha$ -Eisen und der Schmelze, oder auch durch eine eutektische Reaktion bei 1165 °C aus der Schmelze gemeinsam mit der  $\eta$ -Phase gebildet. Die  $\epsilon$ -Phase zerfällt eutektoid bei 1103 °C zu  $\beta_2$  und ist somit bei Raumtemperatur nicht existent.

### 2.2.2.2 $\text{FeAl}_2$ ( $\zeta$ -Phase): 66 - 67 at% Al

Diese Phase kann zwischen 65 und 70 at% Al bei 1158 °C peritektisch aus dem Zweiphasengebiet  $\epsilon+\eta$  gebildet werden.

### 2.2.2.3 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ( $\eta$ -Phase): 69,7 - 73,2 at% Al

Wie zuvor erwähnt, bildet sich die  $\eta$ -Phase zusammen mit der  $\epsilon$ -Phase bei 1165 °C eutektisch aus der Schmelze. Die orthorhombisch kubisch-raumzentrierte  $\eta$ -Phase schmilzt kongruent bei 1169 °C. Den elementaren Aufbau der  $\eta$ -Phase zeigt Abbildung 2.

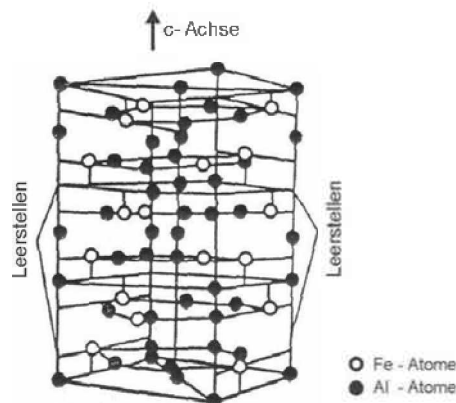


Abbildung 2: Darstellung der Kristallstruktur der  $\eta$ -Phase [27]

An den Eckpunkten der Elementarzellen sitzen die Aluminiumatome. Diese Aluminiumatome weisen eine geringe Besetzungsdichte von etwa 70 % auf, und stellen somit Ausgangspunkte für Mikrorisse dar.

### 2.2.2.4 $\text{FeAl}_3$ ( $\theta$ -Phase): 74 - 76 at% Al

Neben der primären Entstehung, ist man sich über die Bildung der  $\theta$ -Phase noch im Unklaren, ob diese Phase entweder durch eine peritektische Umwandlung aus Schmelze und  $\eta$ -Phase, oder gemeinsam mit der  $\eta$ -Phase eutektisch aus der Schmelze bei 1160 °C entsteht.

Für das Schweißlöten von Stahl mit Aluminium sind die wichtigsten intermetallischen Gleichgewichtsphasen jene von  $\eta$  ( $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ) und  $\theta$  ( $\text{FeAl}_3$ ).

## 2.2.3 Auswirkungen der IMP auf die geschweißte Verbindung

Nachfolgend sind die Einflüsse auf die intermetallische Phase beschrieben.

### 2.2.3.1 Einfluss der Schichtdicke

Intermetallische Phasen weisen als makroskopische Werkstoffe eine hohe Festigkeit auf. Die Bruchzähigkeit dieser ist allerdings gering, d.h. sie sind sehr spröde.

Beim Übergang eines makroskopischen Werkstoffs zu einer dünnen Schicht desselben Werkstoffes nimmt die Festigkeit zu. Die Gründe dafür sind einerseits die Nähe der Grenzflächen, und andererseits die meist kleinen Korngrößen, welche die Versetzungsbewegung stark behindern. Dies würde allerdings auch zu einer Abnahme der Bruchzähigkeit führen. Dabei ist jedoch die Dimension der dünnen Schicht zu berücksichtigen. Damit es innerhalb der sehr festen intermetallischen Phase zu einem schnellen Versagen kommt, muss ein Defekt d.h. ein Anriss kritischer Größe vorhanden sein. Ein solcher kritischer Riss läuft praktisch ohne plastische Verformung und somit auch ohne Energieverlust durch den Werkstoff. Je dünner diese spröde Schicht nun wird, umso unwahrscheinlicher ist der Einbau eines Defekts kritischer Größe. Aus diesem Grund erhöht sich die Bruchzähigkeit als auch die Festigkeit mit abnehmender Schichtdicke. Diese dünnen Schichten von festen, spröden Materialien können somit höhere elastische Verformungen ertragen, als der jeweilige kompakte Werkstoff [2].

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen an Schweißungen von Aluminiumlegierungen mit Stählen. Dabei ist eine Abhängigkeit der Festigkeit mit der Schichtdicke der intermetallischen Legierungsschicht zu erkennen.

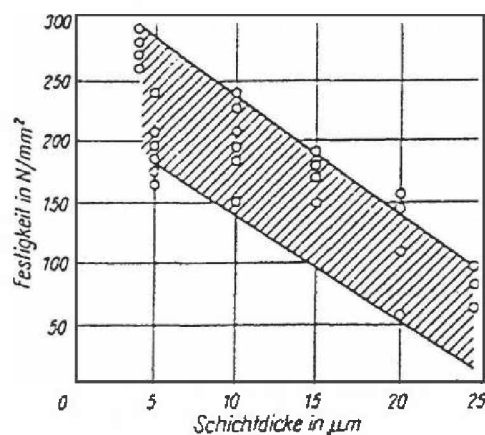


Abbildung 3: Einfluss der Dicke der Übergangsschicht auf die Festigkeit der Schweißverbindung [1]

Die Schweißverbindungen wurden dabei mit Pufferschichten hergestellt, wobei Kupfer, Zink, Nickel und Silber verwendet wurden. Die mechanische Belastbarkeit der Schweißverbindung ist allerdings stark von der Art und der Duktilität der entstehenden intermetallischen Phasen abhängig, sodass die Dicke dieser Phase nicht immer der entscheidende Faktor ist [1].

### 2.2.3.2 Einfluss der Gitterstruktur und der Bindungskräfte

Intermetallische Phasen und ihre Besonderheiten bezüglich der mechanischen Eigenschaften können durch die Kristallographie erklärt werden. Gleit- und Kletterbewegung in einem Kristallsystem bewirken, wie auch bei den Metallen, eine plastische Verformung. Jedoch sind die Bindungskräfte der intermetallischen Phasen nicht rein metallisch, sondern es können sich auch noch zusätzliche heteropolare und kovalente Bindungsanteile überlagern. Die Härte und auch die Sprödigkeit nehmen mit steigendem nichtmetallischen Bindungscharakter stark zu, da auch die Beweglichkeit der Versetzungen im Kristallgitter verringert wird. Auch der Aufbau eines Gitters einer intermetallischen Phase ist im Vergleich zu einem metallischen Werkstoff wesentlich komplizierter. Die Systeme weisen sehr hohe Atomzahlen pro Elementarzelle auf, und auch die Packungsdichte ist wesentlich geringer (Abbildung 2). Somit kommt es zu einer Einschränkung der Versetzungsbeweglichkeit und damit zu einer geringeren plastischen Verformungsfähigkeit [2].

## 3 Einfluss verschiedener Legierungselemente

Um die Dicke der sich bildenden intermetallischen Phase möglichst gering zu halten, besteht die Möglichkeit durch die Wahl geeigneter Zusatzwerkstoffe die Diffusionsbedingungen günstig zu beeinflussen.

### 3.1 Einfluss von Silizium, Mangan und Magnesium

Der Einfluss dieser Legierungselemente in Bezug auf die intermetallischen Schicht wurde schon in früheren Arbeiten sehr detailliert beschrieben, und aus diesem Grund wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, worin diese Legierungselemente auf die intermetallische Phase, IMP, aber auch die gegenseitigen Wechselwirkungen behandelt wurden. [2], [7],[13],[22],[23]

### 3.2 Einfluss von Zink

Um den Einfluss des Zinks auf eine Schweißung zu klären, wird zuerst die Verzinkung eines Stahlbleches in einer Feuerverzinkungsanlage dargestellt.

#### 3.2.1 Ablauf der Eisen-Zink Reaktion bei der Verzinkung

Beim Schmelztauchverzinken von Stahl entstehen durch wechselseitige Diffusion in einem Schmelzbad bei 450 °C, gemäß Abbildung 4, intermetallische Fe-Zn Verbindungen.



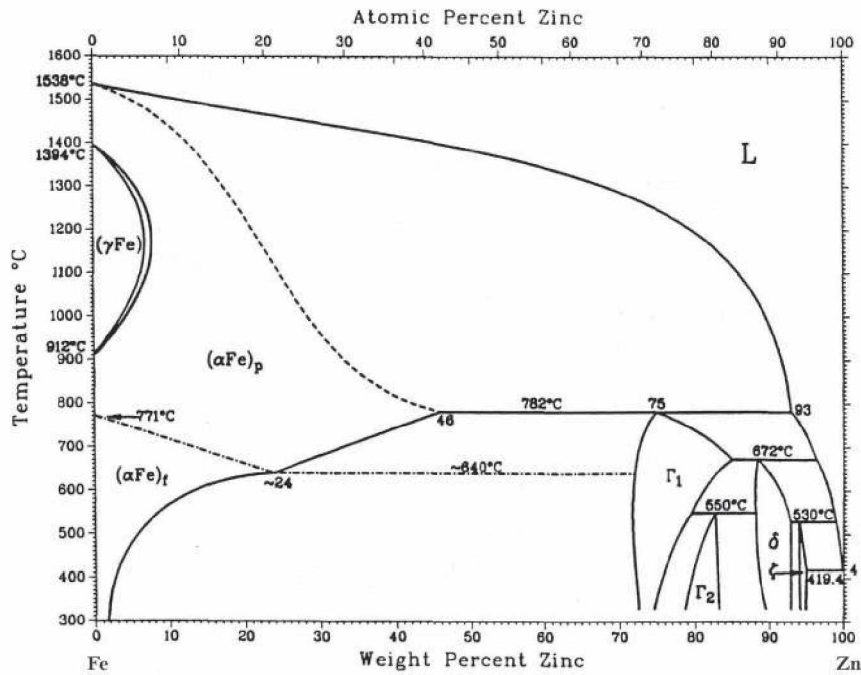


Abbildung 4: Zustandsschaubild Eisen-Zink [17]

Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Phasen, die in dem System Fe-Zn auftreten.

Phase	Aufbau	Kristallgitter
$a_{Fe}$	Fe(Zn)	krz
$\Gamma$	$Fe_3Zn_{10}$	krz
$\Gamma_1$	$Fe_5Zn_{21}$	kfz
$\delta$	$FeZn_{10}$	hexagonal
$\xi$	$FeZn_{13}$	monoklin
$\eta_{Zn}$	Zn(Fe)	hexagonal

Tabelle 3: Phasen im System Fe-Zn [17]

Es entsteht die in einem kubischen Gitter kristallisierende  $\Gamma$ -Phase, die  $\delta$ - und  $\delta_1$ -Phase mit hexagonalen Kristallgittern und die monokline  $\xi$ -Phase. Die  $\delta_1$ -Phase entsteht durch Umwandlung der  $\delta$ -Phase unter Mitwirkung der  $\Gamma$ -Phase.

Bei der Entnahme des Werkstückes aus der Schmelze werden diese Legierungsphasen dann mit dem Zink gemäß Badlegierung überzogen (Abbildung 6).

Im Temperaturbereich von etwa 490 °C reagieren Eisen und Zink nach einem parabelförmigen Zeitgesetz. Die Diffusionsgeschwindigkeit verringert sich immer mehr, je dicker diese Legierungsphasen werden und nach einer bestimmten Zeitdauer halten sich neu gebildete sowie in die Schmelze abschwimmende Legierungsphasen die Waage [17].

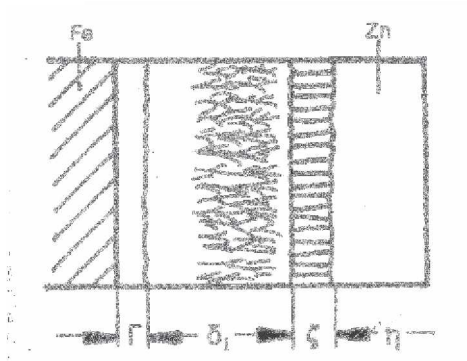


Abbildung 5: Aufbau der Zinkschicht [17]

Auftretende Phase	Eisengehalt der Phase	Schmelzpunkt [°C]
η	0,08 %	419
ξ	6,0... 6,2 %	530
δ <sub>1</sub>	7,0... 11,5 %	672
Γ	21... 28 %	782

Tabelle 4: Zink-Eisen Phasen [17]

Die Ausbildung dieser intermetallischen Eisen-Zink-Verbindungen ist in Abbildung 6 dargestellt. Gut zu erkennen sind die einzelnen Phasen und die dendritische Verzahnung mit dem Zinküberzug.

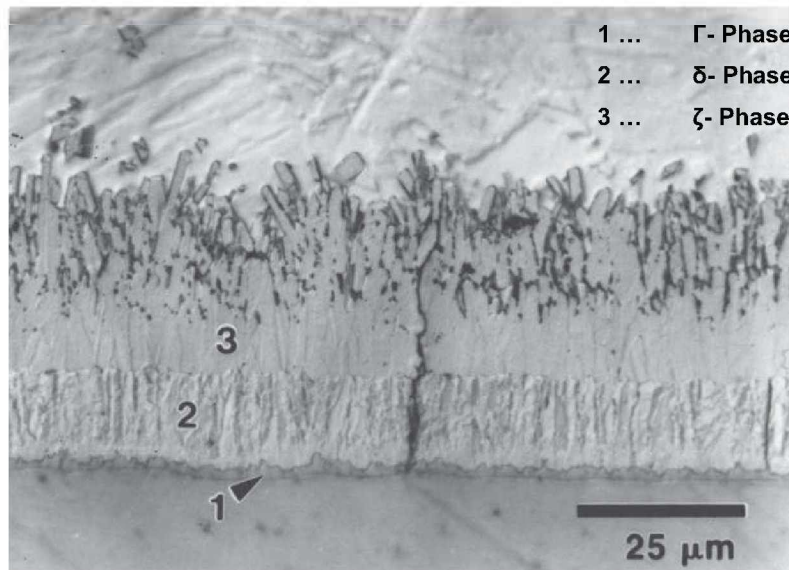


Abbildung 6: Schichtaufbau [17]

### 3.2.2 Wirkung des Zinks auf die Schweißverbindung

Über den genauen Einfluss von Zink auf die Schweißbarkeit herrscht zurzeit noch Unklarheit und gibt es einige Untersuchungen, welche die Wirkung des Zinks auf die Schweißbarkeit von Stahl-Aluminium Verbindungen untersuchen. Der tatsächliche Einfluss des Zinks ist aber noch nicht nachgewiesen, und daher gibt es nur Vermutungen. Einerseits wirkt Zink als Diffusionsbarriere, d.h. es bilden sich nur sehr dünne intermetallische Al-Fe-Phasen aus, und somit kommt es zu einer Festigkeitssteigerung aufgrund der geringeren Schichtdicken. Dies zeigte sich an Versuchen, wobei sich die Schichtdicken der IMP durch den Einsatz einer Zinkbeschichtung deutlich verringerten [27].

Des Weiteren stellt sich ein zinkbeschichtetes Stahlblech als sehr günstig bezüglich der Schweißbarkeit heraus. Das ist auch an durchgeführten Probeschweißungen erkennbar, wobei sich mit einem verzinkten Stahlblech gleichmäßige und auch reproduzierbare Schweißnähte ausbilden. Der Hauptgrund liegt vermutlich darin, dass auf dem verzinkten Stahlblech während des Schweißens die einzelnen intermetallischen Eisen-Zink-Phasen kontinuierlich aufschmelzen und sich somit ein flüssiger Zinkfilm auf der Oberfläche des Stahles bildet. Dadurch kann sich während des Schweißprozesses der flüssige Aluminiumzusatzwerkstoff auf dem gebildeten flüssigen Zinkfilm sehr gut benetzen. Die Benetzungsfähigkeit des Lotes auf diesem Zinkfilm ist günstiger als die Abscheidung des Lotes auf dem unbeschichtetem Stahl, und daher fließt der Zusatzwerkstoff besser aus. Dadurch wird die Verbindungsfläche größer, und somit wird auch die Festigkeit der Schweißverbindung erhöht [14].

## 4 Schweißverfahren im Überblick

Dieses Kapitel dient zur Darstellung einiger Schweißverfahren, wobei im Hinblick auf die durchgeführte Versuchsreihe das CMT-Verfahren im Vordergrund steht.

### 4.1 Kaltpressschweißen

Die Verbindung wird durch Anwendung von Druck im kalten Zustand der Werkstoffe erreicht. Dazu sind große plastische Verformungen oberhalb der Dehngrenze an den oxidfreien Oberflächen der Stoßstellen notwendig. Das Gefüge wird dadurch sehr stark kaltverformt [4]. Auf den Oberflächen befindliche Fremdschichten reißen auf, die hierdurch freigelegten, noch nicht mit der Atmosphäre in Berührung gekommenen Metallbereiche werden einander soweit angenähert, dass ihre atomaren Bindekräfte wirksam werden. Da das Verfahren bei Raumtemperatur arbeitet, können sich keine erst bei höherer Temperatur entstehenden spröden Zwischenschichten bilden [25]. Zwischen der Aluminiumlegierung AlMg3 und dem Stahl X 2 CrNi 18 9 wurden befriedigende Verbindungen bezüglich Festigkeit, Gasdichtheit und Maßgenauigkeit hergestellt. Solche Verbindungen können aufgrund der diffusionshemmenden Wirkung von Chrom kurzzeitig Beanspruchungstemperaturen bis 500 °C ertragen [1].

### 4.2 Warmwalzen

Werkstoffverbunde zwischen AlMg-Legierungen und Stahl lassen sich durch Warmwalzen herstellen. Um zu verhindern, dass sich das AlMg-Blechband mit einer sich bei der Prozesstemperatur von 315 bis 480 °C üblicherweise bildenden Oxidschicht überzieht, muss auf dieses zuvor eine Reinaluminiumschicht aufgewalzt werden [15]. Auch Zwischen-

schichten aus Silber, AlSn- oder AlSiZr-Legierungen werden vorgeschlagen [1]. Solcherart hergestellte Stahl-Aluminium-Verbunde können als Schweißübergangsstücke eingesetzt werden.

### 4.3 Explosionsschweißen

Dieses Verfahren eignet sich für das Plattieren von Stahl mit Aluminium. Es lassen sich Übergangsstücke fertigen, mit denen Verbundkonstruktionen hergestellt werden können. Dabei wird die Wirkung der Druckwelle bei der Detonation von Sprengstoff zum Schweißen der überlappend angeordneten Bleche ausgenutzt. Die zu verbindenden Teile werden unter einem Winkel von 1 bis 15° je nach Werkstoff und Verfahren gegeneinander geneigt und an der Außenseite mit einer Sprengstoffschicht versehen. Durch die Zündung dieser Schicht bewegen sich die Verbindungsflächen mit hoher Geschwindigkeit gegeneinander. Die Verbindung erfolgt kontinuierlich durch verformungsinduziertes Schmelzen [26]. Dies führt zur Bildung intermetallischer Phasen, welche bei günstigen Schweißbedingungen so dünn sein können, dass sie im Lichtmikroskop nicht aufgelöst werden. Bei ungünstig gewählten Parametern kommt es zur Bildung von Wirbeln in der Grenzschicht, welche durchmischte und aufgeschmolzene Bereiche enthalten, die vorwiegend aus intermetallischen Phasen bestehen [7].

### 4.4 Reibschweißen

Die Verbindungsflächen der meist rotationssymmetrischen Teile werden durch Relativbewegung in einer dünnen Schicht bis nahezu Schmelztemperatur, ein Anschmelzen kann, muss aber nicht auftreten, erwärmt und unter erhöhtem Druck bei Aufhebung der Relativbewegung verschweißt. Dazu wird zumeist kein Zusatzwerkstoff benötigt. Da die Flächen nicht ideal eben sind, erfolgt die Berührung zunächst punktförmig. An diesen Stellen treten erhöhte Temperaturen auf, die durch Wärmeleitung rasch ausgeglichen werden. Im gesamten Nahtbereich steigt dabei die Temperatur allmählich an, die Oxidfilme reißen auf, und es kommt zu örtlichen Verschweißungen. Diese werden sofort wieder getrennt, und es bilden sich neue Verbindungen, die sich ebenso wieder lösen. Mit Zunahme der Zahl der Schweißstellen vergrößert sich das Reibmoment, das für die Zerstörung der Schweißverbindungen erforderlich ist, gleichzeitig steigt die Temperatur weiter an. Durch allmähliches Einebnen der Stoßflächen und durch die Abnahme der Werkstofffestigkeit bei steigender Temperatur, sinkt das Reibmoment nach Erreichen eines Maximums wieder ab. In der letzten Phase des Schweißvorganges wird durch Stauchen die eigentliche Verbindung hergestellt [26].

Im Fall von Aluminium und Stahl wurden zahlreiche Untersuchungen zum Reibschweißen durchgeführt. Für optimale Verbindungen werden Dicken der intermetallischen Phasen von unter 1 µm bis zu 5 µm angegeben. Dabei sind diffusionshemmende Schichten aus Aluminium oder Silber nötig, die vor dem Schweißvorgang auf den Stahl aufgebracht werden. Auch im austenitischen Stahl wirken die Legierungselemente diffusionshemmend, wodurch die Bildung intermetallischer Phasen im Vergleich zu unlegiertem Stahl verzögert wird [23].

#### 4.5 Verbundstrangpressen

Dieses Verfahren, auch Strangpressplattieren genannt, ist geeignet, um Übergangsstücke aus Aluminiumprofilen (AlMgSi0,5) mit Stahlbändern (X 5 CrNi 18 9) anzufertigen [26]. An diesen Übergangsstücken können die jeweiligen Metalle konventionell angeschlossen werden. Auch Profile aus AlMgSi0,5 bzw. AlMgSi1 und austenitischen Cr-Ni-Stahl werden so hergestellt und als Stromschienen für Transportsysteme verwendet. Die Bindung zwischen Stahl und Aluminium wird hierbei durch ca. 1 µm große Partikel einer intermetallischen Phase, wahrscheinlich  $Fe_2Al_5$ , erreicht [29].

#### 4.6 Abbrennstumpfschweißen

Die unbearbeiteten Stoßflächen werden während des Stromdurchgangs in so leichter Berührung gehalten, dass der Werkstoff an den kleinen örtlichen Berührungsstellen wegen der großen Stromdichte stetig abbrennt. Teilweise kommt es zur Verdampfung des Metalls, wodurch das flüssige Metall in Form von Funken aus der Stoßstelle herausgeschleudert wird. Der Metaldampf bildet gleichzeitig eine Schutzgasatmosphäre. Nach genügender Tiefe der Abbrandzone erfolgt die Verschweißung durch schlagartiges Stauchen meist unter gleichzeitiger Stromabschaltung. Das Ergebnis ist eine Stumpfschweißung mit charakteristischer Gratausbildung [26]. In Untersuchungen zum Abbrennstumpfschweißen von rostfreiem Stahl mit Aluminium und Aluminiumlegierungen konnte eine Bildung der intermetallischen Phase durch einen sehr schnellen Stauchvorgang, etwa  $10^{-3}$  s, weitgehend unterdrückt werden. Die erreichten Festigkeiten lagen unter optimalen Bedingungen über denen des Aluminiumgrundwerkstoffes [28].

#### 4.7 Diffusionsschweißen

Dieses Verfahren arbeitet mit geringen Anpressdrücken und Verformungen bei Temperaturen oberhalb der Rekristallisationstemperatur und basiert auf Diffusions- und Rekristallisationsvorgängen, die zu einer Schweißverbindung im festen Zustand führen. An die Oberflächenvorbereitung werden hohe Ansprüche gestellt. Die zu verschweißenden

Oberflächen müssen metallisch blank sein, und die Rauigkeit sollte 1  $\mu\text{m}$  nicht überschreiten. Zu Beginn des Schweißvorgangs werden durch den Anpressdruck die Rauigkeitsspitzen eingeebnet und die anfänglich punktförmige Berührung geht in eine flächenförmige über. Damit die zu verschweißenden Oberflächen nicht oxidieren, wird das Diffusionsschweißen im Vakuum oder unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Bei manchen Metallpaarungen werden Zwischenschichten aus artgleichen oder artverschiedenen Werkstoffen verwendet. Diese können die Bildung von spröden intermetallischen Phasen verhindern und gegebenenfalls die erforderlichen Schweißtemperaturen verringern [12].

Untersuchungen wurden an X 10 CrNiTi 18 9 und Aluminium bzw. AlMg3 durchgeführt. Diffusionsschweißungen von Stahl und AlMg3 erreichten eine Zugfestigkeit von 100 N/mm<sup>2</sup> bei einer Diffusionsschichtdicke von  $8 \pm 1 \mu\text{m}$ . Die Schweißtemperatur betrug dabei 500 °C bei Schweißzeiten von etwa 10 min. Diffusionszonen unter 3  $\mu\text{m}$  und über 12  $\mu\text{m}$  Dicke zeigten einen steilen Festigkeitsabfall [12].

#### 4.8 Elektronenstrahlschweißen

Bei diesem Verfahren erzeugt energiereiche gebündelte Strahlung bei ihrem Auftreffen auf bzw. Eindringen in das Werkstück die für den Schweißprozess erforderliche Wärme. Dazu werden im Vakuum aus einer glühenden Kathode austretende Elektronen durch Hochspannung in Richtung einer durchbohrten Anode beschleunigt und mit elektromagnetischen Linsen gebündelt. Die Elektronen treffen mit hoher Geschwindigkeit auf das Werkstück, werden in einer Tiefe der Größenordnung 10 bis 15  $\mu\text{m}$  abgebremst und geben dabei den größten Teil ihrer kinetischen Energie in Form von Wärme ab [26]. Durch die geringe Wärmeeinbringung und das sehr schmale Schmelzbad kommt es zu einer sehr raschen Erstarrung und Abkühlung der Schweißnaht. Dadurch können die Bildung bzw. das Wachstum spröder intermetallischer Phasen stark herabgesetzt werden [7]. Durch vorhergehende Vakuumbedampfung eines Cr-Ni-Stahles mit Aluminium lassen sich gute Ergebnisse erzielen. Versuche ergaben eine durchgehende, in manchen Bereichen 2 bis 3  $\mu\text{m}$  dicke Legierungsschicht. Die Verbindungen erreichten im Biegeversuch einen Biegewinkel von 180°, im Zugversuch erfolgte der Bruch im Aluminiumgrundwerkstoff [27].

#### 4.9 Löten

Hierbei werden metallische Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalls, eines Lotes, verbunden. Die Schmelztemperatur des Lotes liegt unter jener der zu verbindenden Werkstoffe. Unter Weichlöten bezeichnet man jene Verfahren, die bei Arbeitstemperaturen unter 450 °C verwendet werden. Durch solch niedrige Prozesstemperaturen ist die Bildung

von intermetallischen Phasen kaum zu erwarten, jedoch ist die zu erreichende Festigkeit eher gering. Beim Hartlöten werden Arbeitstemperaturen über 450°C verwendet und höhere Festigkeiten erreicht [7].

#### 4.10 Metall-Schutzgasschweißen

Das Metall-Schutzgasschweißverfahren (MSG) wird nach DIN 1910-2 in die Gruppe Schmelzschweißverfahren eingeordnet. Wie bei allen Schutzgasschweißverfahren wird der Schutz der Schweißstelle vor der Oxidationswirkung der Atmosphäre durch ein zugeführtes Gas erfüllt [8],[3]. Beim Metall-Schutzgasschweißen wird eine Drahtelektrode kontinuierlich dem Schweißbrenner zugeführt und im Lichtbogen abgeschmolzen. Durch das Einbringen von Zusatzwerkstoff können auch größere Luftspalte toleriert werden, zudem ist das Verfahren ausgezeichnet automatisierbar (siehe Abbildung 7).

Die Abschirmung der Schweißstelle vor der Atmosphäre übernimmt ein Schutzgas, das aus einer in den Brenner integrierten Düse strömt. Dadurch bleibt der Schweißprozess gut beobachtbar, jedoch ist die nähere Umgebung des Lichtbogens ungehindert der eingebrachten Wärme- und Lichtstrahlung ausgesetzt. Auf eine Wasserkühlung des Brenners kann daher nur bei sehr geringen Stromstärken verzichtet werden. Schweißstrom, Drahtelektrode, Schutzgas und ggf. Kühlwasser werden dem Brenner durch ein Schlauchpaket zugeführt. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt in der Regel durch einen, bei der Berührung des Werkstücks erzeugten Kurzschluss. Dabei steigt die Stromstärke kurzzeitig stark an, was zu einer hohen Widerstandserwärmung und damit zu einem Schmelzen und teilweise Verdampfen des Werkstoffes führt. Durch Zündprogramme bzw. -steuerungen wird eine nahezu schweißspritzerfreie Zündung ermöglicht [4]. Geschweißt wird ausschließlich mit Gleichstrom, bei positiver Polung der Drahtelektrode. Bei dieser Polung bildet sich an der Elektrodenspitze ein konzentrierter Lichtbogenbrennfleck aus, der das Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes begünstigt [3],[4].

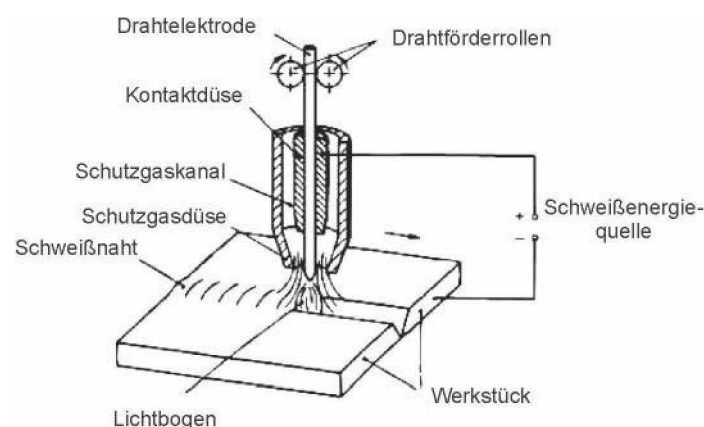


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Metall-Schutzgasschweißens [4]

Der Vorteil des MSG-Schweißverfahrens wird in dem hohen energetischen Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringen Investitionskosten gesehen. Nachteile entstehen durch das geringe Verhältnis von Nahthöhe zu Nahtbreite, d.h. die Einschweißtiefe ist begrenzt. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Schweißgeschwindigkeit in Verbindung mit der hohen thermischen Belastung des Werkstückes.

### 4.10.1 Schutzgase

Bei den Schutzgasschweißverfahren schützt das Schutzgas die Schweißstelle vor Luftzufuhr. Die Wahl des Schutzgases hat große Bedeutung für die Charakteristik des Lichtbogens und die Einbrandform. Die wesentlichen Parameter hierfür sind die Ionisationsenergie und die Wärmeleitfähigkeit des Schutzgases. Das Ionisationsvermögen ist eine Eigenschaft eines Gases, welches die elektrische Leitfähigkeit der Lichtbogensäule und somit den Spannungsabfall im Lichtbogen beeinflusst, wodurch die in Wärme umgesetzte elektrische Energie maßgeblich bestimmt wird. Die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst die Temperaturverteilung in der Lichtbogensäule. In Abbildung 8 ist der Einfluss des Schutzgases in Bezug auf die Einbrandform qualitativ dargestellt.

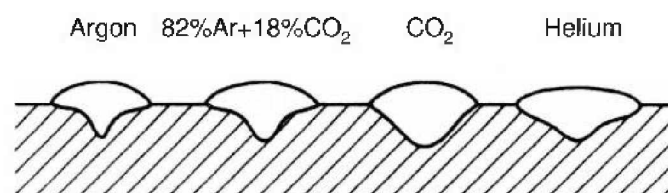


Abbildung 8: Schutzgaseinfluss auf die Nahtgeometrie [4]

#### 4.10.1.1 Argon

Argon ist gut ionisierbar und ermöglicht so eine leichte Zündung und einen ruhig brennenden Lichtbogen. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit entsteht eine breite Lichtbogensäule mit relativ schmaler wärmeführender Randzone von niedriger Temperatur und geringer Stromdichte. Dies bewirkt einen schmalen, tiefen Einbrand in der Mitte der Naht bei geringer Einbrandtiefe im Randbereich, den so genannten „Argonfinger“. Unter Argon ergibt sich ein relativ kaltes Schmelzbad mit hoher Viskosität, wodurch mit erhöhter Porenanfälligkeit und stärkerer Nahtüberhöhung zu rechnen ist [3].

#### 4.10.1.2 Helium

Das Edelgas Helium besitzt eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Argon und führt so zu einer gleichmäßigeren radialen Temperaturverteilung im Lichtbogen. Aus dieser



Eigenschaft ergeben sich aber höhere Wärmeverluste an die Umgebung. Als Folge stellt sich im Gegensatz zu Argon ein schmalerer stromführender Lichtbogenkern ein, wodurch der Widerstand der Bogensäule ansteigt. Dies bewirkt einen höheren Spannungsabfall im Lichtbogen. Da das Ionisationspotenzial von Helium größer ist als das von Argon, stellt sich hierbei eine höhere Lichtbogenspannung ein. Daraus resultiert eine größere Wärmeeinbringung und somit ein heißeres Schmelzbad mit geringerer Viskosität, das besser entgasen kann und geringere Nahtüberhöhungen zulässt. Aufgrund der höheren thermischen Belastung sollte der Brenner mit einer Wasserkühlung versehen sein [6].

#### 4.10.2 Energiequellen und Lichtbogenarten

Moderne, elektronisch geregelte Stromquellen regeln die Strom- und Spannungsparameter entsprechend einer Kennlinie. Für unterschiedliche Werkstoffe und Anwendungen bieten sie voreingestellte Kennlinien. Um einen optimalen Prozess zu erhalten, regelt die Quelle gemäß den Vorgaben der Kennlinie den Grund- und Pulsstrom, die Pulszeit und die Pulsfrequenz. Gezündet wird der Schweißprozess durch Aufsetzen der Drahtelektrode auf das Werkstück, wobei ein Ausknicken des Drahtes durch die Verringerung der Drahtvorschubgeschwindigkeit vermieden wird.

Der Lichtbogen, der sich nach der Zündung einstellt, ist abhängig von den eingestellten Schweißparametern und vom verwendeten Schutzgas. Es wird zwischen Kurzlichtbogen, Sprühlichtbogen, Langlichtbogen und Impulslichtbogen unterschieden (siehe Tabelle 5). [8]

Lichtbogenart	Werkstoffübergang	Anwendung
Kurzlichtbogen	Eintropfig, im Kurzschluss	- Dünnbleche in allen Lagen - Zwangslagen und Wurzellagen an mittleren und dicken Blechen
Sprühlichtbogen	Feinsttropfig, kurzschlussfrei	- Mittlere und obere Blechdicken in Wannenlage
Langlichtbogen	Grobtropfig, nicht kurzschlussfrei	- Mittlere und obere Blechdicken in Wannenlage
Impulslichtbogen	Einstellbare Tropfengröße, kurzschlussfrei	- Zwangslagen an hochlegierten Stählen, Leichtmetallen und Kupfer

Tabelle 5: Lichtbogenarten beim MSG-Schweißverfahren [8]

##### 4.10.2.1 Kurzlichtbogen

Um im Kurzlichtbogenbereich zu arbeiten, müssen niedrige Strom- und Spannungswerte eingestellt werden. Durch den Lichtbogen wird das Drahtelektrodenende aufgeschmolzen, es löst sich aber kein Tropfen von der Elektrode. Durch die kontinuierliche Drahtzufuhr und das

dadurch bedingte Tropfenwachstum kommt es zum Kurzschluss zwischen Werkstück und Elektrode, der den Tropfen durch den so genannten „Pincheffekt“ abschnürt und in das Schmelzbad übergehen lässt. Der Lichtbogen zündet wieder durch ionisierte Metaldämpfe, und der Prozess beginnt erneut. Je nach Einstellung der Schweißparameter beträgt die Tropfenfrequenz etwa 20 bis 120 Tropfen pro Sekunde. Schweißspritzer lassen sich bei diesem Werkstoffübergang meist nicht vermeiden [3],[4].

#### **4.10.2.2 Sprühlichtbogen**

Bei Verwendung von Argon und argonreichen Mischgasen führt eine Erhöhung der Stromstärke und damit der Wärmeeinbringung zur Ausbildung des Sprühlichtbogens. Im Gegensatz zum Kurzlichtbogen nehmen die Tropfenzahl zu und das Tropfenvolumen ab. Dabei bleibt die Lichtbogenlänge nahezu konstant, und der zeitliche Verlauf von Schweißspannung und -strom ist sehr gleichmäßig. Aufgrund der größeren, im Prozess umgesetzten Energie entsteht ein großes, überhitztes und damit dünnflüssiges Schmelzbad, das sich besonders gut zum Schweißen von dicken Blechen in Wannennlage und horizontalen Positionen eignet. Die Schweißnaht ist glatt und flach [3],[4].

#### **4.10.2.3 Langlichtbogen**

Der Langlichtbogen stellt sich bei hohen Stromstärken ein. Es bilden sich große Tropfen, die überwiegend durch Schwerkrafteinfluss ins Schmelzbad übergehen. Gelegentlich kommt es zu Kurzschlüssen, die wiederum Spritzer erzeugen. Der Einsatzbereich ist dem des Sprühlichtbogens gleichzusetzen. Die Schweißnahtoberfläche ist jedoch grob geschuppt und stärker überhöht, was zu Nacharbeit führt. Deshalb wird in der Industrie meist ein teureres Mischgas verwendet, welches das Ausbilden des Sprühlichtbogens ermöglicht und keine Nacharbeit der Schweißnaht erfordert. Dadurch wird insgesamt eine kostengünstigere Fertigung ermöglicht [3],[4].

#### **4.10.2.4 Impulslichtbogen**

Die Impulslichtbogentechnik macht es möglich, auch bei geringeren Schweißstromstärken einen kurzschlussfreien Werkstoffübergang zu ermöglichen. In der Regel wird bei der Impulslichtbogentechnik zwischen einem niedrigen, unterkritischen Grundstrom, der dem Kurzlichtbogenbereich entspricht, und einem höheren, überkritischen Impulsstrom umgeschaltet. In der Grundphase wird die Lichtbogenstrecke ionisiert sowie die Drahtelektrode und das Werkstück vorgeheizt, in der Impulsphase wird der Werkstoff aufgeschmolzen und durch die magnetischen Kräfte (Pincheffekt) abgelöst. Möglich ist dies nur unter Gasen, die den Sprühlichtbogen ermöglichen, wie Argon, Helium und argonreiche

Mischgase. Mit Einführung der transistorisierten Stromquellen wurde es möglich, durch freie Wahl des Stromverlaufes die Tropfenablösung nach den Erfordernissen einzustellen [3].

#### 4.11 Schweißlötten – im Detail CMT

Beim Schweißlötten, welches eine Art von Fugenlötten darstellt und Arbeitstemperaturen über 450 °C verwendet, verbleibt einer der zwei zu verbindenden Werkstoffe im festen Zustand, während der zweite teilweise aufgeschmolzen wird. Das wird erreicht, indem der Lichtbogen auf das Aluminium gerichtet wird, wodurch nur dieses aufschmilzt. Der höherschmelzende Stahl bleibt im festen Zustand. Als Zusatzwerkstoffe für die Verbindungsschweißung finden dem jeweiligen Aluminiumgrundwerkstoff angepasste Aluminiumlegierungen Verwendung [7],[26],[23].

#### Cold metal transfer (CMT)

Der von Fronius International entwickelte Cold-Metal-Transfer (CMT) Prozess basiert auf einer primärgetakteten MIG/MAG Inverterstromquelle und ist folgend schematisch dargestellt.

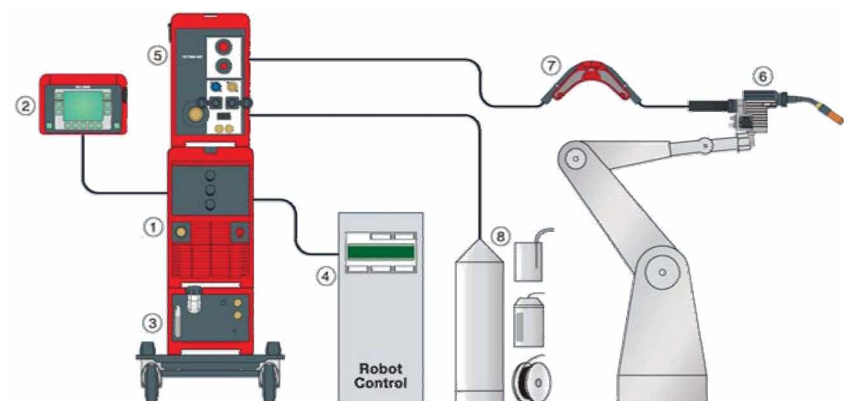


Abbildung 9: Schematische Darstellung des CMT Schweißsystems [9]

Das CMT Schweißsystem besteht aus den Modulen Stromquelle (1), Fernbedieneinheit (2), Kühlgerät (3), Roboterinterface (4), Drahtvorschub (5), Roboterschweißbrenner (6), dem Drahtpuffer (7) und der Drahtversorgung (8).

Im Vergleich zum konventionellen System wurden in der Stromquelle (1) ein Funktionspaket für den CMT-Prozess, im Drahtvorschub (5) Anschlüsse Richtung Stromquelle und Antriebseinheit, im Roboterschweißbrenner (6) ein getriebeloser AC Servomotor für schnelle Änderung der Drahtfördergeschwindigkeit und ein Drahtpuffer (7) zur Entkoppelung der beiden Drahtantriebe bzw. zur Speicherung von Draht integriert.

In Abbildung 10 ist die CMT-Lichtbogenkennlinie in die verschiedenen Lichtbogenbereiche beim MSG-Schweißen eingetragen.

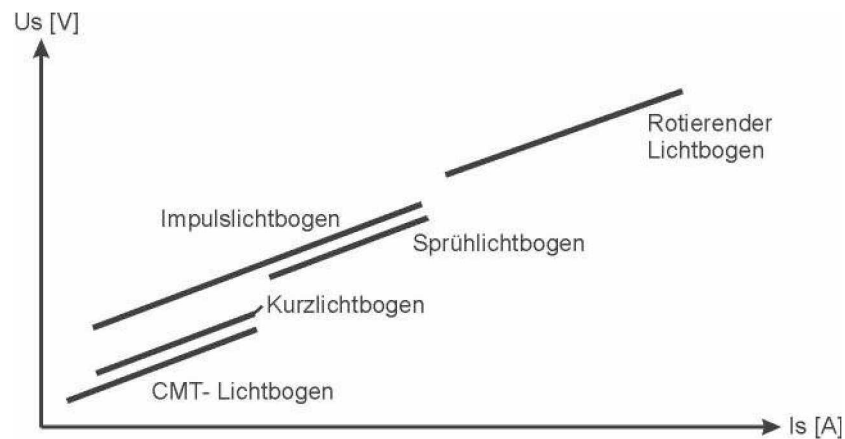


Abbildung 10: Lichtbogenbereiche beim MSG Schweißen [1]

Das Prinzip dieses Kurzlichtprozesses mit nahezu stromlosem Werkstoffübergang basiert darauf, dass die Drahtbewegung direkt in die Prozessregelung eingebunden wird. Dadurch wird der Tropfenübergang des im Lichtbogen aufschmelzenden Zusatzdrahtes durch eine mechanische Pulsung kontrolliert. Abbildung 11 zeigt eine schematische Darstellung dieses Ablaufes und in Abbildung 12 wurde dieser Vorgang mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen.

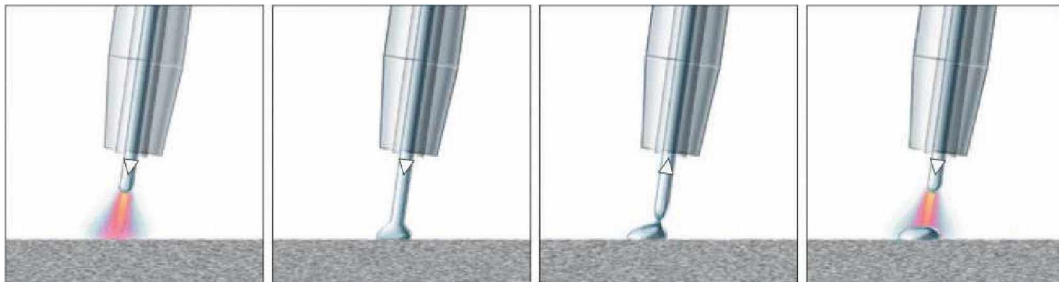


Abbildung 11: Schematische Darstellung des CMT-Prozesses [9]

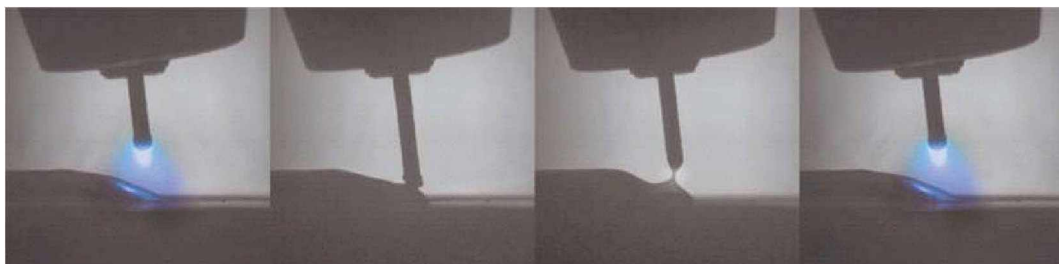


Abbildung 12: Hochgeschwindigkeitsaufnahme des CMT-Prozesses [9]

Der Zusatzwerkstoff wird solange nach vorne bewegt, bis ein Kurzschluss erzeugt wird. Anschließend wird der Zusatzdraht zurückgezogen, und unterstützt die Trägheitskraft der Tropfenmasse zu deren Ablösung. Diese mechanische Pulsung kann mit einer Frequenz von bis zu 70 Hz betrieben werden. Weiters ist es möglich die mechanische Pulsung (CMT) zyklisch mit der Strompulsung (Impulslichtbogen) abzuwechseln, um eine erhöht

Spaltüberbrückung oder eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit zu erreichen. Diese Wechselfolge von CMT-Zyklen und Impuls-Zyklen zeigt Abbildung 13.

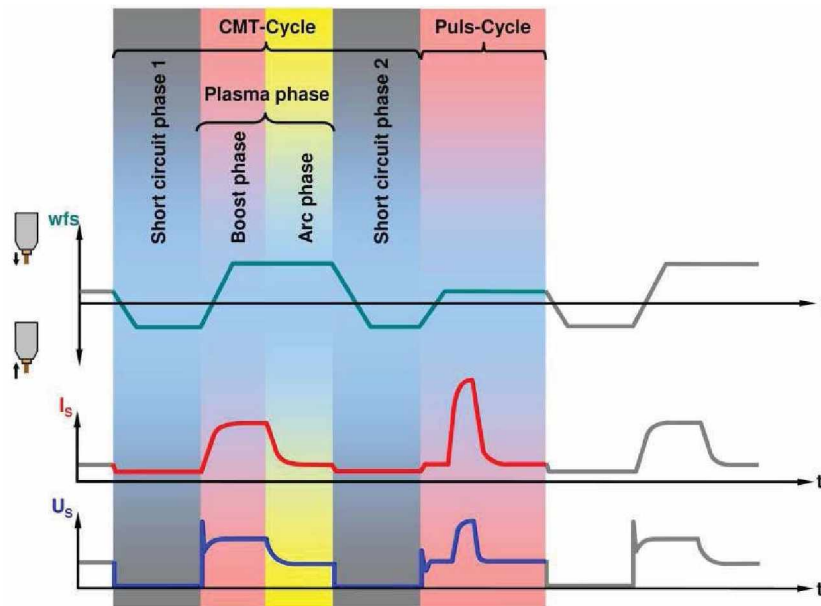


Abbildung 13: Phasen beim CMT-Pulsmix Prozess [9]

Die technologischen Kernpunkte dieses Verfahrens sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt:

- Der Wärmeeintrag des CMT-Lichtbogens ist infolge der mechanischen Pulsung sehr gering und darüber hinaus gut steuerbar.
- Der Tropfenübergang im Lichtbogen ist praktisch spritzerfrei.
- Auch nichtlineare Nähte sind herstellbar.
- Im Vergleich zu konventionellen MSG-Verfahren ist die Regelung der Lichtbogenlänge sehr präzise.
- Die Spaltüberbrückbarkeit ist wesentlich höher als bei konventionellen MSG-Verfahren.
- Die Schweißlötgeschwindigkeit liegt im Bereich von 0,5 m/min bis 0,9 m/min.
- Die Investitionskosten sind sehr gering.

## 5 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel sind die Methoden der Werkstoffcharakterisierung dargestellt. In weiterer Folge wird auch auf die Vorversuche eingegangen, die zur Prüfung der grundsätzlichen Schweißeignung der beiden Werkstoffe Stahl-Aluminium durchgeführt wurden.

## 5.1 Methoden der Werkstoffcharakterisierung

Im Folgenden werden die Untersuchungen genauer erläutert, die für die Charakterisierung der IMP bzw. zur Auswertung der Schweißproben verwendet wurden.

### 5.1.1 Lichtmikroskopie

Die Beurteilung der intermetallischen Phasengrenzschicht (Dimension, Morphologie,...) erfolgte mit Hilfe der lichtoptischen Metallographie. Die Proben sind zur besseren Handhabbarkeit in ein Kalteinbettmittel eingegossen, auf SiC-Papier der Körnungen 240, 600 und 1200 vorgeschliffen und anschließend mit Diamantsuspension und „OPS“ poliert worden. Dadurch ist keine Ätzung erforderlich, da beim OPS-Polieren eine ähnliche Stoffabtragung stattfindet.

Zur Beurteilung der Schriffe kam das Mikroskop MM-40, Ser.Nr. 1302503 der Fa. Nikon und der Bildanalyse CLEMEX Vision Professional zum Einsatz.

Von jeder Schweißprobe wurde eine Gesamtaufnahme (Mosaik) des Schliffs sowie ein Detailbild angefertigt.

### 5.1.2 Rasterelektronenmikroskop (REM-EDX)

Die rasterelektronischen Untersuchungen erfolgten an einem Rasterelektronenmikroskop der Marke FEI, Typ Quanta 3D mit angebaute EDX-Analyseneinheit der Firma Oxford.

### 5.1.3 Nanointender

Das Rasterkraftmikroskop (AFM) DI Dimension 3100, des Erich Schmid Institutes für Materialwissenschaft, kann mit einem Messkopf (Hysitron Triboscope) zur Durchführung von Nanoindentierungsversuchen versehen werden. Dies entspricht einer konventionellen Härtemessung, allerdings im viel kleineren Maßstab. Der Messkopf, im Wesentlichen ein Dreiplattenkondensator, wird auf den Scanner anstelle des Federarmes (Cantilevers) montiert (Abbildung 14). An der mittleren Kondensatorplatte ist ein Stift eingeschraubt, der an seinem unteren Ende eine Diamantspitze trägt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung kommt es zu Auftreten einer Kraft auf die mittlere Kondensatorplatte und die Spitze wird dabei in eine Probenoberfläche gedrückt. Gleichzeitig verschiebt sich über die Kapazitätsänderung des Kondensators die mittlere Kondensatorplatte und somit auch die Spitze. Die Ergebnisse sind Kraft-Eindring-Kurven, aus denen die Härte und der elastische Modul der Phasen berechnet werden kann.

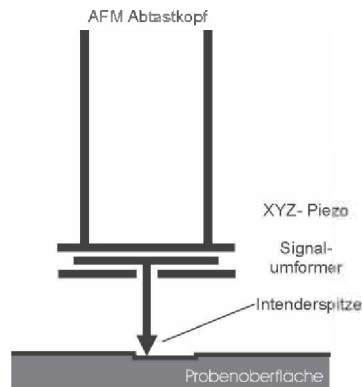


Abbildung 14: Prinzip Nanointender

Der spezielle Vorteil der Kombination des Indentierungsaufsatzes mit dem Rasterkraftmikroskop liegt darin, dass mit ein und derselben Messspitze die Oberfläche abgebildet werden und die Härtemessung durchführen kann, was eine sehr genaue Positionierung (20 nm) der Indentierung erlaubt; somit können kleinste Gefügebestandteile separat auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Abbildung 15 zeigt eine AFM-Aufnahme mit mehreren Härteeindrücken.

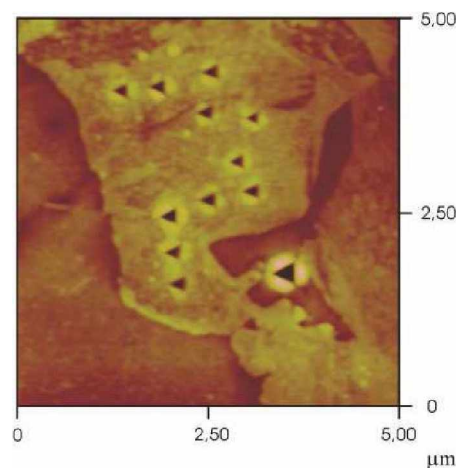


Abbildung 15: AFM-Aufnahme mit Härteeindrücken

#### 5.1.4 Zugprüfung

Die Zugversuche wurden an einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick (Zwick Z250) vorgenommen. Aus jeder der Proben wurden mind. 4 Zugproben gefertigt, um repräsentative Ergebnisse für die Festigkeitswerte zu erzielen. Die Abmaße der Zugproben für den Zugversuch betragen 280 x 30 mm, die Einspannlänge 170 mm. Die Versuche wurden mit einer Spannungszunahmegeschwindigkeit von  $20 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  und anschließend einer Dehngeschwindigkeit von  $0,008 \text{ s}^{-1}$  durchgeführt.

In Abbildung 16 ist die Geometrie der Zugproben ersichtlich. Der genormte Querzugversuch EN 895 für Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen kann in diesem Fall nicht eingehalten werden. Dieser gilt ausschließlich für Stumpfnähte.

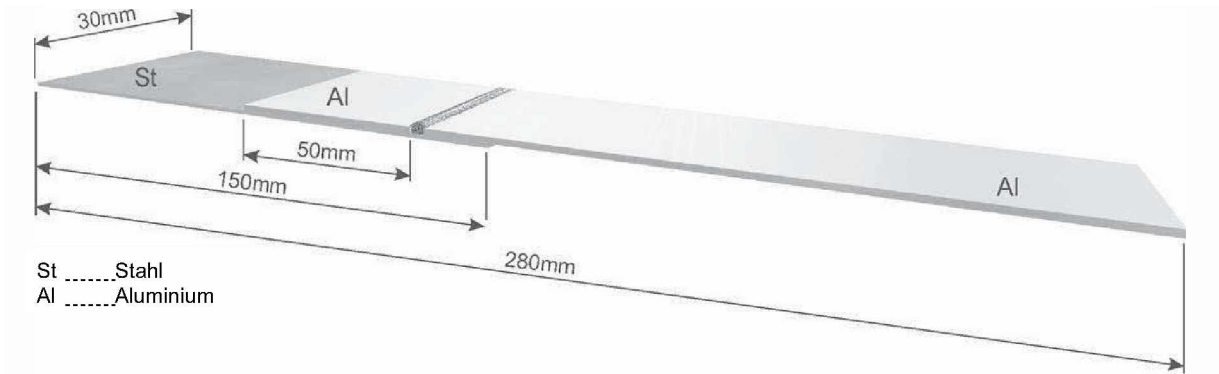


Abbildung 16: Geometrie der Zugproben

Des Weiteren konnte aufgrund der überlappenden Form der Proben kein Dehnungsaufnehmer angebracht werden. Daher ist der Einfluss durch die Maschinenauffederung auf die ermittelten Werte für den Elastizitätsmodul nicht zu vermeiden. Um den Einfluss eines Biegemoments auf die Schweißnaht möglichst gering zu halten, wurde auf eine zentrale Lage der Schweißnaht geachtet. Darüber hinaus erfolgte die Einspannung aller Zugproben mit der gleichen Ausrichtung (Stahlplatte oben, Aluminiumplatte unten).

#### Bestimmung der Kennwerte

Grundlage für die Bestimmung der mechanischen Kennwerte ist die Last-Verlängerungs-Kurve. Diese wird in eine technische Spannungs-Dehnungs-Kurve umgerechnet. In Abbildung 17 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Werkstoffes mit ausgeprägter Streckgrenze dargestellt. Daraus können folgende Werte ermittelt werden:

- Dehngrenze bei nichtproportionaler Dehnung  $R_p$
- Zugfestigkeit  $R_m$ : Die höchste Spannung im technischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm
- Bruchdehnung A: Die plastische Dehnung nach dem Bruch
- Bruchspannung: Die Spannung zum Zeitpunkt des Bruchs

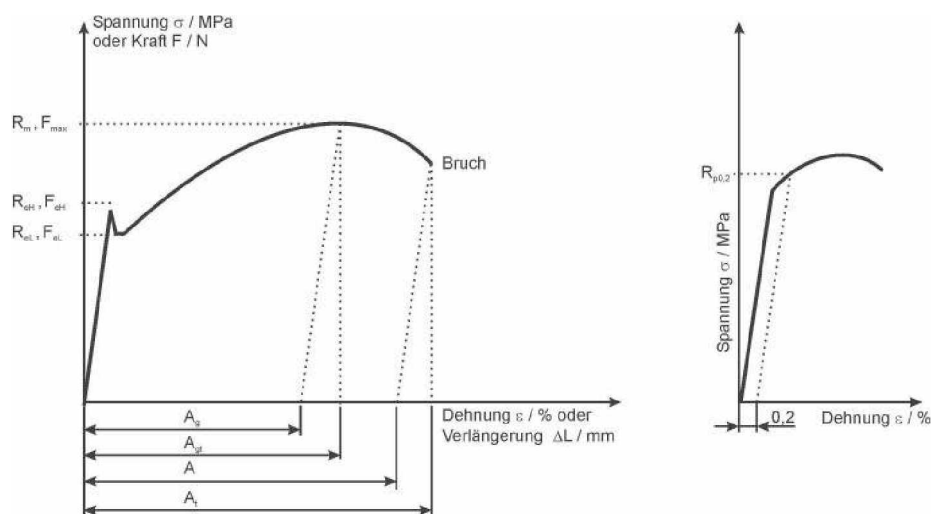


Abbildung 17: Allgemeines Spannungs-Dehnungs-Diagramm [5]



## 5.1.5 Phasenbestimmung mittels eines thermodynamischen Modells

Thermodynamische Modelle eignen sich aufgrund einer schnellen Voraussage über die sich bildenden intermetallischen Phasen. Einen wichtigen Zusammenhang bei der Ausbildung der IMP und der Charakterisierung derselben ist die Wechselwirkung der Begleitelemente, vor allem Silizium und Mangan. Die Berechnungen erfolgten mit FactSage. Dieses Modell wurde auch schon in früheren Untersuchungen für die Firma Fronius verwendet. In diesem Kapitel wird nun auf die Einzelheiten dieses Modells eingegangen. Die Basis bildet das unter Abbildung 1 dargestellte Phasendiagramm. Die verwendeten Datenbanken sind lückenhaft, aber dennoch konnte der Einfluss von Mangan und Silizium auf die Phasen  $\text{FeAl}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  ideal berechnet werden. Es sind also keine Einflüsse wie Temperaturgradient, Erstarrungsgeschwindigkeiten und Seigerungen berücksichtigt [21].

### 5.1.5.1 Einfluss von Silizium

Diese Datenbank beinhaltet nur die  $\text{FeAl}_3$  als Reinphase. Die Phase  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  ist zwar thermodynamisch vorhanden, kann hier aber nicht explizit berechnet werden. Die  $\text{FeAl}_3$  Phase wird mit zunehmendem Si-Gehalt zu niedrigeren Al-Konzentrationen verschoben (Abbildung 18).

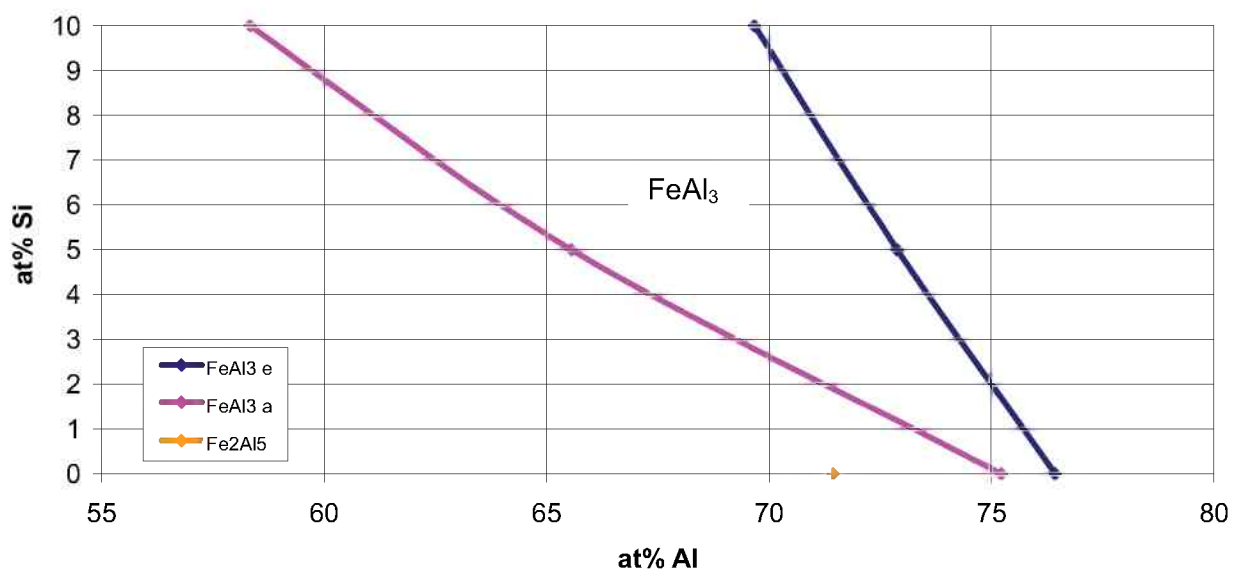


Abbildung 18: Einfluss von Silizium auf die IMP bei 300 K, e Ende, a Anfang [21]

### 5.1.5.2 Einfluss von Mangan

In der Datenbank sind beide Phasen vorhanden. Mit zunehmendem Mn-Gehalt (Ordinate) werden die  $\text{FeAl}_3$ - und die  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ -Phasen zu geringeren Al-Gehalten verschoben. Weiters erweitert sich der Beständigkeitsbereich der  $\text{FeAl}_3$ -Phase (Abbildung 19).

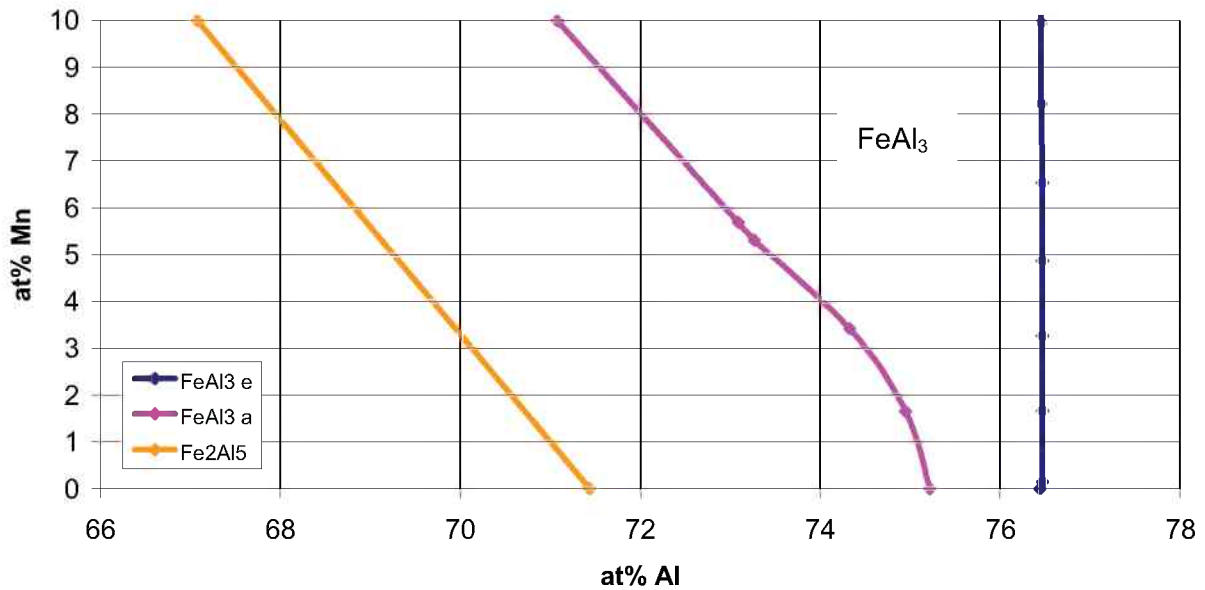


Abbildung 19: Einfluss von Mangan auf die IMP bei 300 K, e Ende, a Anfang [21]

### 5.1.5.3 Einfluss von Mangan und Silizium

Da es sich bei diesen Betrachtungen um Mehrstoffsysteme handelt, werden dreidimensionale Systeme oder quasibinäre Schnitte zur Phasenbestimmung herangezogen. Die 3D-Darstellung der FeAl<sub>3</sub>-Phase in einem Fe-Al-Mn-Si System ist in Abbildung 20 wiedergegeben.

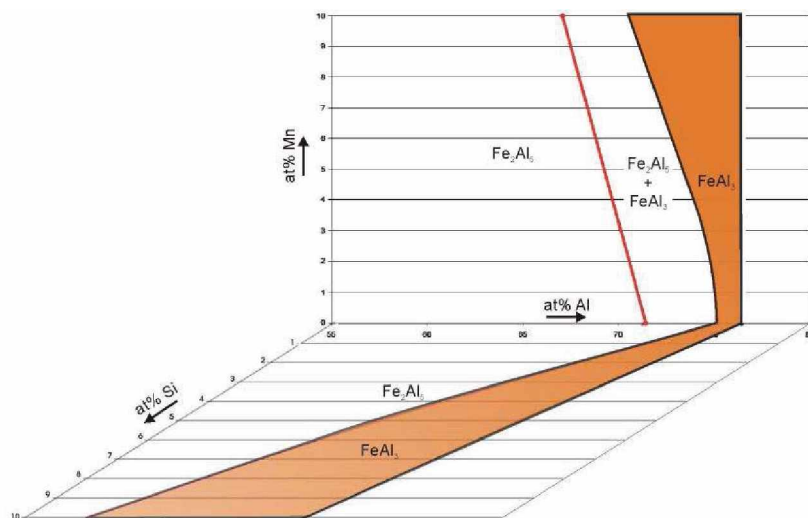


Abbildung 20: Einfluss von Mn und Si auf die IMP bei 300 K [21]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Elemente Mn und Si den Beständigkeitsbereich der FeAl<sub>3</sub>-Phase erweitern, diesen aber zu geringeren Al-Gehalten verschieben.

Da Mangan und Silizium vor allem durch die Lotlegierung eingebracht werden, ist die Wechselwirkung von Si auf das System Fe-Al-Mn wichtig. In Abbildung 21 ist der Einfluss von 0, 2 und 4 % Si auf die FeAl<sub>3</sub>-Phase dargestellt. Mit zunehmenden Si-Gehalt verbreitert

sich der Beständigkeitsbereich von 73,5 – 76,5 at%, Differenz 3 %, auf 67,7 – 73,5 at%, Differenz 5,8 %, Al bei 5 % Mangan.

Zu erwähnen ist eine Einschnürung im Bereich von 2 % Mangan und das mit zunehmenden Si- und Mn-Gehalt die Phase zu geringeren Al-Gehalten verschoben wird. [21]

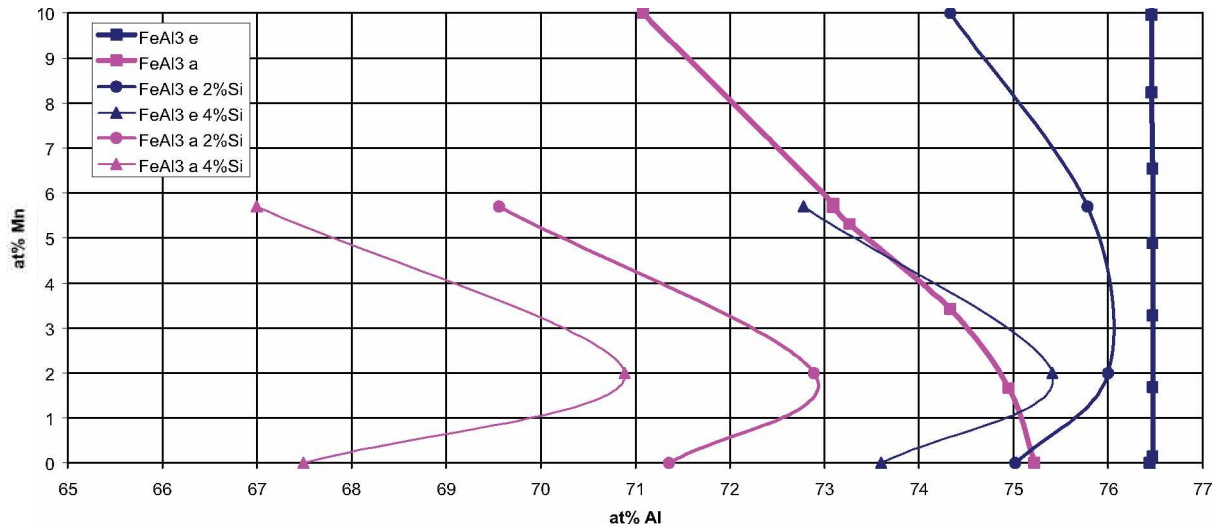


Abbildung 21: Einfluss von Mn und variablem Si-Gehalt auf die IMP bei 300 K, e Ende, a Anfang [21]

#### 5.1.5.4 Modellierung der thermodynamischen Betrachtungen

Der wichtigste Punkt bei thermodynamischen Berechnungen ist die Modellierung der Ergebnisse, um eine rasche und effektive Vorhersage der zu erwartenden Phasen zu ermöglichen. Unter Berücksichtigung der Wechselwirkung der Elemente Fe, Al, Mn und Si ist folgender Verlauf des Beständigkeitsbereiches analytisch abgeleitet. Dessen Beeinflussung der Al-reichen Seite (Abbildung 21: dunkelblaue Linie) der  $\text{FeAl}_3$ -Phase ist durch Gleichung (1) beschrieben.

$\text{FeAl}_3$ -Beginn:

$$\%Al_{\text{Neu}} = 76,44 - (0,02 \cdot \%Mn + 0,68 \cdot \%Si) \quad (1)$$

Die Veränderung durch Legierungselemente des  $\text{FeAl}_3$ -Endes (Abbildung 21, magenta-färbige Linie) ist mit der Gleichung (2) dargestellt. Für die Schweißungen ist der Beständigkeitsbereich von  $\text{FeAl}_3$  und da der Übergang in das Zweiphasengebiet, wo die Phasen  $\text{FeAl}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  vorhanden sind, ausschlaggebend.

$\text{FeAl}_3$ -Ende:

$$\%Al_{\text{Neu}} = 75,22 - (0,42 \cdot \%Mn + 1,87 \cdot \%Si) \quad (2)$$

Die Gleichung (2) ist sehr stark vom Si-Gehalt abhängig, d.h. aber auch, dass die  $\text{FeAl}_3$ -Phase vom Si-Gehalt stärker beeinflusst wird als vom Mn-Gehalt.

### 5.1.5.5 Anwendung des Modells

Die aus dem REM-EDX erhaltenen Konzentrationen werden in das thermodynamische Modell eingetragen. Als Ergebnis wird ein Phasendiagramm mit entsprechend auftretender Phase ausgegeben.

### 5.1.6 Benetzungsversuche

Um gute Schweißverbindungen herzustellen ist es notwendig, dass der Lotwerkstoff auf der Stahlplatte breit ausfließt um eine möglichst große Fläche des Stahles zu bilden. Die dafür erforderlichen Benetzungswinkel sollten also möglichst gering sein. Die Unterschiede in der Benetzungsfähigkeit der einzelnen Lotwerkstoffe auf einer Stahloberfläche werden bei diesen Versuchen erarbeitet. Auch ein möglicher Einfluss durch eine Oberflächenaktivierung des Stahles kann bei diesen Versuchen geklärt werden.

#### *Durchführung der Versuchsreihe*

Mithilfe eines WIG-Brenners wurde der Lotwerkstoff bis zum Schmelzpunkt erhitzt, und der sich daraus bildende Metalltropfen auf die Stahlplatte gebracht. Hieraus ergeben sich Fehler, da nicht jeder Metalltropfen dieselbe Größe aufweist. Mit diesem, relativ einfachen, Versuch kann die Benetzungsfähigkeit anhand des Benetzungswinkels verschiedener Lotwerkstoffe gemessen werden.

### 5.1.7 Oberflächencharakterisierung – optische Profilometrie

Die Oberflächenmessungen wurden mit dem Veeco Wyko NT 1000, optischen Weißlicht Profilometer durchgeführt. Die Versuche dienten der Oberflächendarstellung der unterschiedlich verfestigten Stahlbleche.

#### 5.1.7.1 Messprinzip

Bei interferometrischen Verfahren wird die Probe durch einen Strahlteiler hindurch mit weißem oder monochromatischem Licht beleuchtet. Der abgelenkte Teil des Strahls wird auf einen Spiegel geworfen. Das von der Probe zurückreflektierte Licht ("Probenlicht") wird zusammen mit dem vom Spiegel kommenden "Referenzlicht" auf einem CCD abgebildet. Abhängig von der Höhenstruktur der Probe, kommt es im Lichtfeld zu unterschiedlichen Weglängenunterschieden von Referenzlicht und Probenlicht: auf dem CCD bildet sich ein komplexes Interferenzmuster aus. Für jede Messung wird der Abstand zwischen Probe und Messkopf in mehreren hundert bis tausend Schritten verändert und das entstehende Interferenzmuster aufgenommen. Algorithmen berechnen aus diesen Informationen die Topographie der Probe (siehe Abbildung 22) [19].

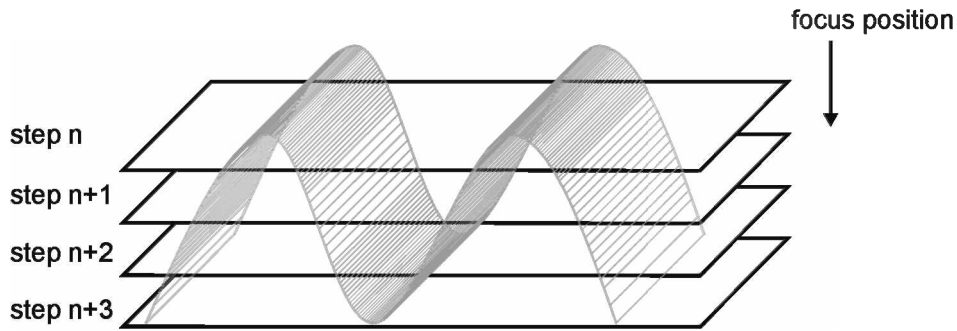


Abbildung 22: Messprinzip Profilometer [19]

Der Aufbau des Messgeräts ist in Abbildung 23 dargestellt.

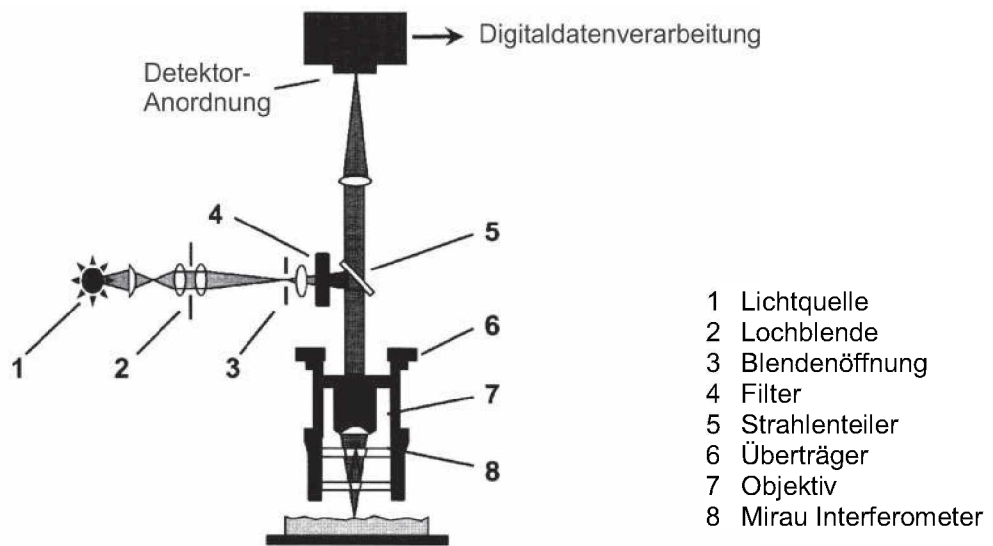


Abbildung 23: Aufbau des Profilmeters [19]

### 5.1.7.2 Begriffe der Oberflächenrauigkeit nach DIN EN ISO 4287

#### 1. *Arithmetischer Mittenrauhwert, Ra*

Dieser Mittelwert setzt sich aus den Beträgen der Ordinatenwerte innerhalb der Messstrecke  $l_r$  zusammen. Abbildung 24 zeigt den Mittenrauhwert in einer graphischen Darstellung.

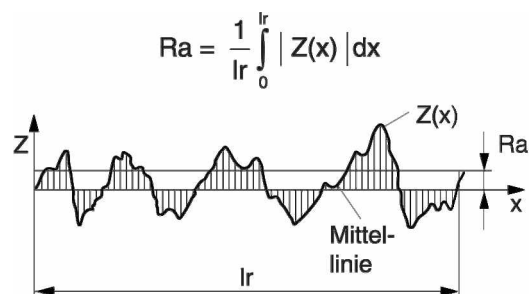


Abbildung 24: Arithmetischer Mittenrauhwert Ra [5]

## 2. Quadratischer Mittenrauhwert, $R_t$

Dieser Wert ist ähnlich zum arithmetischen Mittenrauhwert, jedoch werden die einzelnen Beiträge der Ordinatenwerte quadriert und der Mittelwert gebildet.

## 3. Größte Höhe des Rauheitsprofils, $R_z$

Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltales innerhalb einer Einzelmessstrecke  $l_r$ . Anmerkung: Diese Definition nach DIN EN ISO 4287 unterscheidet sich durch den Bezug auf eine Einzelmessstrecke von der früheren nach DIN 4768, welche  $R_z$  als Mittelwert der Einzelwerte von fünf aufeinander folgenden Einzelmessstrecken definierte. Da aber nach DIN EN ISO 4288: 1998  $R_z$  üblicherweise als arithmetisches Mittel aus den größten Profilhöhen von fünf Einzelmessstrecken errechnet wird, entspricht dieser Wert für  $R_z$  wieder dem früheren Zahlenwert  $R_z$ . Abbildung 25 zeigt eine graphische Darstellung dieses Rauhwertes.

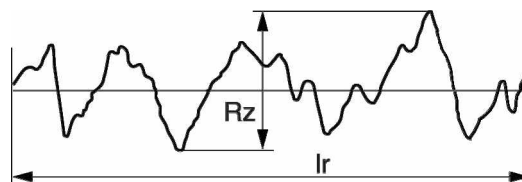


Abbildung 25: Rauhwert  $R_z$  [5]

## 4. Gesamthöhe des Rauheitsprofils $R_t$ :

Die Gesamthöhe des Rauheitsprofils setzt sich aus der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltales innerhalb einer Messstrecke  $l_n$  zusammen. Anmerkung: Da die Messstrecke  $l_n$  aus mehreren Einzelmessstrecken  $l_r$  besteht, s. u., gilt, dass  $R_t$  größer oder gleich  $R_z$  ist. Abbildung 26 zeigt die graphische Darstellung dieses Rauhwertes.

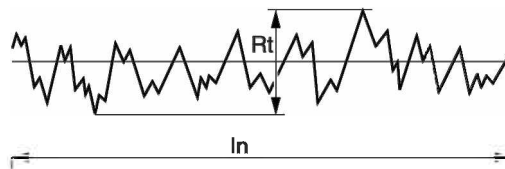


Abbildung 26: Rauhwert  $R_t$  [5]

## 5.2 Werkstoffkombinationen

Als Ausgangswerkstoffe dienen die in Tabelle 6 angeführten Materialien.

	Werkstoff	Blechdicke bzw. Drahtdurchmesser [mm]
Stahlplatte	DX 54 - unbehandelt - walzhart - kugelgestrahlt	1,2
Aluminiumplatte	Al 99,5 AlMgSi1	1,5
Zusatzwerkstoff	Al 99,5 AlSi5 AlSi3Mn	Ø 1,4

Tabelle 6: Eingesetzte Werkstoffe

Aus diesen Werkstoffen ergeben sich, dargestellt in Abbildung 27, 24 verschiedene Materialkombinationen, die untersucht wurden.

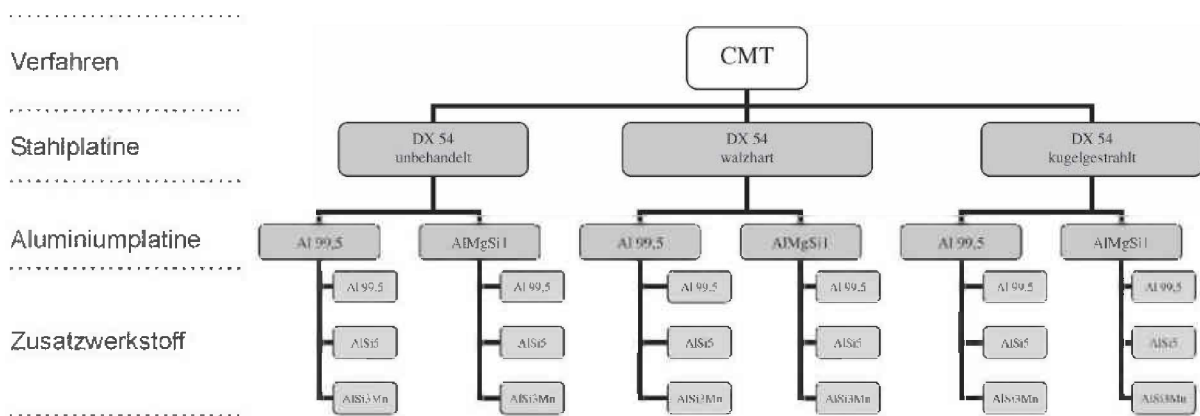


Abbildung 27: Mögliche Werkstoffkombinationen

## 5.3 Vorversuche

Um eine Schweißverbindung zwischen Aluminium und einem unverzinkten Stahlblech herzustellen, wurde zu Beginn eine Vorversuchsserie gestartet sodass die prinzipielle Schweißbarkeit der beiden Fügepartner untersucht wurde. Versuche zeigten, dass eine Verbindung von Aluminium mit unverzinktem Stahl möglich ist, jedoch wurden die Versuche in Verbindung mit einem Flussmittel durchgeführt. Das Flussmittel, welches als Fülldraht zugegeben wurde, enthielt Anteile an CsF, AlF<sub>3</sub> und KF. Diese Verbindungen sind jedoch

umweltlich problematisch, Verdampfung während des Schweißprozesses, weshalb ein Verzicht auf diese Stoffe wünschenswert wäre. [20]

In der Vorversuchsserie wurden nun Probeschweißungen durchgeführt, um eine geeignete Geometrieform für die Herstellung der Schweißproben zu finden.

### 5.3.1 Überlappnähte

Nach zahlreichen Probeschweißungen und Änderungen der Schweißparameter musste von der ursprünglichen Nahtgeometrie weggegangen werden.

Bei sämtlichen Schweißungen bildete sich keine gleichmäßige Schweißnaht. Der Lichtbogen wurde immer in Richtung des Materials abgelenkt, welches die höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist – in die Aluminiumplatte. Ein weiteres Problem war die sehr schlechte Benetzbarkeit der Stahlplatte gegenüber dem flüssigen Aluminiumlotwerkstoff. Diesem wurde durch Flussmittel versucht entgegenzuwirken. Doch es konnten keine reproduzierbaren Schweißverbindungen hergestellt werden. Das Flussmittel der Marke Silux F6S ist ein auf Wasser basierendes Flussmittel. Schon hier ergeben sich die ersten Probleme aufgrund der Bildung von Poren in der Schweißnaht. Auch in der Praxis stellte sich das Arbeiten mit dem Flussmittel als sehr unhandlich heraus, da die Dicke des Flussmittelauftrags über die gesamte Schweißnaht sehr unterschiedlich war. Ein weiterer großer Nachteil des Flussmittels waren seine korrosiven Eigenschaften, sodass die geschweißten Proben sehr stark korrodierten. Als nächster Schritt wurde eine andere Geometrieform gewählt.

### 5.3.2 Bördelstoss

Auch bei dieser Geometrie zeigte sich nach den Parameterstudien, dass auch hier dieselben Probleme wie beim Überlappstoß auftraten. Der Lichtbogen brannte in Richtung Aluminium und es kam zu keinen durchgehenden Schweißnähten, sondern es trat immer eine Ablösung und damit Tropfenbildung des Aluminiumlotes auf der Stahloberfläche auf.

Weiters wurde Flussmittel eingesetzt, was allerdings zu keiner Verbesserung bezüglich der Schweißnaht führte.

*Probleme bei diesen Probeschweißungen:*

- schlechte Benetzbarkeit des Stahles bezüglich dem flüssigen Aluminiumlot.
- durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums im Gegensatz zum Stahl wird der Lichtbogen verzerrt, und abgelenkt.

Deshalb wurde versucht durch eine geeignete Geometrieform diesen beiden Effekten entgegenzuwirken.



### 5.3.3 Spezielle Geometrieform

In Abbildung 28 ist die Geometrieform dargestellt, mit der es möglich war Stahl und Aluminium ohne Flussmittleinsatz zu verbinden.

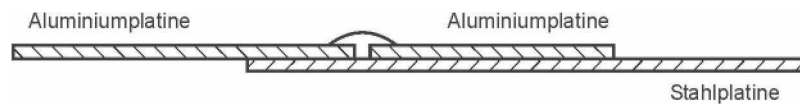


Abbildung 28: Spezielle Geometrieform

Durch die beidseitige Anordnung der Aluminiumbleche wird der Lichtbogen während des Schweißprozesses nicht mehr abgelenkt, und somit bildet sich eine gleichmäßige Schweißnaht aus. Auch die schlechte Benetzbarkeit der Stahlplatte kommt bei dieser Geometrie nicht sehr stark zum Tragen.

Das CMT-Verfahren bietet bei der Wahl der Schweißparameter viele Möglichkeiten. In den Vorversuchen wurde nun eine Optimierung der Schweißparameter durchgeführt.

### 5.4 Herstellung der Schweißproben

Sämtliche Schweißungen wurden mit dem CMT-Pulsmix Verfahren durchgeführt. Abbildung 29 zeigt die verwendete Geometrie bzw. Werkstoffe.



Abbildung 29: Schweißgeometrie im Überblick

Bei den Schweißungen ergab sich ein Optimum des Abstandes der zwei Aluminiumbleche von 3 mm. Die Länge der Schweißnaht betrug bei allen Schweißverbindungen 185 mm. Aus diesen Verbindungen wurden jeweils drei Proben, Schweißnaht-anfang, -mitte und -ende,

hergestellt und je ein metallographischer Schliff angefertigt. In Abbildung 30 sind die Stellen der Probenahme dargestellt. Die Schweißparameter für die einzelnen Schweißungen sind im Anhang zusammengefasst.

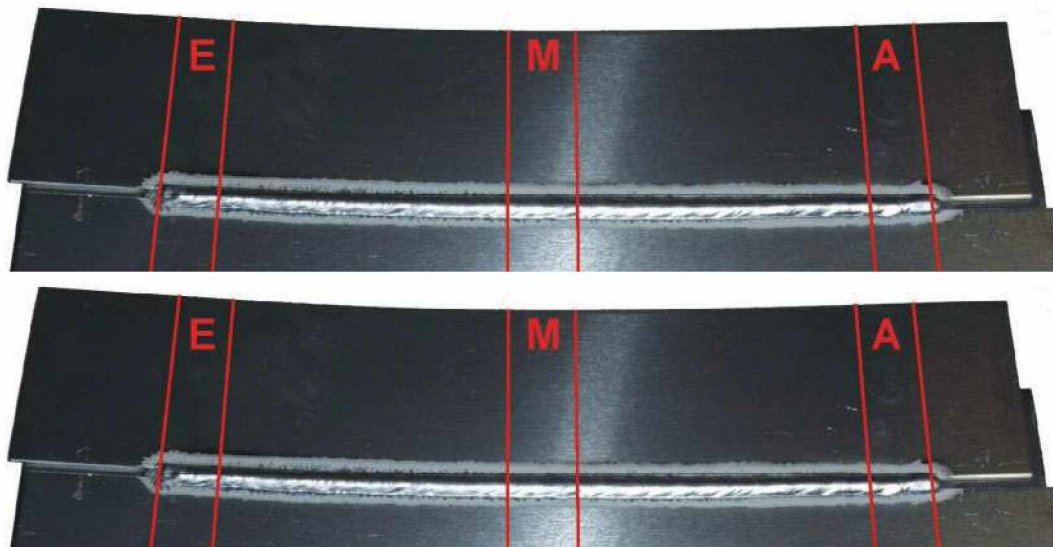


Abbildung 30: Geschweißte Platine

## 6 Ergebnisse und Diskussion

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Kapitel jeder verwendete Zusatzwerkstoff und seine Auswirkung auf die Schweißnaht explizit behandelt.

### 6.1 Ergebnisse der Profilometeruntersuchungen

Hierbei wurden die drei unterschiedlich verfestigten Stahlbleche untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in der Abbildung 31 - 32 dargestellt.

In der linken Spalte ist jeweils die Topographie der Stahloberfläche angeführt, mit den jeweils gemessenen Rauhwerten. Die rechte Spalte zeigt jeweils die 3-dimensionale Darstellung der Oberfläche.

Die Rauhwerte des unbehandelten Stahlblechs unterscheiden sich nur sehr gering vom walzarten Stahlblech. Dieses zeigt im Vergleich zur unbehandelten Stahlplatte eine gleichmäßigere Oberfläche.

Ra: 1,93  $\mu\text{m}$       Rz: 15,87  $\mu\text{m}$   
Rq: 2,28  $\mu\text{m}$       Rt: 23,14  $\mu\text{m}$

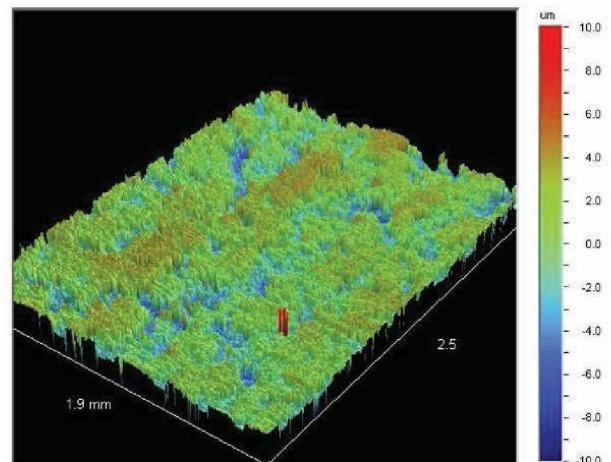
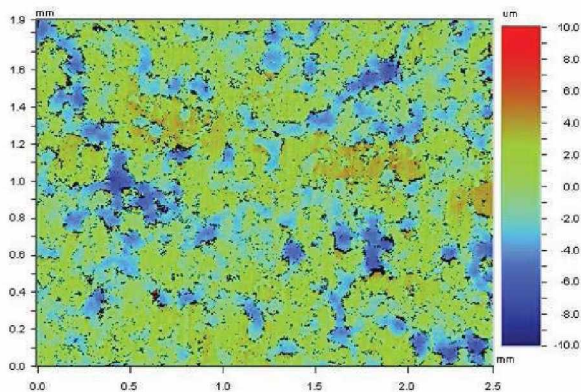


Abbildung 31: Rauhwerte und Topographie des Stahles DX54-unbehandelt

Ra: 1,96  $\mu\text{m}$       Rz: 14,09  $\mu\text{m}$   
Rq: 2,29  $\mu\text{m}$       Rt: 24,11  $\mu\text{m}$

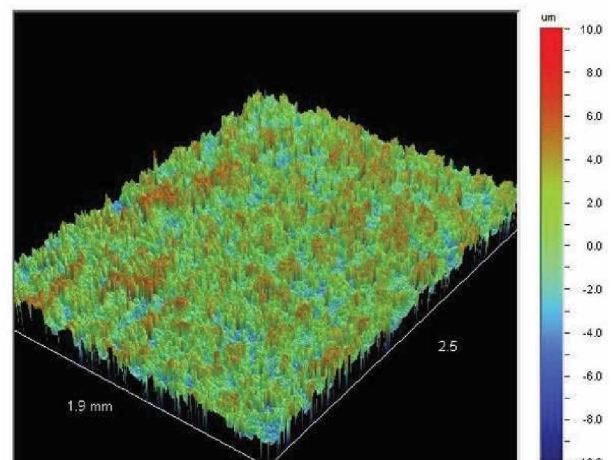
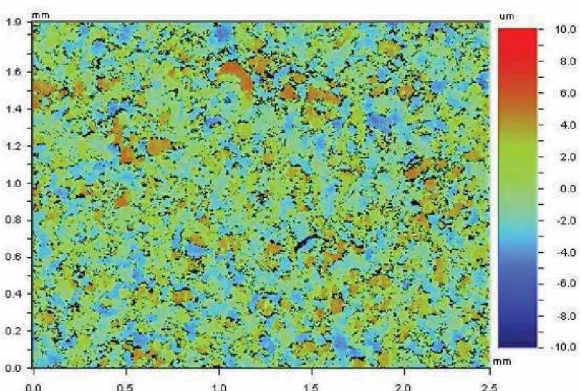


Abbildung 32: Rauhwerte und Topographie des Stahles DX54-walzhart

Ra: 17,59  $\mu\text{m}$     Rz: 126,8  $\mu\text{m}$   
 Rq: 21,83  $\mu\text{m}$     Rt: 137,27  $\mu\text{m}$

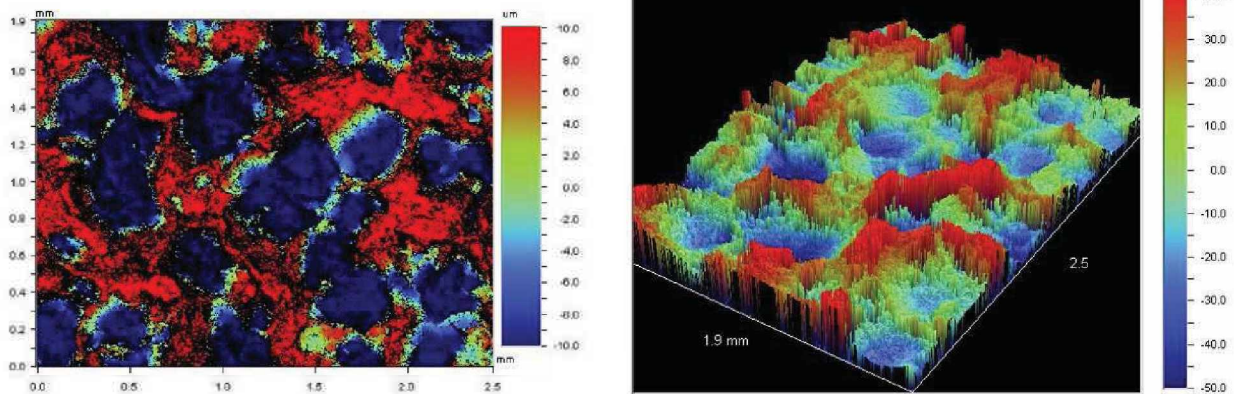


Abbildung 33: Rauhwerte und Topographie des Stahles DX54-kugelgestrahlt

Die kugelgestrahlte Stahlplatte weist eine sehr stark verformte Oberfläche auf. Der Einfluss dieser Oberflächenverformung wird bei Benetzungsversuchen geklärt.

## 6.2 Ergebnisse der Benetzungsversuche

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Benetzungsversuche zusammengestellt. Mit dem Zusatzwerkstoff Al 99,5 wurden generell sehr hohe Winkel gemessen. Die schlechteste Benetzung trat unter der Verwendung des unbehandelten Stahlbleches auf. Bei der Verwendung eines walzarten Stahlbleches wurde der Benetzungswinkel kleiner, bzw. noch geringer unter Verwendung der kugelgestrahlten Stahlplatte.

Dieser Trend trat auch bei den Zusatzwerkstoffen AlSi3Mn und AlSi5 auf. Die beste Benetzung wurde mit dem Zusatzwerkstoff AlSi5 und der kugelgestrahlten Stahlplatte erreicht.

Lot \ Stahl	Al 99,5	AlSi3Mn	AlSi5
unbehandelt			
walzhart			
kugelgestrahlt			

Tabelle 7: Tropfenausbildung der einzelnen Lotwerkstoffe

Silizium fördert die Fließfähigkeit des Aluminiums, d.h. die Benetzbarkeit steigt mit dem Siliziumgehalt. Dabei wurde die beste Benetzung mit dem Zusatzwerkstoff AlSi5 erzielt, gefolgt von dem Zusatzwerkstoff AlSi3Mn. In Tabelle 8 sind die Benetzungswinkel der einzelnen Lotwerkstoffe mit den Stahlplatten zusammengefasst.

Zusätzlich wurde auch noch eine Versuchsserie mit einer verzinkten Stahlplatte durchgeführt, wobei sich die gute Schweißbarkeit des verzinkten Stahlbleches bemerkbar machte – die Benetzungswinkel lagen unter  $40^\circ$  und weisen somit eine sehr gute Benetzungsfähigkeit auf.

Stahlplatte	Zusatzwerkstoff		
	Al 99,5	AlSi3Mn	AlSi5
DX 54 unbehandelt	112	107	94
DX 54 walzhart	98	97	90
DX 54 kugelgestrahlt	91	78	65
DX 54D verzinkt	<40	<40	<40

Tabelle 8: Benetzungswinkel der verschiedenen Lotwerkstoffe

## 6.3 Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff Al 99,5

Bei diesen Verbindungen kam jeweils die Aluminiumplatte Al99,5 bzw. AlMgSi1 zum Einsatz.

### 6.3.1 Aluminiumplatte Al 99,5

Untersucht wurden die Schweißungen mit unterschiedlich verfestigten Stahlplatten.

#### 6.3.1.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Abbildung 34 zeigt eine Übersichtsaufnahme der Schweißung mit einer walzhaften Stahlplatte. Poren sind nur sehr vereinzelt vorhanden.

In Abbildung 35 ist eine Detailaufnahme der Schweißung zu sehen. Die intermetallische Phase ist deutlich zu erkennen, wobei die Morphologie mit dem Lichtmikroskop nur schwer untersucht werden konnte.

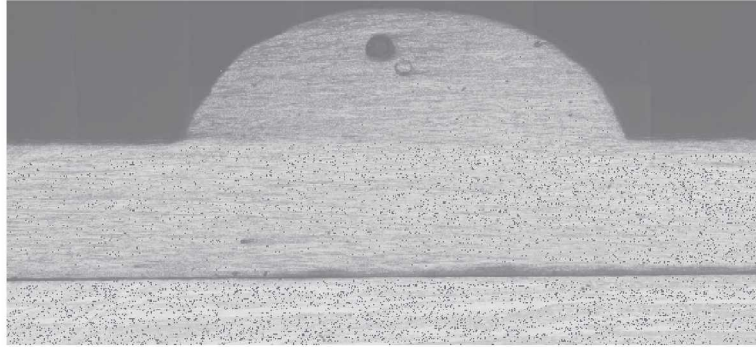


Abbildung 34: Übersichtsaufnahme 25x



Abbildung 35: Schliffbild Al 99,5 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart 500x

### 6.3.1.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX)

Mit dieser Untersuchung konnte die intermetallische Schicht genauer betrachtet werden. Abbildung 36 zeigt eine Rasteraufnahme von einer walzharten Stahlplatte.



Abbildung 36: REM-Aufnahme: Al 99,5 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart

Deutlich ist hier die fingerförmige Struktur der intermetallischen Phase zu erkennen. Die Grenzfläche zu Aluminium ist sehr gleichmäßig, und die intermetallische Phase wächst in den Stahl. Die Dicke der Schicht liegt im Mittel bei 4,5 µm.

Unter Verwendung einer unbehandelten bzw. einer kugelgestrahlten Stahlplatte zeigen sich dieselben Formen der intermetallischen Phase. Die Schichtdicken liegen bei der unbehandelten Stahlplatte als auch bei der kugelgestrahlten Platte bei  $3,6\ \mu\text{m}$ .

Mit dem REM-EDX konnte auch eine chemische Analyse der IMP durchgeführt werden. Es wurden jeweils an 10 verschiedenen Punkten der IMP ein Analysepunkt gesetzt. Die erhaltenen Konzentrationen korrelieren sehr gut, und die Mittelwerte sind in Tabelle 9 eingetragen.

Stahlplatte	at% Al	at% Fe
unbehandelt	69,6	30,4
walzhart	69,6	30,4
kugelgestrahlt	68,3	31,7

Tabelle 9: REM-EDX-Analyse der IMP

Anhand dieser chemischen Analysen wird die Phase  $\text{FeAl}_2$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  erwartet (Vergleich Abbildung 1).

### 6.3.1.3 Versuche am Nanointender

Am Nanointender konnte nur die walzharte Stahlplatte untersucht werden. Abbildung 37 zeigt die Kraft-Eindringkurve für die walzharte Stahlplatte. Auch hier tritt nur eine sehr geringe Streuung der Messwerte auf.

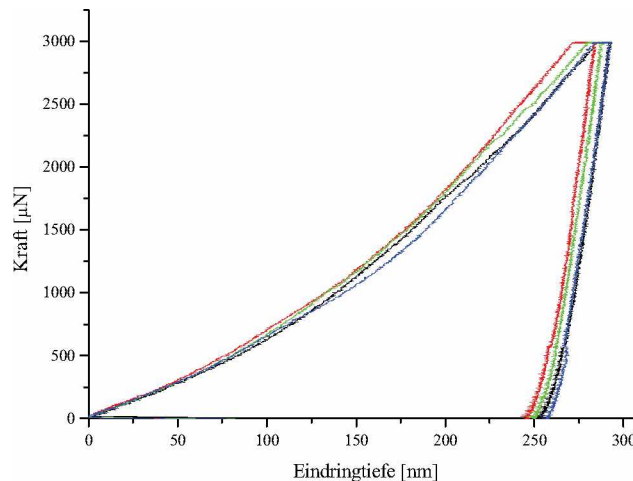


Abbildung 37: Kraft-Eindringkurve

Aus den Mittelwerten dieser Kurven kann die Härte berechnet werden. Der E-Modul dieser Phase beträgt  $9,01\ \text{GPa}$  und die Härte liegt bei  $1076\ \text{HV}$ . Damit lässt sich auf die Phase  $\text{FeAl}_2$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  schließen.

### 6.3.1.4 Thermodynamisches Modell

Auf die Charakterisierung durch das thermodynamische Modell kann bei dieser Materialkombination verzichtet werden, da es in diesem Fall keinen Einfluss von anderen Legierungselementen gibt.

### 6.3.1.5 Zugprüfung

Geprüft wurden die Kombinationen mit der unbehandelten und der walzharten Stahlplatte. Das kugelgestrahlte Stahlblech brach bereits bei der Herstellung der Zugproben. Prinzipiell traten bei der Zugprüfung zwei unterschiedliche Brucharten auf. Abbildung 38 zeigt einen duktilen Bruchverlauf. Dabei bricht die Zugprobe in der Wärmeeinflusszone des Aluminiums. Hingegen ist in Abbildung 39 ein Sprödbbruch in der Verbindungsstelle zu sehen. Bei dieser Art des des Bruchs tritt keine Verformung auf und die Probe bricht vollkommen spröde.



Abbildung 38: Duktiler Bruch im Aluminium (WEZ)

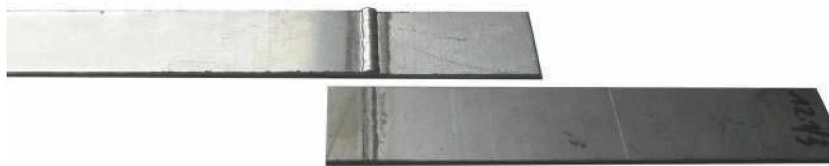


Abbildung 39: Sprödbbruch in der Verbindungsstelle

Abbildung 40 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die Schweißung der walzharten Stahlplatte. Der Mittelwert der Zugspannung liegt bei  $78,5 \text{ Nmm}^{-2}$ . Diese Kombination mit einer walzharten Stahlplatte brach in der Wärmeeinflusszone des Aluminiums, wobei eine Dehnung von 1,3 % im Mittel auftrat.

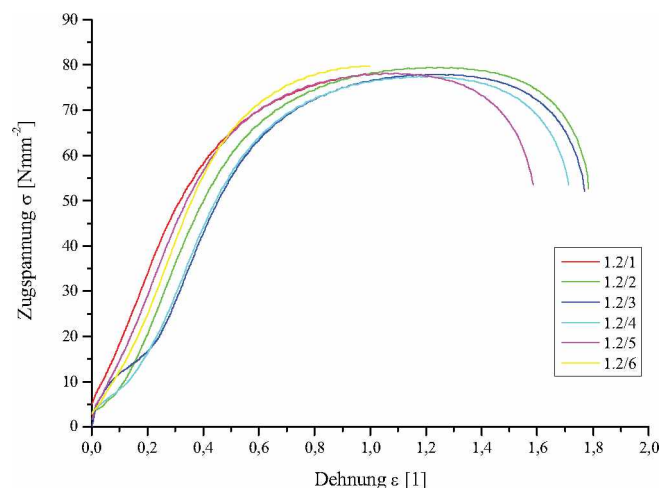


Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm



Die Schweißungen der Bleche mit einer unbehandelten Stahlplatte hingegen wiesen nur sehr niedrige Zugfestigkeitswerte auf. Im Mittel lagen die Werte bei  $18 \text{ Nmm}^{-2}$  und daher wird vermutet, dass sich schon Risse bei der Abkühlung der Schweißproben, bzw. bei der Herstellung der Zugproben entstanden sind.

### 6.3.2 Aluminiumplatte AIMgSi1

Untersucht wurden die unterschiedlich verfestigten Stahlplatten mit dem Aluminiumgrundwerkstoff AIMgSi1.

#### 6.3.2.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Bei dieser Materialkombination trat bei allen Schweißproben eine starke Porenbildung auf. Abbildung 41 zeigt eine Übersichtsaufnahme der Schweißung mit einer unbehandelten Stahlplatte. Ein weiteres Problem war bei diesen Schweißungen auch die Auflage des Aluminiumbleches auf dem Stahlblech.

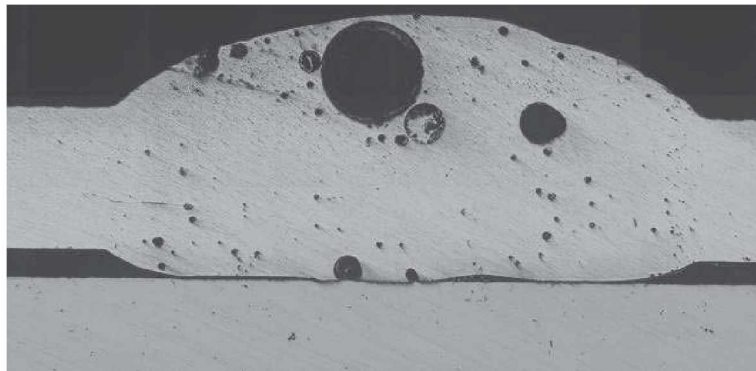


Abbildung 41: Übersichtsaufnahme 25x

In Abbildung 42 ist eine Detailaufnahme der Probe angegeben. Es wurde eine 500-fache Vergrößerung verwendet, doch die Schicht ist mit dem Lichtmikroskop nur schwer aufzulösen.



Abbildung 42: Schlibbild AIMgSi1 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart 500x

### 6.3.2.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX)

Abbildung 43 zeigt eine Rasteraufnahme von einer walzhaften Stahlplatine. Ähnlich wie zuvor bei der Verwendung der Aluminiumplatine Al 99,5 ist ein glatter Übergang zum Aluminium zu erkennen.



Abbildung 43: REM-Aufnahme: AlMgSi1 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart

Die intermetallische wächst grob und fingerförmig in den Stahl. Die Dicke der Schicht beträgt 4,5 µm, hingegen bei der Verwendung einer unbehandelten Stahlplatine liegt die Schichtdicke bei 6,3 µm.

Die chemische Analyse der intermetallischen Phase ist in Tabelle 10 eingetragen.

Stahlplatine	at% Al	at% Fe
unbehandelt	69,6	30,4
walzhart	69,6	30,4

Tabelle 10: REM-EDX-Analyse der IMP

Aufgrund der Analyse und dem Vergleich mit dem binären Zustandsdiagramm (Abbildung 1) werden die Phasen  $\text{FeAl}_2$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  erwartet.

Die Materialkombination, bei der eine kugelgestrahlte Stahlplatine verwendet wurde, ist bei der Probenherstellung gebrochen, und konnte nicht weiter untersucht werden.

### 6.3.2.3 Versuche am Nanointender

Untersucht wurde die walzharte Stahlplatine. Die Härte betrug 8,98 GPa bzw. umgerechnet 1068 HV und somit kann auch aus diesen Versuchen auf die Phasen  $\text{FeAl}_2$  bzw.  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  geschlossen werden.

### 6.3.2.4 Zugprüfung

Wie zuvor bei der Aluminiumplatine Al 99,5 konnte die Schweißprobe mit der kugelgestrahlten Stahlplatine nicht hergestellt werden. Die Festigkeitswerte der Schweißproben lagen bei der unbehandelten Stahlplatine bei  $40,2 \text{ Nmm}^{-2}$  bzw. bei Verwendung einer walzharten Stahlplatine bei  $55,1 \text{ Nmm}^{-2}$ . Anzumerken ist, dass die Werte beider Kombinationen starken Schwankungen unterliegen. Im Fall der walzharten Stahlplatine schwanken die Werte zwischen  $25 \text{ Nmm}^{-2}$  und  $86 \text{ Nmm}^{-2}$ , sodass auch bei dieser Probe von einem Riss ausgegangen werden muss.

### 6.3.2.5 Thermodynamisches Modell

Auch bei dieser Kombination wird auf das thermodynamische Modell nicht zurückgegriffen, da es sich wie zuvor um ein reines Zweikomponentensystem handelt.

## 6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Zusatzwerkstoffs Al 99,5

Bei der Verwendung von Al 99,5 als Zusatzwerkstoff ergeben sich bei beiden Aluminiumplatinen sehr große Schichtdicken. Die Ausbildung der intermetallischen Phase zeigt ebenfalls ein ähnliches Bild, wobei einerseits der Übergang der IMP zum Aluminium sehr glatt ist und andererseits die Verwachsungen in den Stahl bei beiden Aluminiumplatinen fingerförmig und sehr dicht sind.

Aufgrund der Analysen des REM-EDX ergeben sich bei beiden Aluminiumplatinen dieselben Analysen, wobei auch durch die Untersuchungen am Nanointender die Phasen  $\text{FeAl}_2$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  nachgewiesen wurden.

Die Zugfestigkeitswerte liegen in einem sehr niedrigen Bereich. Risse in den Schweißproben könnten diese niedrigen Werte erklären. Bei der Verwendung einer walzharten Stahlplatine und Al 99,5 als Aluminiumplatine brach die Schweißprobe im Aluminium. Alle anderen Proben brachen spröd.

## 6.5 Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff AlSi5

Dieser Zusatzwerkstoff zeigte bei Benetzungsversuchen die besten Eigenschaften. Auch hier wurden die Schweißverbindungen mit den zwei unterschiedlichen Aluminiumplatinen untersucht.

### 6.5.1 Aluminiumplatine Al 99,5

Die Untersuchungen mit dieser Aluminiumplatine erfolgten in Verbindung mit den drei unterschiedlich verfestigten Stahlplatinen.

### 6.5.1.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Abbildung 44 zeigt eine Übersichtsaufnahme der walzharten Stahlplatine. Es treten nur vereinzelt Poren auf, die aber eine geringe Größe aufweisen. Am linken Bildteil ist zu erkennen, dass die Aluminiumplatine nicht fest auf der Stahlplatine aufliegt, wobei dies bei den kugelgestrahlten Stahlplatinen noch stärker ausgeprägt ist.

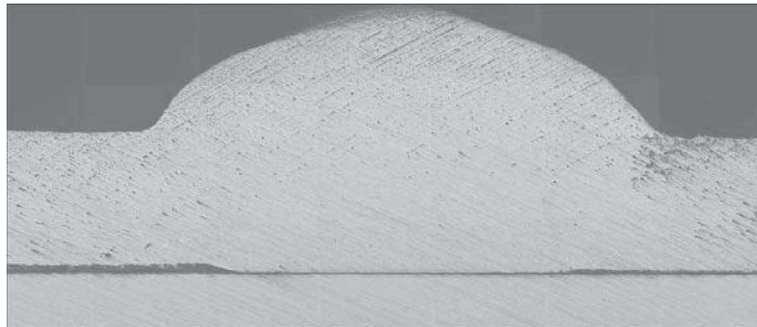


Abbildung 44: Übersichtsaufnahme 25x

Im Lichtmikroskop mit einer 500-fachen Vergrößerung ist die intermetallische Phase schwer zu erkennen, allerdings ist das typische Aluminium-Silizium-Gussgefüge deutlich zu sehen, siehe Abbildung 45: Schliffbild Al 99,5 – SG AISi5 – DX54 unbehandelt 500x.



Abbildung 45: Schliffbild Al 99,5 – SG AISi5 – DX54 unbehandelt 500x

### 6.5.1.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX)

Die intermetallische Schicht ist bei der Verwendung von AISi5 sehr dünn und beträgt bei der unbehandelten Stahlplatine nur  $0,9\ \mu\text{m}$ . Die Ausbildung der IMP ist in Abbildung 46 dargestellt. Die Grenzfläche zum Stahl ist relativ glatt, und die Phase wächst sehr fein verzahnt in das Aluminium. Die Schichtdicke beträgt bei der Verwendung einer walzharten Stahlplatine  $1,1\ \mu\text{m}$  und bei der kugelgestrahlten Platine  $2,6\ \mu\text{m}$ .



Abbildung 46: REM-Aufnahme: Al 99,5 – SG AISi5 – DX54 unbehandelt

Tabelle 11 gibt die chemische Analyse der IMP an. Wie aus der Analyse erkennbar, reichert sich Silizium stark in der intermetallischen Phase an.

Stahlplatine	at% Al	at% Fe	at% Si
unbehandelt	69,9	20,9	9,2
walzhart	70,4	20,9	8,7
kugelgestrahlt	69,7	21,4	8,9

Tabelle 11: REM-EDX Analyse der IMP

### 6.5.1.3 Versuche am Nanointender

Aufgrund des sehr geringen Schichtdicken konnte nur die Kombination mit einer kugelgestrahlten Stahlplatine untersucht werden. Die Härte wurde mit 886 HV bestimmt. Damit liegt sie im Vergleich mit der Literatur im Bereich der Phase  $\text{FeAl}_3$ .

### 6.5.1.4 Zugprüfung

Die Zugfestigkeitswerte erreichen bei der unbehandelten Stahlplatine  $49 \text{ Nmm}^{-2}$ , bei der walzharten Stahlplatine  $76,2 \text{ Nmm}^{-2}$  und bei Verwendung einer kugelgestrahlten Platine  $59,2 \text{ Nmm}^{-2}$ . Einzig die kugelgestrahlte Stahlplatine brach spröde. Die Kombination mit einer walzharten bzw. einer unbehandelten Stahlplatine wiesen einen duktilen Bruch auf. Die Dehnungen betragen 1,3 % bzw. bei der walzharten Platine 1,4 %.

### 6.5.1.5 Thermodynamisches Modell

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells kann die auftretende Phase charakterisiert werden. Aus den Versuchen am Nanointender wurde die Phase  $\text{FeAl}_3$  bestimmt.

In Abbildung 47 ist das Ergebnis der thermodynamischen Berechnungen dargestellt. Silizium erweitert das  $\text{FeAl}_3$ -Feld und somit ist auch noch bei niedrigeren Aluminiumgehalten die Phase  $\text{FeAl}_3$  stabil. In diesem Fall liegen aber alle Proben im Ausscheidungsfeld des  $\text{FeAl}_3$ .

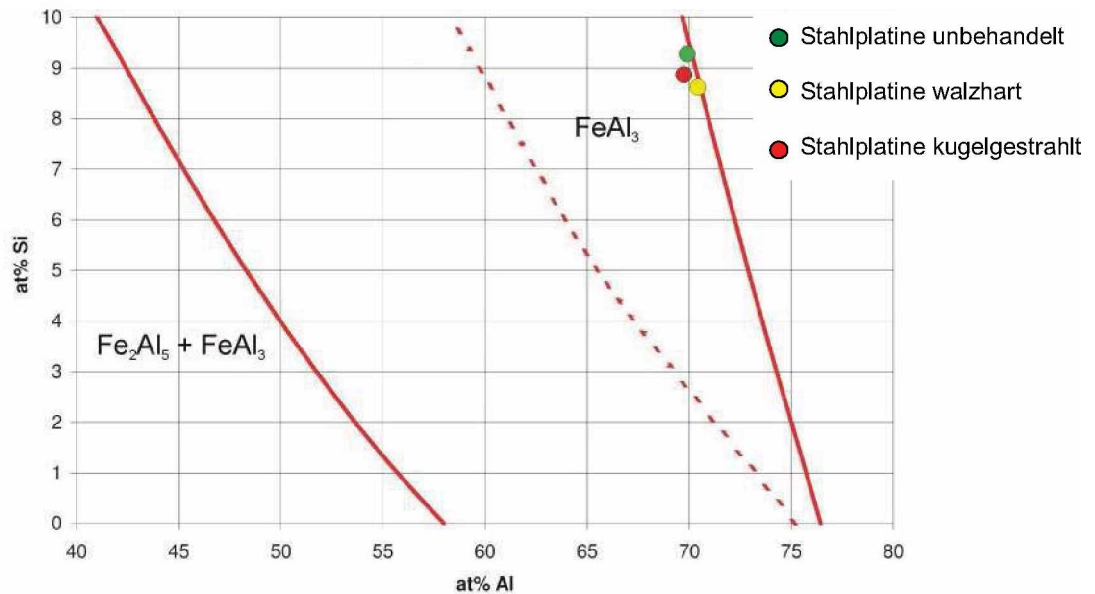


Abbildung 47: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells

Aus den Berechnungen geht hervor, dass sich bei der Verwendung von unterschiedlichen Stahlplatten stets die Phase  $\text{FeAl}_3$  bildet. Dies stimmt sehr gut mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen am Nanointender überein.

### 6.5.2 Aluminiumplatte AIMgSi1

Auch mit dieser Aluminiumplatte wurden die drei unterschiedlichen Stahlbleche untersucht.

#### 6.5.2.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Bei dieser Kombination kam es zu einer Porenbildung und Abbildung 48 zeigt eine Übersichtsaufnahme der Materialkombination mit einer unbehandelten Stahlplatte.

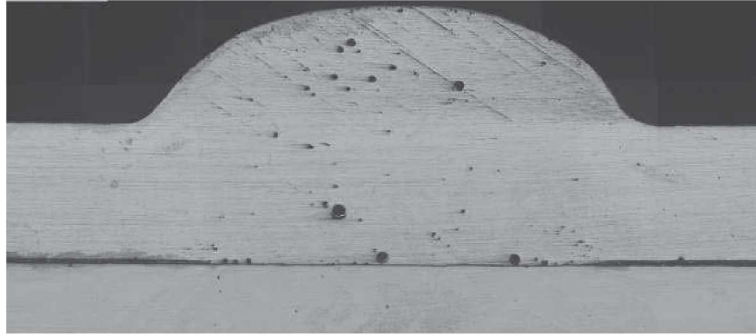


Abbildung 48: Übersichtsaufnahme 25x

Die Schicht ist mit dem Lichtmikroskop nur schwer aufzulösen (siehe Abbildung 49) und somit können durch die lichtmikroskopischen Untersuchungen keine Aussagen über die Morphologie der intermetallischen Phase getroffen werden.



Abbildung 49: Schliffbild AIMgSi1 – SG AISi5 – DX54 walzhart 500x

### 6.5.2.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX)

Im Vergleich zur Aluminiumplatte Al 99,5 mit dem Zusatzwerkstoff AISi5 treten auch hier nur sehr geringe Schichtdicken auf. In Abbildung 50 eine Rasteraufnahme einer walzharten Stahlplatte angegeben. Die Schichtdicke liegt im Bereich von 1 µm. Die Morphologie der Schicht ist selbst bei den Rasteraufnahmen nur schwer erkennbar, doch bei höheren Vergrößerungen ist eine feine Verzahnung mit dem Aluminiumlot erkennbar. Die Schicht ist sehr dicht und gleichmäßig aufgebaut und die Grenzfläche zur Stahlseite ist glatt.

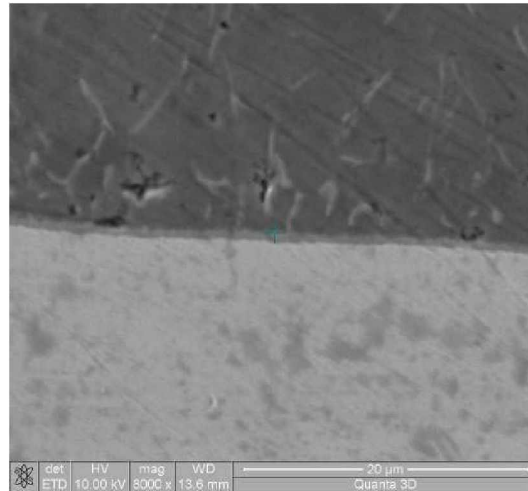


Abbildung 50: REM-Aufnahme: AlMgSi1 – SG AlSi5 – DX54 walzhart

Auch hier wurden die Phase chemischen analysiert und die Werte in Tabelle 12 eingetragen.

Stahlplatte	at% Al	at% Fe	at% Si
unbehandelt	72,4	21,0	6,6
walzhart	75,8	20,0	4,2
kugelgestrahlt	67,5	26,8	5,7

Tabelle 12: REM-EDX-Analyse der IMP

Silizium reichert sich in der intermetallischen Schicht an. Aufgrund der Analyse, und im Vergleich zur Aluminiumplatte Al 99,5 kann auch bei diesen Materialkombinationen die Phase  $\text{FeAl}_3$  erwartet werden.

### 6.5.2.3 Versuche am Nanointender

Untersucht wurde die Kombination mit einer walzharten Stahlplatte. Die Härte der Phase beträgt 770 HV. Aufgrund dieser Härte kann davon ausgegangen werden, dass die intermetallische Phase aus der Phase  $\text{FeAl}_3$  besteht.

### 6.5.2.4 Zugprüfung

Die Zugproben mit der Aluminiumplatte AlMgSi1 brachen ohne plastische Verformung. Jedoch erreichte die Zugfestigkeit hohe Werte. Die unbehandelte Stahlplatte wies eine Zugfestigkeit von  $102,1 \text{ Nmm}^{-2}$  bzw. die walzharte Platte eine Zugfestigkeit von  $90,4 \text{ Nmm}^{-2}$  auf.



### 6.5.2.5 Thermodynamisches Modell

Auch im Fall von AlMgSi1 als Aluminiumplatte kommt es zu einem einheitlichen Ergebnis bezüglich der auftretenden Phase (siehe Abbildung 51). Anhand des thermodynamischen Modells konnte die Phase  $\text{FeAl}_3$  nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse stimmen mit den zuvor ermittelten Härtewerten aus den Versuchen am Nanointender überein.

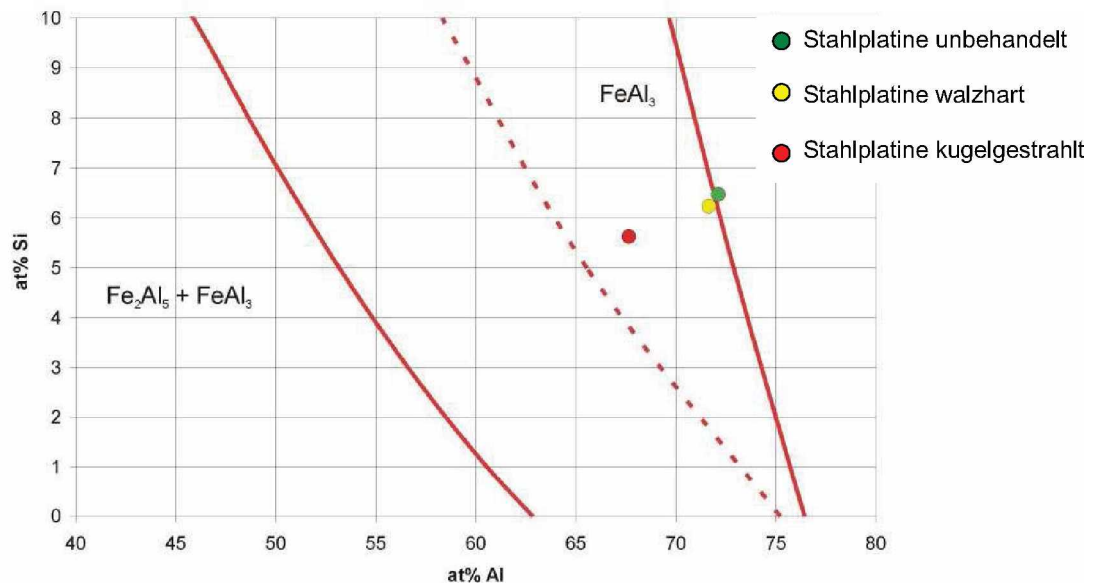


Abbildung 51: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells

## 6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse des Zusatzwerkstoffs AlSi5

Bei der Verwendung dieses Zusatzwerkstoffes ergeben sich in der Regel sehr dünne Schichten der intermetallischen Phase. Die Ausbildung der Phase und auch die Grenzfläche zum Stahl ist sehr gleichmäßig über die gesamte Schweißnaht. Die intermetallische Schicht ist mit dem Aluminiumlot fein verzahnt. Die Phase wurde aus den Versuchen am Intender und auch aus der Berechnung mittels der Thermodynamik als  $\text{FeAl}_3$  charakterisiert.

Die Festigkeiten liegen bei den beiden Aluminiumplatten doch deutlich auseinander. AlMgSi1 als Grundmaterial wies eine höhere Festigkeit auf. Allerdings brachen sämtliche Zugproben spröd.

## 6.7 Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff AlSi3Mn

Aus den Benetzungsversuchen zeigte sich, dass dieser Lotwerkstoff bezüglich des Benetzungswinkels zwischen den beiden anderen Lotwerkstoffen liegt. Wie zuvor wurden auch hier die zwei unterschiedlichen Aluminiumplatinen untersucht.

### 6.7.1 Aluminiumplatine Al 99,5

Auch mit diesem Zusatzwerkstoff, und der Verwendung der Aluminiumplatine AlMgSi1 sind die drei unterschiedlich verfestigten Stahlplatinen untersucht worden.

#### 6.7.1.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Die Ausbildung der Schweißnaht bei dieser Materialkombination ist sehr gleichmäßig. Die Schweißungen sind im Allgemeinen frei von Poren. Abbildung 52 zeigt eine Übersichtsaufnahme der Schweißnaht.

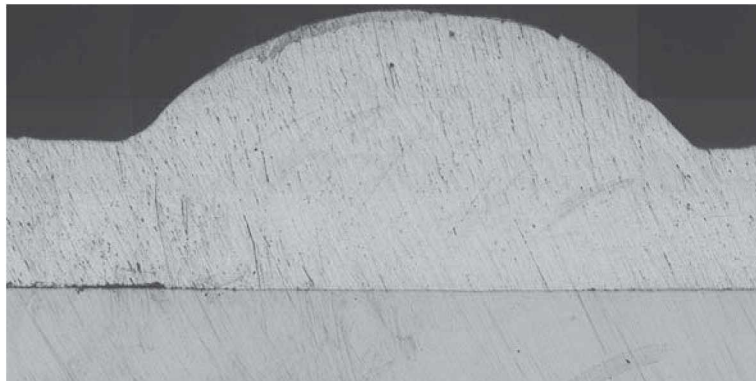


Abbildung 52: Übersichtsaufnahme 25x

Auf die Morphologie kann auch in diesem Fall nicht durch die lichtmikroskopischen Untersuchungen eingegangen werden. Erkennbar ist auch hier, dass typische Aluminium-Silizium-Gussgefüge des Lotwerkstoffes (Abbildung 53).



Abbildung 53: Schliffbild Al 99,5 – SG AlSi3Mn – DX54 unbehandelt 500x

### 6.7.1.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX)

Bei den Rasteraufnahmen zeigt sich aus den zuvor untersuchten Schweißnähten ein erwartetes Bild. Mit steigendem Siliziumgehalt wird die intermetallische Schicht dünner. Damit liegen bei der Verwendung des Zusatzwerkstoffs AlSi3Mn die Schichtdicken zwischen denen von Al 99,5 bzw. AlSi5 als Zusatzwerkstoff. Die intermetallische Phase ist sehr dicht. Diese Schicht weist einen sehr glatten Übergang zur Stahlseite auf. Deutlich erkennbar ist auch die Verzahnung mit dem Aluminiumlot. Diese Verzahnung ist noch stärker ausgeprägt als bei der Verwendung von AlSi5 (Abbildung 54).

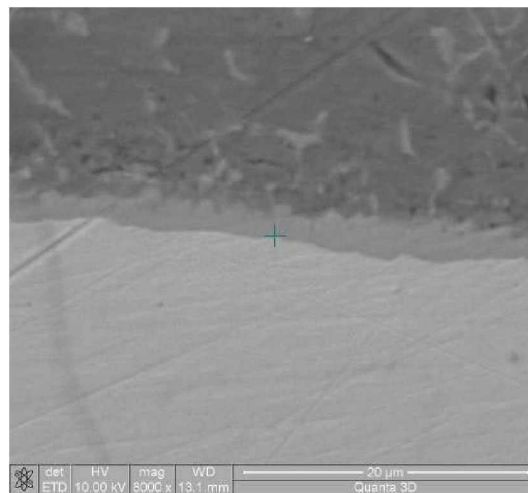


Abbildung 54: REM-Aufnahme: Al 99,5 – SG AlSi3Mn – DX54 walzhart

Tabelle 13 stellt die Werte die bei der Analyse mit dem REM-EDX ermittelt wurden dar. Silizium reichert sich in der IMP an und somit kann nur schwer eine Aussage darüber gemacht werden, welche Phase tatsächlich vorhanden ist.

Stahlplatte	at% Al	at% Fe	at% Si
unbehandelt	70,3	24,5	5,2
walzhart	70,3	25,6	4,1
kugelgestrahlt	66,1	29,9	4,0

Tabelle 13: REM-EDX Analyse der IMP

### 6.7.1.3 Versuche am Nanointender

Untersucht wurde die Kombination mit einer kugelgestrahlten Stahlplatte. Die Härte dieser Phase wurde mit 731 HV bestimmt. Damit liegt dieser Wert im Vergleich mit der Literatur an der unteren Grenze des  $\text{FeAl}_3$ .

### 6.7.1.4 Zugprüfung

Sämtliche Zugproben wiesen einen Spröbruch auf. Es kam zu keinen plastischen Verformungen. Die Zugfestigkeitswerte lagen bei der unbehandelten Stahlplatine bei  $66,1 \text{ Nmm}^{-2}$  und bei der walzharten Stahlplatine bei  $71,1 \text{ Nmm}^{-2}$ .

### 6.7.1.5 Thermodynamisches Modell

Mit Hilfe des Modells konnten die Aussagen aus den Versuchen am Nanointender überprüft werden. Abbildung 55 gibt das Resultat der thermodynamischen Berechnungen an.

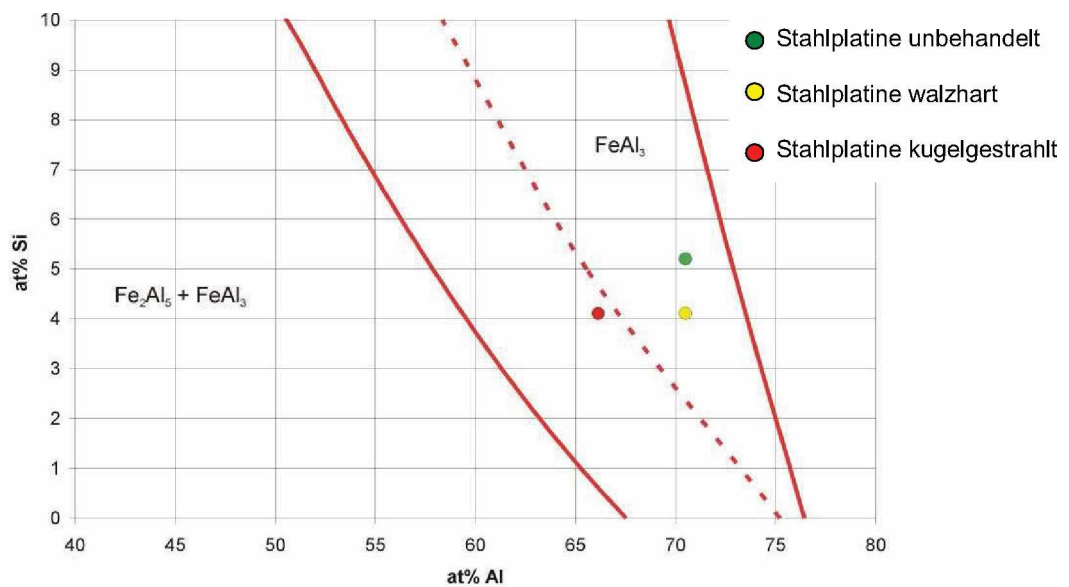


Abbildung 55: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells

Als gutes Beispiel sei hier die kugelgestrahlte Stahlplatine angeführt. Silizium erweitert das Stabilitätsfeld der Phase  $\text{FeAl}_3$ . Somit ist auch noch bei niedrigeren Aluminiumkonzentrationen die Phase  $\text{FeAl}_3$  stabil.

Aus diesen Berechnungen geht hervor, dass bei sämtlichen Stahlplatinen stets die Phase  $\text{FeAl}_3$  auftritt.

## 6.7.2 Aluminiumplatine AlMgSi1

Die Untersuchungen erfolgten wie zuvor an den drei unterschiedlich verfestigten Stahlplatten.

### 6.7.2.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Bei der Verwendung von AlMgSi1 als Aluminiumplatine kommt es zu einer starken Porenbildung. Auch bei dieser Werkstoffkombination zeigt sich dasselbe Verhalten und ist in Abbildung 56 dargestellt.

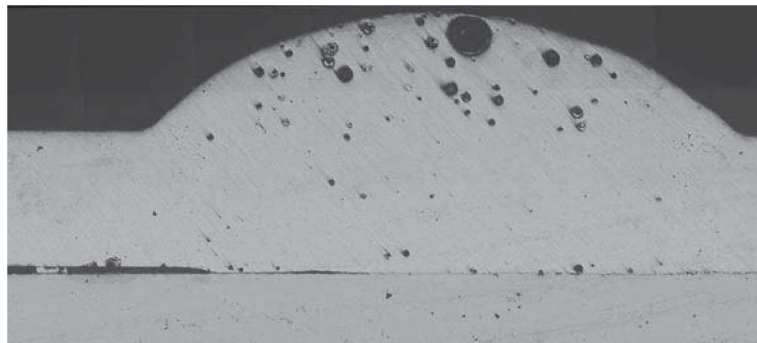


Abbildung 56: Übersichtsaufnahme 25x

Die intermetallische Phase weist einen sehr glatten Übergang zur Stahlseite auf. Auch hier ist wieder das typische Gefüge des Lotwerkstoffs erkennbar (Abbildung 57). Genauere Betrachtungen der IMP konnten auch in diesem Fall nur mit dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt werden.

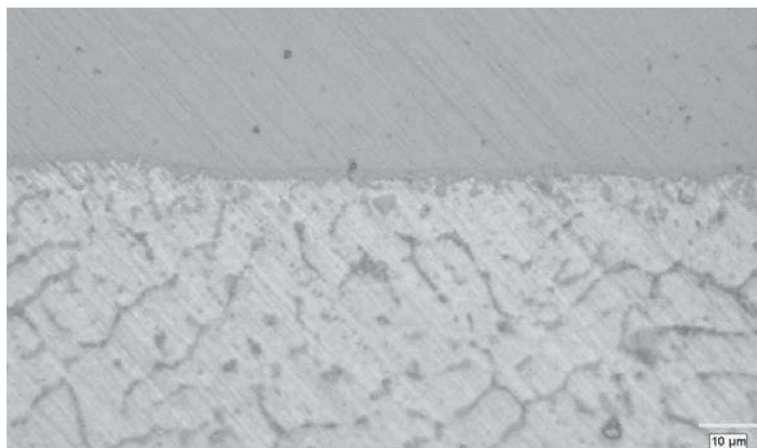


Abbildung 57: Schliffbild AlMgSi1 – SG AlSi3Mn – DX54 walzhart 500x

### 6.7.2.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM-EDX)

Die intermetallische Phase weist eine Schichtdicke bei Verwendung einer unbehandelten Stahlplatine von 1,1 µm auf. Die walzharte Stahlplatine liegt mit 2,4 µm höher, und die kugelgestrahlte Stahlplatine bildet die mit 3,4 µm die größte Schichtdicke. Die Morphologie der IMP ist in Abbildung 58 dargestellt

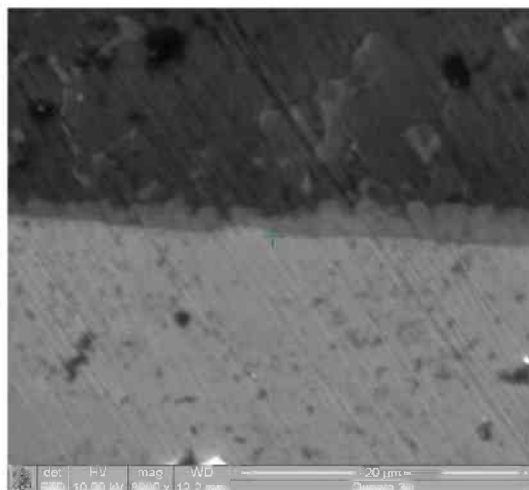


Abbildung 58: REM-Aufnahme: AlMgSi1 – SG AlSi3Mn – DX54 walzhart

Die IMP zeigt eine grobe, blockige Struktur und wächst in den Lotwerkstoff. Der Übergang IMP-Stahl ist sehr glatt.

Die Analysenwerte der intermetallischen Phase sind in Tabelle 14 eingetragen.

Stahlplatine	at% Al	at% Fe	at% Si
unbehandelt	70,4	20,9	8,7
walzhart	72,5	22,5	5,0
kugelgestrahlt	73,4	21,4	5,2

Tabelle 14: REM-EDX Analyse der IMP

Das Silizium reichert sich auch hier deutlich in der intermetallischen Phase an.

### 6.7.2.3 Zugprüfung

Eine Zugprobe konnte nur von der Werkstoffkombination mit der walzharten Stahlplatine hergestellt werden. Die beiden anderen Kombinationen brachen bei der Probenherstellung. Bei der Verwendung der walzharten Platine kam es zu hohen Zugfestigkeitswerten von  $101,3 \text{ Nmm}^{-2}$ . Der Bruch trat an der Verbindungsstelle auf und der Werkstoff brach spröde.

### 6.7.2.4 Versuche am Nanointender

Mit dieser Werkstoffkombination konnten keine Versuche am Intender durchgeführt werden, da aufgrund der Auslastung des Prüfgerätes nur eine begrenzte Probenanzahl untersucht werden konnte.

### 6.7.2.5 Thermodynamisches Modell

In Abbildung 59 ist das Ergebnis der Phasenbestimmung dargestellt. Sämtliche Stahlplatinen wiesen die Phase  $\text{FeAl}_3$  auf. Eine direkte Überprüfung mit Härtewerten war in diesem Fall

nicht möglich. Im Vergleich mit der Aluminiumplatte Al 99,5 wurde aber ähnliche Analysenwerte für die IMP detektiert, sodass auch in diesem Fall von der Phase  $\text{FeAl}_3$  ausgegangen werden muss.

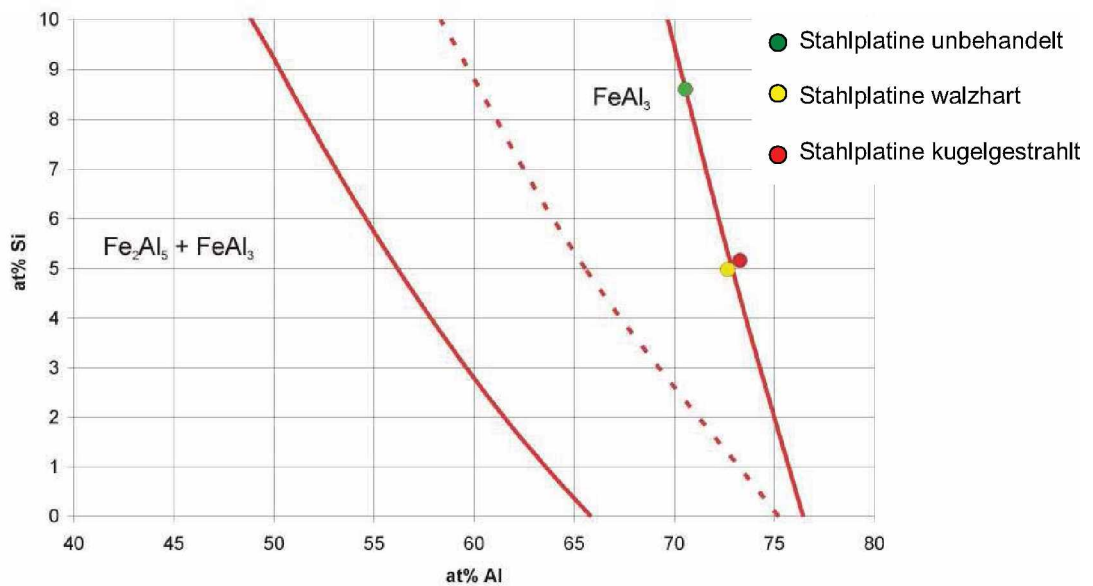


Abbildung 59: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells

## 6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse des Zusatzwerkstoffs AlSi3Mn

Die Schweißungen mit AlSi3Mn zeichneten sich durch eine Schichtdicke die zwischen denen von Al 99,5 und AlSi5 liegt aus. Die Phasengrenzschicht zum Stahl war in allen Fällen sehr glatt. Verzahnt war die Schicht in das Aluminiumlot relativ grob bzw. auch blockförmig. Als IMP wurde bei allen Kombinationen die Phase  $\text{FeAl}_3$  nachgewiesen.

Die Festigkeitswerte lagen bei Verwendung von Al 99,5 als Aluminiumplatte in einem mittleren Bereich und bei der Aluminiumplatte AlMgSi1 in einem verhältnismäßig sehr hohen Bereich. Die Bruchart war in allen Fällen ein Sprödbruch. Dies liegt aber an der wesentlich höheren Festigkeit der AlMgSi1-Legierung im Gegensatz zur Aluminiumplatte Al 99,5.

## 6.9 Zusammenfassende Ergebnisse

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Versuche zusammenfassend dargestellt. Eingetragen ist jeweils die Dicke der intermetallischen Phase, die Morphologie und die jeweils auftretende Phase. Auch die Ergebnisse aus den Zugversuchen sind in dieser Tabelle angeführt.

Aluminiumplatte Stahlplatte DX 54	Al99,5			AlMgSi1		
	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt
<b>Zusatzwerkstoff: Al 99,5</b>						
Dicke der IMP [ $\mu\text{m}$ ]	3,61	4,51	3,6	6,35	4,52	x
auftretende Phasen	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$	$\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$
Zugfestigkeit [ $\text{Nmm}^{-2}$ ]	18	78,5	x	40,2	55,1	x
Bruchverhalten	LS	A	x	LS	LS	x
<b>Zusatzwerkstoff: AlSi5</b>						
Dicke der IMP [ $\mu\text{m}$ ]	0,88	1,14	2,56	1,6	1,06	1,68
auftretende Phasen	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$
Zugfestigkeit [ $\text{Nmm}^{-2}$ ]	48,6	76,2	59,2	102,1	90,4	x
Bruchverhalten	A	A	LS	LS	LS	x
<b>Zusatzwerkstoff: AlSi3Mn</b>						
Dicke der IMP [ $\mu\text{m}$ ]	2,04	1,49	2,22	1,1	2,37	3,36
auftretende Phasen	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$	$\text{FeAl}_3$
Zugfestigkeit [ $\text{Nmm}^{-2}$ ]	66,1	71,1	x	x	101,3	x
Bruchverhalten	LS	LS	x	x	LS	x

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse



## 7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, den Einfluss einer fehlenden Zinkbeschichtung auf die Schweißbarkeit und die mechanische Festigkeit von Schweißverbindungen zwischen Stahl und Aluminium festzustellen. Die Schwierigkeiten, die dabei zu überwinden waren, haben im Wesentlichen folgende Ursachen:

- Die unterschiedlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Aluminium und Stahl
- Die Ausbildung sehr harter und spröder intermetallischer Phasen (Eisenaluminide, vor allem  $\eta$ ,  $\zeta$  und  $\theta$ ) im Gefüge

Der große Unterschied in den Schmelzpunkten der beiden Fügepartner bewirkt eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit des Aluminiums im Schweißbad. Durch die hohe Reaktivität mit Eisen und der Neigung zur Verbindungsbildung sind intermetallische Phasen kaum zu verhindern. Durch eine gezielte Auswahl an Zusatzwerkstoffen kann die Schicht jedoch positiv beeinflusst werden.

Sämtliche Schweißungen sind mit dem von Fronius International entwickelten CMT-Schweißverfahren hergestellt worden. Dieses „kalte“ Verfahren erwies sich als sehr günstig zur Schweißung von Stahl-Aluminium-Verbindungen, nicht zuletzt aufgrund der präzisen Steuerung des gesamten Schweißprozesses.

Bei Verwendung der drei Zusatzwerkstoffe zeigte sich bezüglich der Dicke der intermetallischen Phase ein deutlicher Zusammenhang mit dem Siliziumgehalt des Lotwerkstoffes. So wies der Zusatzwerkstoff AlSi5 die geringsten Schichtdicken der IMP auf. Die größten Schichtdicken stellten sich bei dem Zusatzwerkstoff Al99,5 ein.

Die Verwendung des Nanointenders in Kombination mit einem thermodynamischen Modell und den Daten aus der REM-EDX-Analyse erwies sich als sehr effektive Methode, um die intermetallischen Phase zu charakterisieren.

Die Art der IMP zeigte einen Zusammenhang mit dem Si-Gehalt des Lotes auf. Bei der Verwendung von Al99,5 als Zusatzwerkstoff bildeten sich bei allen Schweißungen die Phasen  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  und  $\text{FeAl}_2$  aus. Hingegen entstanden bei Verwendung eines siliziumlegierten Zusatzwerkstoffes (AlSi3Mn und AlSi5) nur die Phase  $\text{FeAl}_3$ .

Ein Einfluss der Kaltverfestigung der Stahlbleche auf die IMP konnte nicht nachgewiesen werden.

Grundsätzlich kam es bei der Zugprüfung zu zwei unterschiedlichen Brucharten. Einerseits der duktile Bruch im Aluminiumblech, welcher nur bei Verwendung der Aluminiumplatte Al99,5 und einer unbehandelten bzw. walzharten Stahlplatte auftrat. Alle anderen Werkstoffkombinationen sind spröde in der Verbindungsstelle (Lötstelle) gebrochen.

Das Aluminiumblech AlMgSi1 wies die höchsten Festigkeitswerte auf, speziell in Kombination mit den Zusatzwerkstoffen AlSi3Mn und AlSi5.

Bezüglich der Benetzungsfähigkeit ist ein eindeutiger Zusammenhang mit dem Siliziumgehalt des Zusatzwerkstoffes zu erkennen. So stellte sich unter dem Zusatzwerkstoff AlSi5 der geringste Benetzungswinkel ein. Im Gegensatz dazu zeigt der Lotwerkstoff Al99,5 die schlechteste Benetzung auf der Stahlplatine. Auch die drei unterschiedlich verfestigten Stahlbleche wiesen einen Zusammenhang mit dem Benetzungswinkel auf. Bei den kugelgestrahlten Stahlblechen ist ohne Ausnahme der geringste Benetzungswinkel zu sehen. Hingegen kam es unter Verwendung des unbehandelten Stahlbleches in der Regel zu den größten Benetzungswinkeln.

Zusätzlich wurde mit einem Profilometer die Oberfläche untersucht und dabei zwischen dem unbehandelten und dem walzharten Stahlblech kein Unterschied in der Rauhtiefe festgestellt. Allerdings zeigte sich eine Ungleichmäßigkeit auf dem unbehandelten Stahlblech.

An der Oberfläche des kugelgestrahlten Stahlblechs kam es zu einer Kraterbildung die durch das Strahlen entstanden ist und weist somit eine große Oberfläche auf, welche die Benetzungsfähigkeit für das Aluminiumlot positiv beeinflusst.

Bei zukünftigen Untersuchungen sind neben weiteren Lotlegierungen auch Veränderungen der geometrischen Anordnung zu betrachten.

---

## 8 Literatur

- [1] ACHAR A.R.G., RUGE J. und SUNDARSEN S., Verbinden von Aluminium mit Stahl, besonders durch Schweißen, Teil I: Aluminium 56 (1980), 147-149; Teil II: Aluminium 56 (1980), 220-223; Teil III: Aluminium 56 (1980)
- [2] BRUCKNER J.: Schweißlötten von Aluminium mit Stahl unter Verwendung verschiedener Schweißlötverfahren. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 2000
- [3] DILTHEY U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren Band 1: Schweiß- und Schneidtechnologien. VDI- Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994
- [4] DILTHEY U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren Band 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. VDI- Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994
- [5] DUBBEL: Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2001
- [6] FARWER, A.; WEHNER, H. Anwendungen von Helium und heliumhaltigen Gas-Gemischen zur Verbesserung der Güte und Leistungssteigerung beim WIG- und MIG-Schweißen DVS-Berichte, Band 100, DVS-Verlag, Düsseldorf 1985
- [7] FEISTRITZER B.: MIG-Verbindungsschweißen von Aluminium und Aluminium-Magnesium-Legierungen mit Stahl. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1995
- [8] FRITZ, H., SCHULZE, G. Fertigungstechnik Springer Verlag, Berlin u.a. 2001
- [9] FRONIUS INTERNATIONAL, interne Unterlagen, Wels (2006)
- [10] GRANJON H.: Werkstoffkundliche Grundlagen des Schweißens. Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [11] HUANG B., ISHIHARA K.N., SHINGU P.H.: Metastable phases of Al – Fe system by mechanical alloying, Materials Science and Engineering, 1997
- [12] LISON R.: Diffusionsschweißen und seine Anwendungen – Beispiele aus der Kerntechnik, Schweißen und Schneiden, 23. Jahrg. (1971), S. 304 – 308
- [13] LOHNER M.: MIG- Verbindungsschweißen von Aluminium-Legierungen und Stahl mit Zusatzwerkstoffen auf AlSi- und AlMn-Basis. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1995

- 
- [14] KOSTKA A., PYZALLA A.: Proposal for research into the role of zinc in steel-aluminium joining, MAX-PLANCK Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Juni 2006
- [15] KÜBER R.: Schweiß- und Lötverbindungen zwischen Aluminium- und Stahlwerkstoffen, Aluminium, 46. Jahrg. (1970), S. 304 – 310
- [16] MARSALSKI, THADDEUS B.: Binary Alloys Phase Diagrams, American Society for metals, 1986), S. 304 – 308
- [17] MARDER A. R., The metallurgy of zinc- coated steel, Progress in Material Science 45 (2000), S. 191 – 271
- [18] MONDOFOLO L.F.: Aluminium-Alloys: Structures and properties, Butterworths London, 1976
- [19] Montanuniversität Leoben: Institut für Werkstoffwissenschaft, interne Unterlagen, 2006
- [20] MURAKAMI T., NAKATA K., TONG H., USHIO M.: Dissimilar metal joining of aluminium to steel by MIG Arc brazing using flux cored wire., ISIJ international, Vol. 43 (2003), No. 10), S. 1596 – 1602
- [21] POTESSE M., SCHOEBERL T., ANTREKOWITSCH H., BRUCKNER J.: The Characterisation of the intermetallic Fe-Al Layer of Steel-Aluminium weldings, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006), S. 167 – 176
- [22] RESCH J.: Schmelzschweißen von Aluminium und Stahl mit einem oder mehreren Zusatzwerkstoffen. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1990
- [23] RESCH J.: Untersuchungen zur Problematik der Metall- Schutzgasschweißung von Aluminium mit Stahl. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1994
- [24] RUGE J., RIE K.-T.: Schweißtechnische Probleme und ihre metallkundlich-technologische Analyse. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.v., Oberursel, 1983
- [25] RUGE J.: Handbuch der Schweißtechnik Band 1: Werkstoffe. Springer Verlag, Berlin, 1991
- [26] RUGE J.: Handbuch der Schweißtechnik Band 2: Verfahren und Fertigung. Springer Verlag, Berlin, 1992
- [27] RYABOV V.R. (Ed.): Aluminizing of Steel, Oxoniane Press, New Delhi, 1985

- [28] SIDYAKIN V. A.: Machnev E. A.: Butt welding dissimilar metals using a low-pressure arc, *Welding Production* 32 (195) ), S. 14 – 17
- [29] THELER J. J. et al.: Herstellung von Aluminium/Stahl-Verbundstromschienen mit metallurgischer Bindung zwischen Aluminium und Stahl durch Verbundstrangpressen, *Metall*, 30. Jahrg. (1976) ), S. 223 – 227

## 9 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Binäres System Eisen – Aluminium [16].....	7
Abbildung 2: Darstellung der Kristallstruktur der $\eta$ -Phase [27].....	9
Abbildung 3: Einfluss der Dicke der Übergangsschicht auf die Festigkeit der Schweißverbindung [1].....	10
Abbildung 4: Zustandsschaubild Eisen-Zink [17] .....	12
Abbildung 5: Aufbau der Zinkschicht [17].....	13
Abbildung 6: Schichtaufbau [17].....	13
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Metall-Schutzgasschweißens [4] .....	18
Abbildung 8: Schutzgaseinfluss auf die Nahtgeometrie [4] .....	19
Abbildung 9: Schematische Darstellung des CMT Schweißsystems [9].....	22
Abbildung 10: Lichtbogenbereiche beim MSG Schweißen [1].....	23
Abbildung 11: Schematische Darstellung des CMT-Prozesses [9].....	23
Abbildung 12: Hochgeschwindigkeitsaufnahme des CMT-Prozesses [9].....	23
Abbildung 13: Phasen beim CMT-Pulsmix Prozess [9].....	24
Abbildung 14: Prinzip Nanointender .....	26
Abbildung 15: AFM-Aufnahme mit Härteeindrücken .....	26
Abbildung 16: Geometrie der Zugproben.....	27
Abbildung 17: Allgemeines Spannungs-Dehnungs-Diagramm [5].....	27
Abbildung 18: Einfluss von Silizium auf die IMP bei 300 K, e Ende, a Anfang [21] .....	28
Abbildung 19: Einfluss von Mangan auf die IMP bei 300 K, e Ende, a Anfang [21].....	29
Abbildung 20: Einfluss von Mn und Si auf die IMP bei 300 K [21].....	29
Abbildung 21: Einfluss von Mn und variablem Si- Gehalt auf die IMP bei 300 K, e Ende, a Anfang [21].....	30
Abbildung 22: Messprinzip Profilometer [19].....	32
Abbildung 23: Aufbau des Profilometers [19].....	32
Abbildung 24: Arithmetischer Mittenrauhwert Ra [5].....	32
Abbildung 25: Rauwert Rz [5].....	33
Abbildung 26: Rauwert Rt [5].....	33
Abbildung 27: Mögliche Werkstoffkombinationen .....	34
Abbildung 28: Spezielle Geometrieform.....	36
Abbildung 29: Schweißgeometrie im Überblick.....	36
Abbildung 30: Geschweißte Platine .....	37
Abbildung 31: Rauwerte und Topographie des Stahles DX54-unbehandelt.....	38
Abbildung 32: Rauwerte und Topographie des Stahles DX54-walzhart .....	38
Abbildung 33: Rauwerte und Topographie des Stahles DX54-kugelgestrahlt .....	39
Abbildung 34: Übersichtsaufnahme 25x .....	41
Abbildung 35: Schliffbild Al 99,5 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart 500x.....	41
Abbildung 36: REM-Aufnahme: Al 99,5 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart.....	41
Abbildung 37: Kraft-Eindringkurve .....	42
Abbildung 38: Duktiler Bruch im Aluminium (WEZ).....	43
Abbildung 39: Sprödbruch in der Verbindungsstelle .....	43
Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	43
Abbildung 41: Übersichtsaufnahme 25x .....	44
Abbildung 42: Schliffbild AlMgSi1 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart 500x.....	44
Abbildung 43: REM-Aufnahme: AlMgSi1 – SG Al 99,5 – DX54 walzhart .....	45

Abbildung 44: Übersichtsaufnahme 25x .....	47
Abbildung 45: Schliffbild Al 99,5 – SG AISi5 – DX54 unbehandelt 500x .....	47
Abbildung 46: REM-Aufnahme: Al 99,5 – SG AISi5 – DX54 unbehandelt .....	48
Abbildung 47: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells.....	49
Abbildung 48: Übersichtsaufnahme 25x .....	50
Abbildung 49: Schliffbild AlMgSi1 – SG AISi5 – DX54 walzhart 500x .....	50
Abbildung 50: REM-Aufnahme: AlMgSi1 – SG AISi5 – DX54 walzhart .....	51
Abbildung 51: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells.....	52
Abbildung 52: Übersichtsaufnahme 25x .....	53
Abbildung 53: Schliffbild Al 99,5 – SG AISi3Mn – DX54 unbehandelt 500x .....	53
Abbildung 54: REM-Aufnahme: Al 99,5 – SG AISi3Mn – DX54 walzhart .....	54
Abbildung 55: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells.....	55
Abbildung 56: Übersichtsaufnahme 25x .....	56
Abbildung 57: Schliffbild AlMgSi1 – SG AISi3Mn – DX54 walzhart 500x.....	56
Abbildung 58: REM-Aufnahme: AlMgSi1 – SG AISi3Mn – DX54 walzhart .....	57
Abbildung 59: Phasenbestimmung mittels des thermodynamischen Modells.....	58
Abbildung 60: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	II
Abbildung 61: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	II
Abbildung 62: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	II
Abbildung 63: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	II
Abbildung 64: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	III
Abbildung 65: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	III
Abbildung 66: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	III
Abbildung 67: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	III
Abbildung 68: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	IV
Abbildung 69: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	IV
Abbildung 70: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	IV
Abbildung 71: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	IV
Abbildung 72: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	V
Abbildung 73: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	V
Abbildung 74: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	V
Abbildung 75: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	V
Abbildung 76: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	VI
Abbildung 77: Schweißnahtmitte: Lichtmikroskop (500x).....	VI
Abbildung 78: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	VII
Abbildung 79: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	VII
Abbildung 80: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	VII
Abbildung 81: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	VII
Abbildung 82: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	VIII
Abbildung 83: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	VIII
Abbildung 84: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	VIII
Abbildung 85: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	VIII
Abbildung 86: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	IX
Abbildung 87: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	IX
Abbildung 88: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	IX
Abbildung 89: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	IX
Abbildung 90: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	X

Abbildung 91: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	X
Abbildung 92: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	X
Abbildung 93: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XI
Abbildung 94: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XI
Abbildung 95: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XI
Abbildung 96: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XI
Abbildung 97: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XII
Abbildung 98: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XII
Abbildung 99: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XII
Abbildung 100: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XII
Abbildung 101: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XIII
Abbildung 102: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XIII
Abbildung 103: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XIII
Abbildung 104: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XIII
Abbildung 105: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XIV
Abbildung 106: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XIV
Abbildung 107: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XIV
Abbildung 108: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XIV
Abbildung 109: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XV
Abbildung 110: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XV
Abbildung 111: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XV
Abbildung 112: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XVI
Abbildung 113: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVI
Abbildung 114: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVI
Abbildung 115: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVI
Abbildung 116: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XVII
Abbildung 117: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVII
Abbildung 118: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVII
Abbildung 119: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVII
Abbildung 120: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x) .....	XVIII
Abbildung 121: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVIII
Abbildung 122: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVIII
Abbildung 123: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XVIII
Abbildung 124: Zugprüfung; Auswertung der Ergebnisse, Zusatzwerkstoff Al99,5 .....	XXIII
Abbildung 125: Zugprüfung; Auswertung der Ergebnisse, Zusatzwerkstoff AlSi3Mn .....	XXIV
Abbildung 126: Zugprüfung; Auswertung der Ergebnisse, Zusatzwerkstoff AlSi5 .....	XXV
Abbildung 127: Nanointender; Auswertung der Ergebnisse .....	XXVI
Abbildung 129: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXVIII
Abbildung 130: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXVIII
Abbildung 131: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXVIII
Abbildung 132: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXIX
Abbildung 133: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXIX
Abbildung 134: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXIX
Abbildung 135: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXX
Abbildung 136: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXX
Abbildung 137: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXX
Abbildung 138: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX.....	XXXI



Abbildung 139: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX ..... XXXI  
Abbildung 140: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX ..... XXXI

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Al 99,5 bzw. Eisen [2],[7],[13] .....	5
Tabelle 2: Gleichgewichtsphasen des Zweistoffsystems Eisen-Aluminium [2],[13],[18],[21]..	8
Tabelle 3: Phasen im System Fe-Zn [17].....	12
Tabelle 4: Zink-Eisen Phasen [17].....	13
Tabelle 5: Lichtbogenarten beim MSG-Schweißverfahren [8].....	20
Tabelle 6: Eingesetzte Werkstoffe .....	34
Tabelle 7: Tropfenausbildung der einzelnen Lotwerkstoffe .....	39
Tabelle 8: Benetzungswinkel der verschiedenen Lotwerkstoffe .....	40
Tabelle 9: REM-EDX-Analyse der IMP .....	42
Tabelle 10: REM-EDX-Analyse der IMP .....	45
Tabelle 11: REM-EDX Analyse der IMP .....	48
Tabelle 12: REM-EDX-Analyse der IMP .....	51
Tabelle 13: REM-EDX Analyse der IMP .....	54
Tabelle 14: REM-EDX Analyse der IMP .....	57
Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse.....	59
Tabelle 16: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff Al99,5.....	XIX
Tabelle 17: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff AISi3Mn.....	XIX
Tabelle 18: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff AISi5 .....	XIX
Tabelle 19: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff Al99,5.....	XX
Tabelle 20: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff AISi3Mn.....	XXI
Tabelle 21: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff AISi5.....	XXII
Tabelle 22: CMT-Parameter der geschweißten Verbindungen .....	XXVII
Tabelle 23: Interne Probenbezeichnung .....	XXVII
Tabelle 24: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff AlZn5.....	XXXII
Tabelle 25: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff AlZn5.....	XXXII
Tabelle 26: CMT-Parameter der geschweißten Verbindungen .....	XXXIII
Tabelle 27: Interne Probenbezeichnung .....	XXXIII

# 10 Anhang

## 10.1 Werkstoffdaten

### Stahlplatte

*DX 54*

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Nb	Sn	N	As	Zr	B
.019	.005	0,12	.0074	.0054	.043	.012	.007	.002	.011	.002	.07	.001	.002	0,0039	.002	.001	.0001

### Aluminiumplatte

*Al 99,5*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05

*AlMgSi1 (EN-AW 6082 – T6)*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Rest
0,9	0,44	0,08	0,48	0,85	0,05	< 0,01	0,04	0,02	Al

### Zusatzwerkstoff

*Al 99,5*

Si	Fe	Ti	Al + Ti
< 0,25	< 0,4	0,1 – 0,2	> 99,5

*AlSi3Mn*

Si	Mn	Fe	Ti	Zn	Cu
2,5 – 3,5	< 1,0	< 0,5	< 0,15	< 0,15	< 0,30

*AlSi5 (S Al 4043A)*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Ti
4,50 - 6,00	< 0,60	< 0,30	< 0,15	< 0,20	< 0,10	< 0,0003	< 0,15

## 10.2 Schliffbilder: Lichtmikroskop und REM-EDX Aufnahmen

Zusatzwerkstoff Al99,5

Aluminiumplatte Al99,5

DX54 unbehandelt

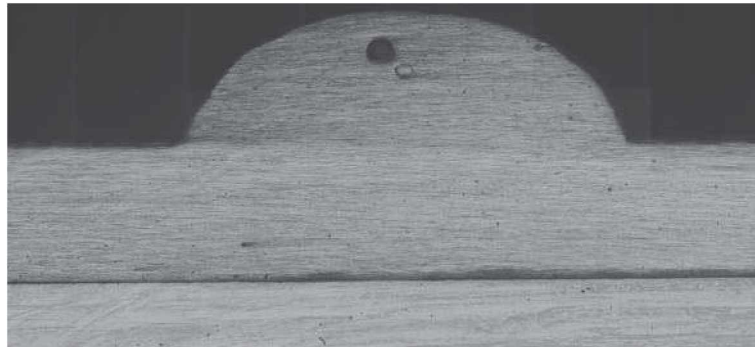


Abbildung 60: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

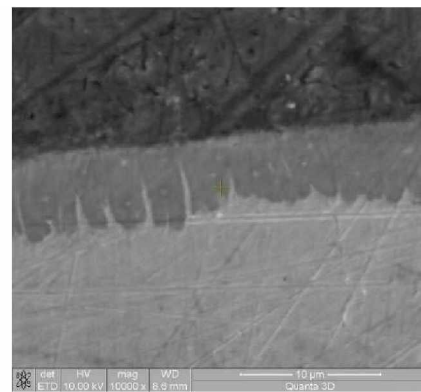
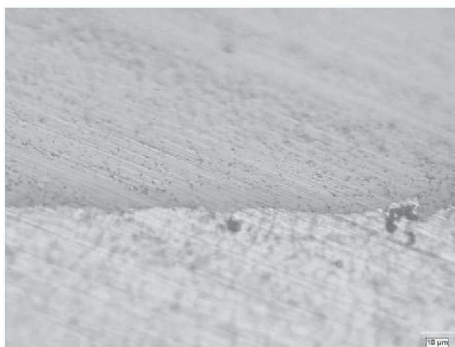


Abbildung 61: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

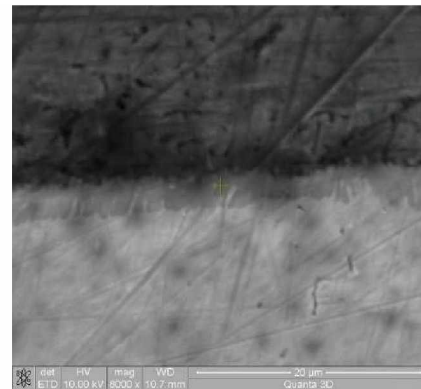


Abbildung 62: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

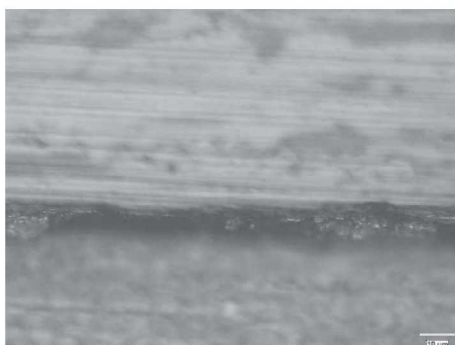


Abbildung 63: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff Al99,5

Aluminiumplatine Al99,5

DX54 walzhart

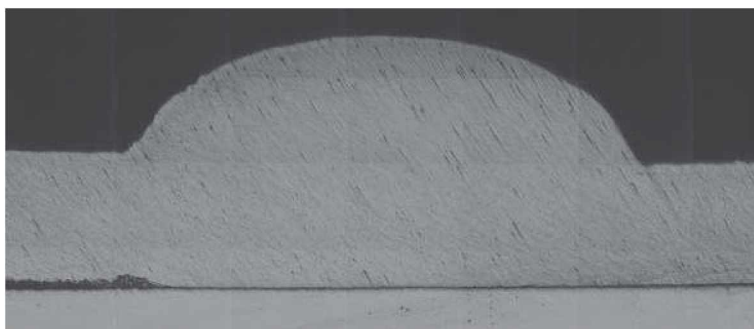


Abbildung 64: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

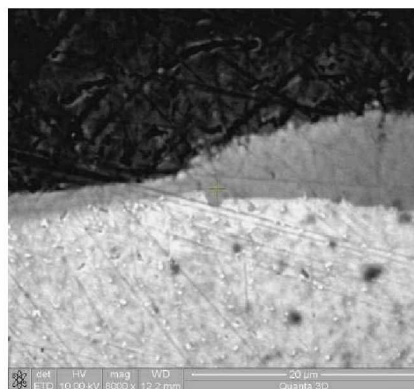


Abbildung 65: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

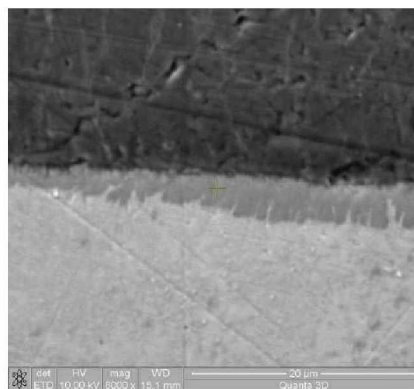


Abbildung 66: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

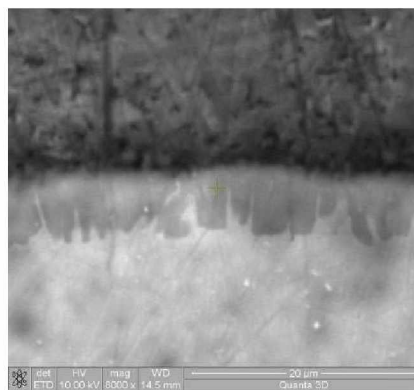
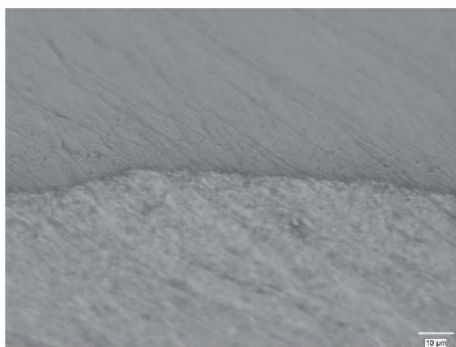


Abbildung 67: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff Al99,5

Aluminiumplatine Al99,5

DX54 kugelgestrahlt



Abbildung 68: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

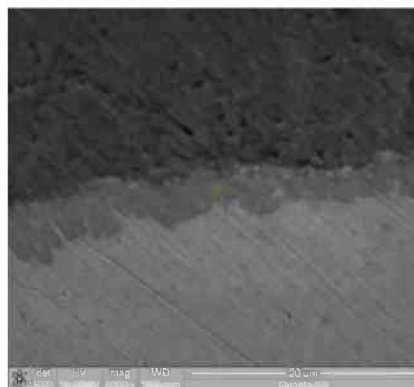


Abbildung 69: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

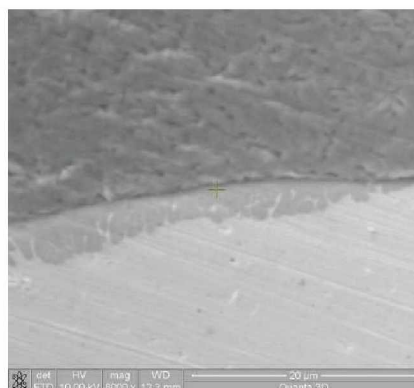
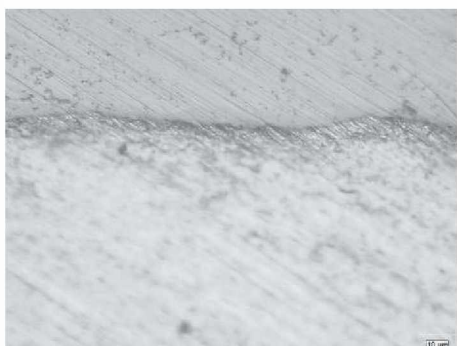


Abbildung 70: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

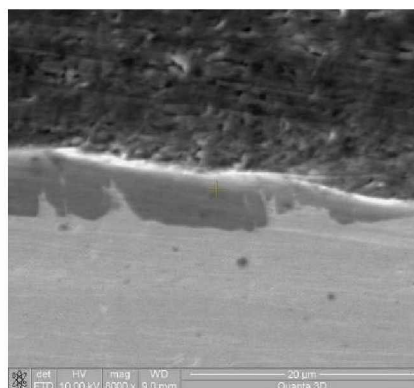
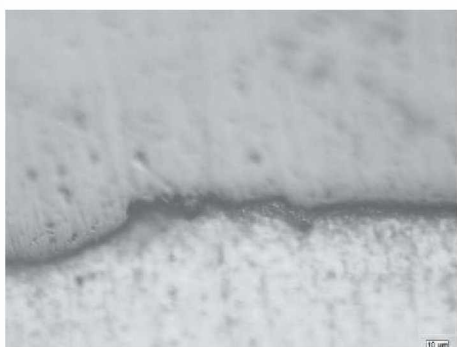


Abbildung 71: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

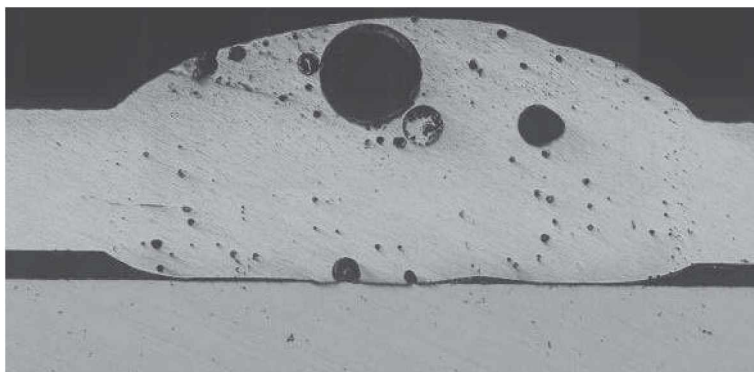
**Zusatzwerkstoff Al99,5****Aluminiumplatte AlMgSi1****DX54 unbehandelt**

Abbildung 72: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)



Abbildung 73: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

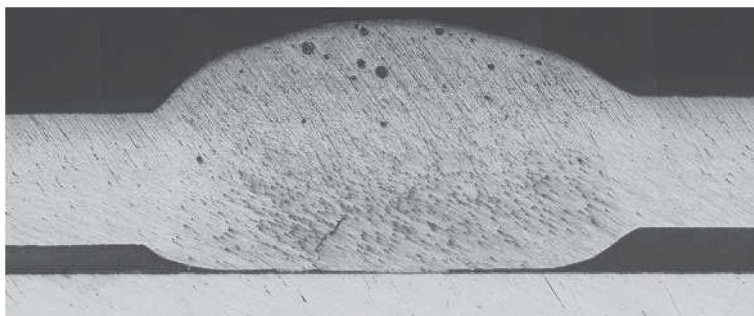
**Zusatzwerkstoff Al99,5****-****Aluminiumplatte AlMgSi1****-****DX54 walzhart**

Abbildung 74: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)



Abbildung 75: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

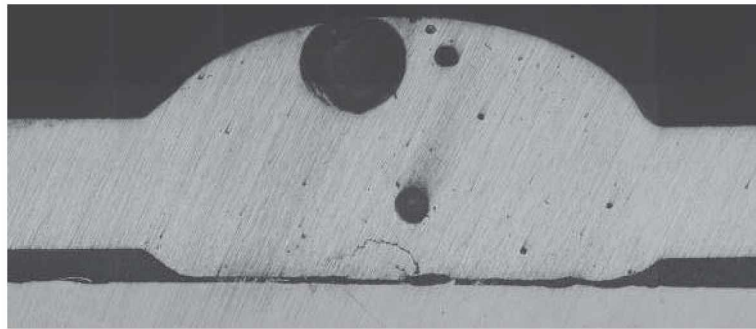
**Zusatzwerkstoff Al99,5****Aluminiumplatte AlMgSi1****DX54 kugelgestrahlt**

Abbildung 76: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

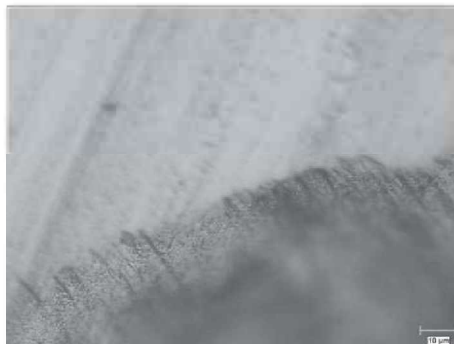


Abbildung 77: Schweißnahtmitte: Lichtmikroskop (500x)

Bei dieser Werkstoffkombination konnte keine Analyse mit dem REM- EDX durchgeführt werden, da die Probe bei der Schliifpräparation gebrochen war. Durch die starke Welligkeit der kugelgestrahlten Stahlplatte lagen die beiden Aluminiumbleche nicht exakt, wodurch die Festigkeit dieser Verbindung stark herabgesetzt wurde.

Zusatzwerkstoff AISi3Mn

Aluminiumplatte Al99,5

DX54 unbehandelt

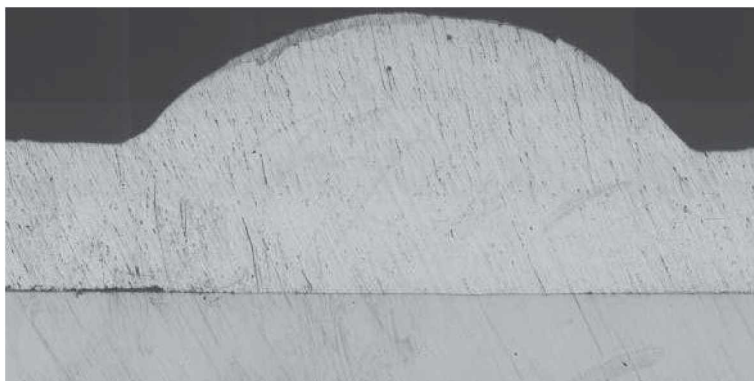


Abbildung 78: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)



Abbildung 79: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

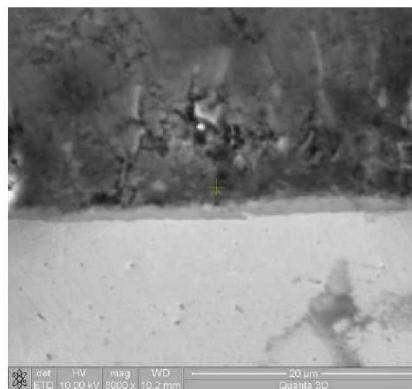


Abbildung 80: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

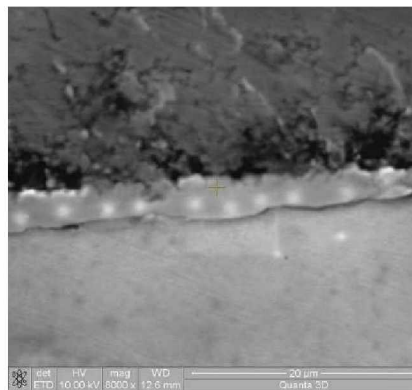


Abbildung 81: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Zusatzwerkstoff AISi3Mn

Aluminiumplatte Al99,5

DX54 walzhart

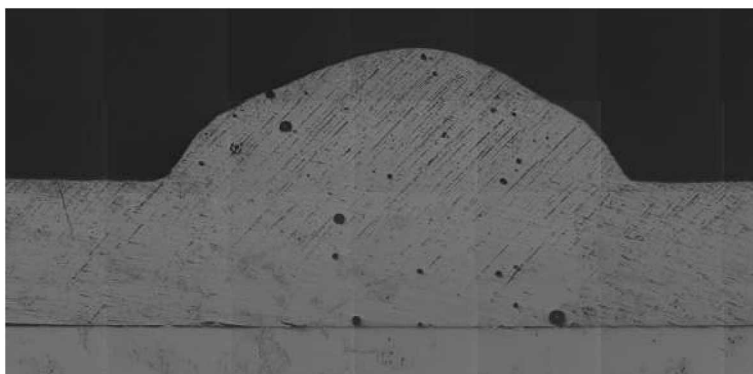


Abbildung 82: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

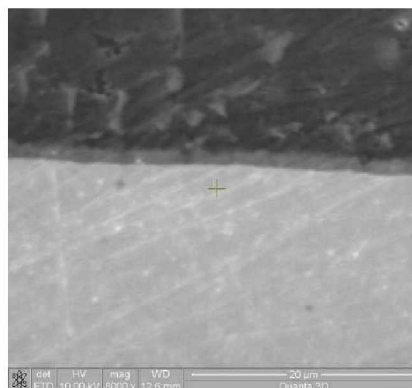


Abbildung 83: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

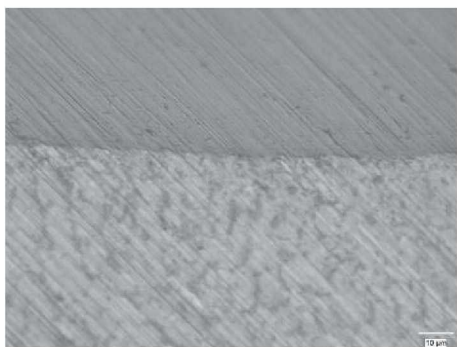


Abbildung 84: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

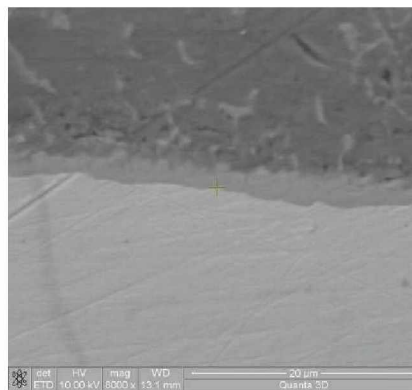


Abbildung 85: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi3Mn

Aluminiumplatine Al99,5

DX54 kugelgestrahlt

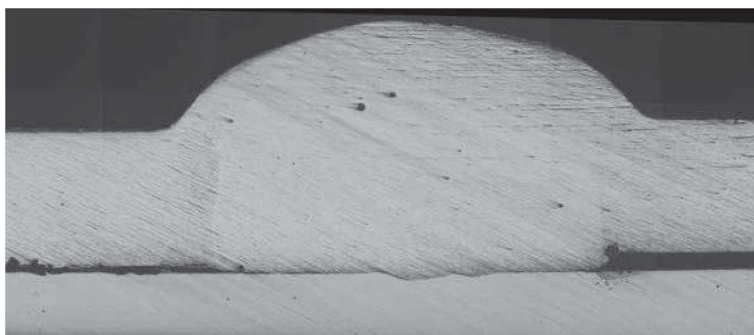


Abbildung 86: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)



Abbildung 87: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

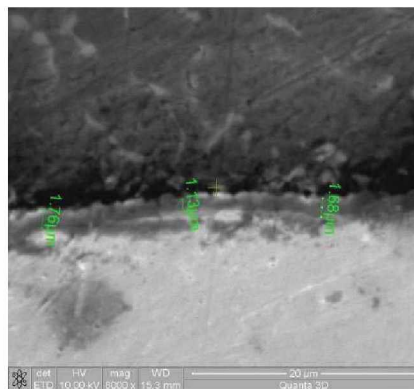


Abbildung 88: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

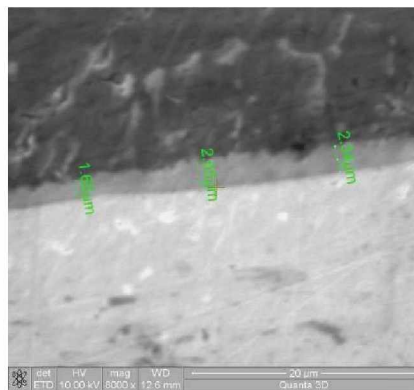


Abbildung 89: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi3Mn

Aluminiumplatte AlMgSi1

DX54 unbehandelt

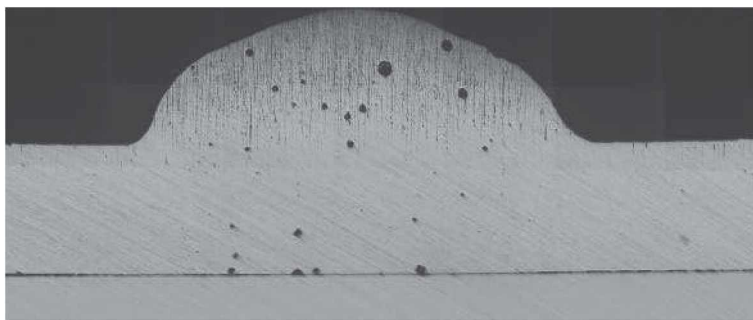


Abbildung 90: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

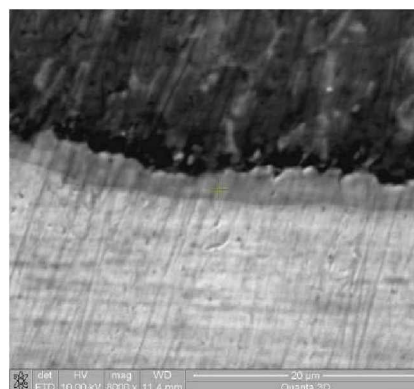


Abbildung 91: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Abbildung 92: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi3Mn

Aluminiumplatte AlMgSi1

DX54 walzhart



Abbildung 93: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

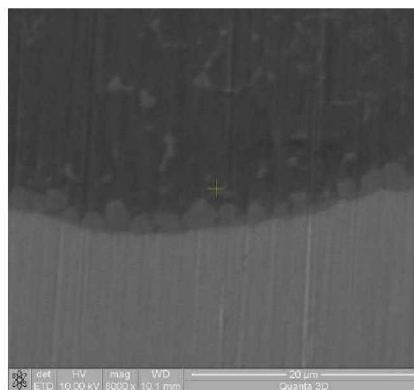
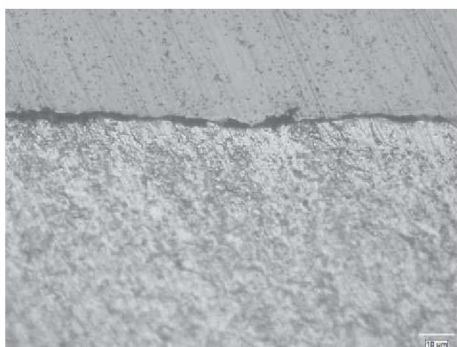


Abbildung 94: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

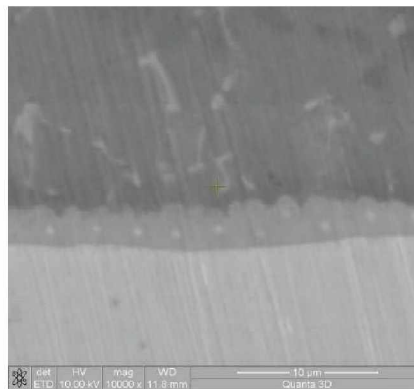


Abbildung 95: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

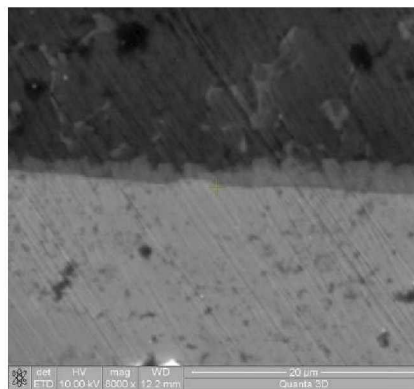


Abbildung 96: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi3Mn

Aluminiumplatte AlMgSi1

DX54 kugelgestraht

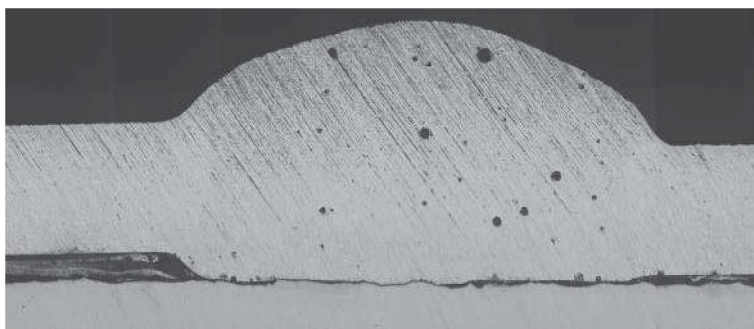


Abbildung 97: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

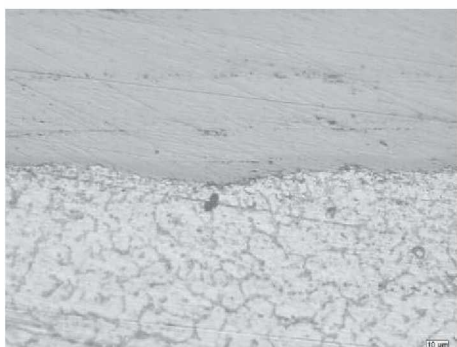


Abbildung 98: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

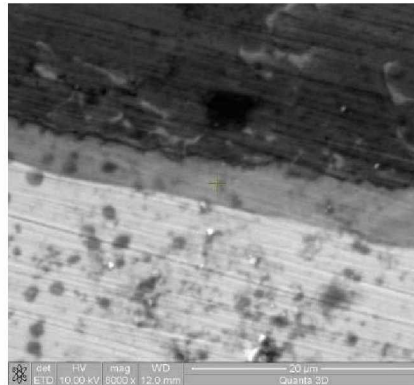


Abbildung 99: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

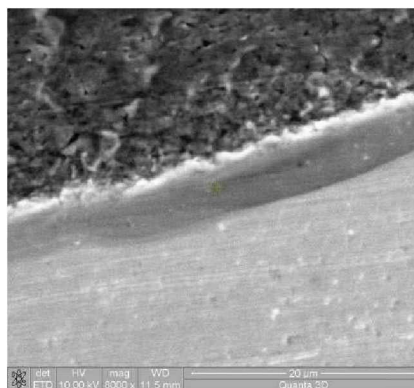


Abbildung 100: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi5

Aluminiumplatte Al99,5

DX54 unbehandelt

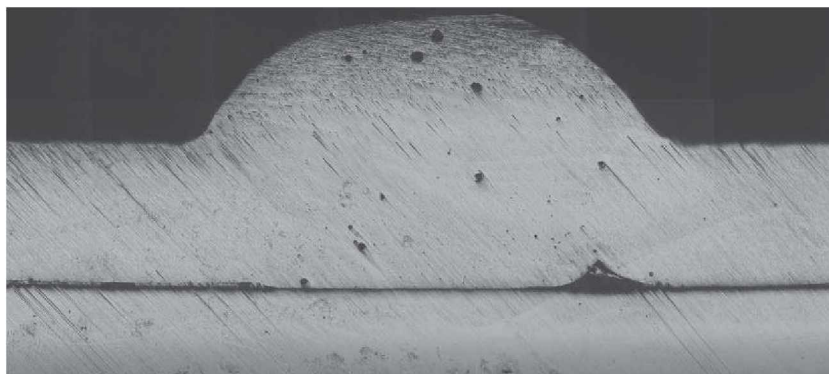


Abbildung 101: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)



Abbildung 102: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Abbildung 103: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Abbildung 104: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi5

Aluminiumplatte Al99,5

DX54 walzhart

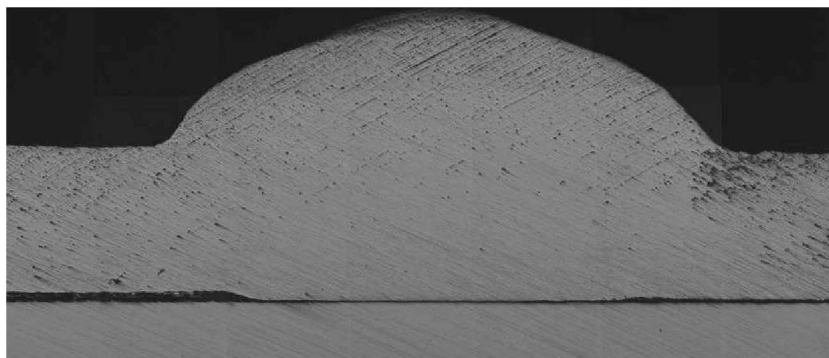


Abbildung 105: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

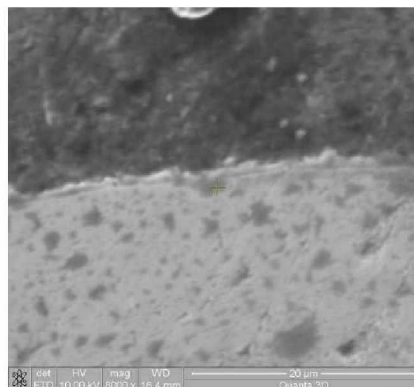
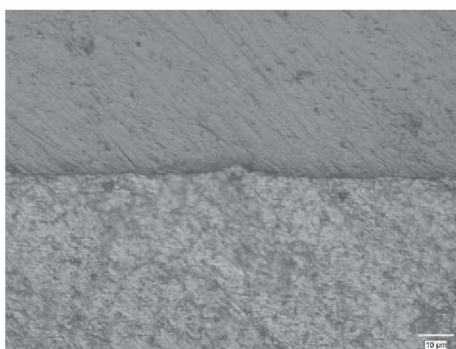


Abbildung 106: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

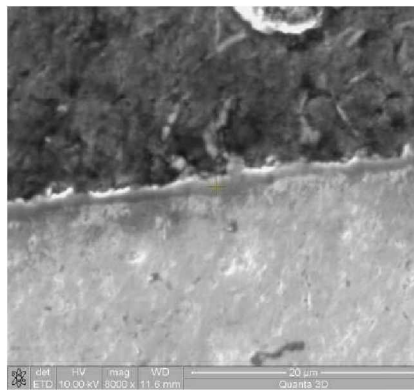
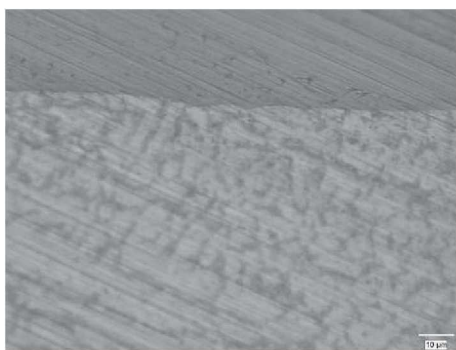


Abbildung 107 Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

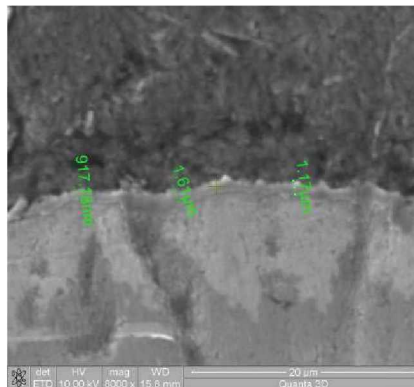
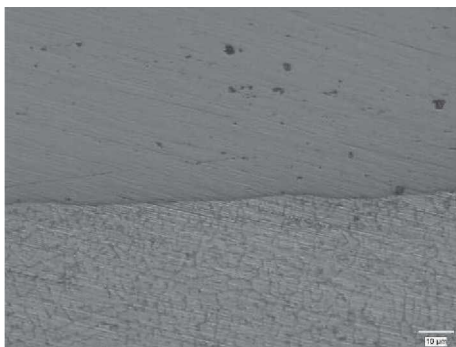


Abbildung 108: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AISi5

Aluminiumplatine Al99,5

DX54 kugelgestrahlt

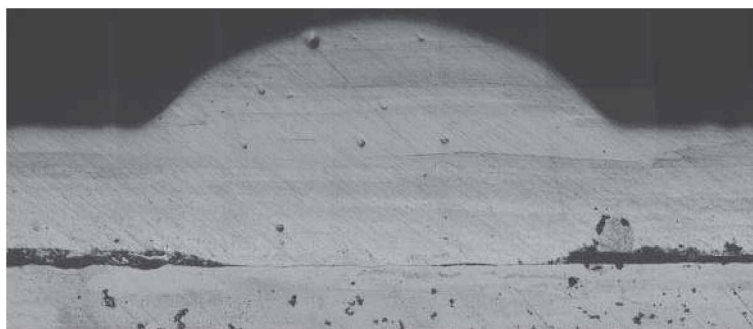


Abbildung 109: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

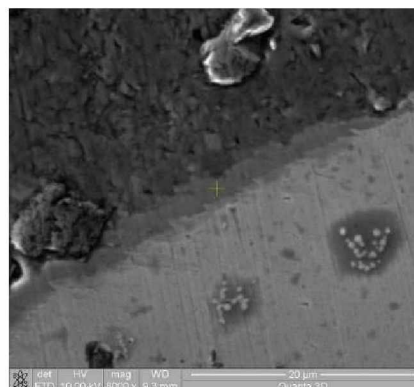
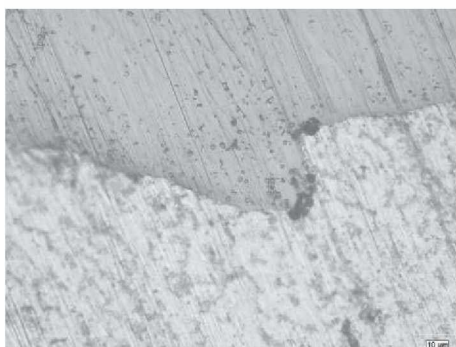


Abbildung 110: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

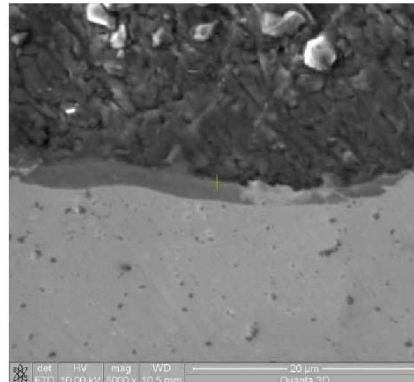


Abbildung 111: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Zusatzwerkstoff AISi5

Aluminiumplatine AlMgSi1

DX54 unbehandelt

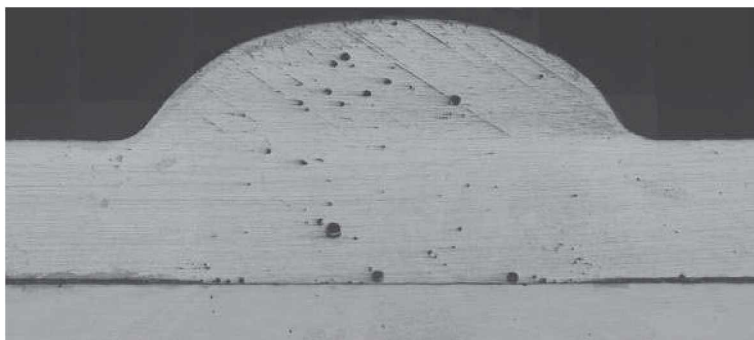


Abbildung 112: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)



Abbildung 113: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

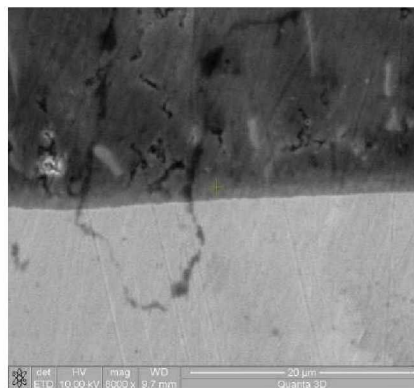
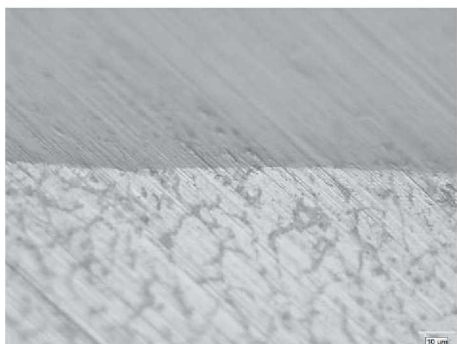


Abbildung 114: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

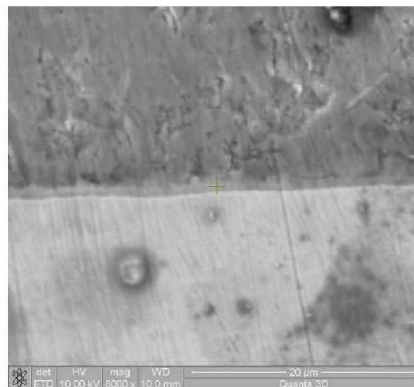
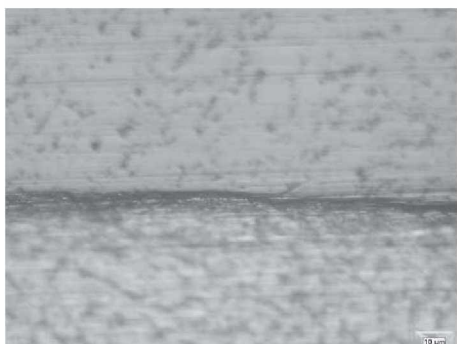


Abbildung 115: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

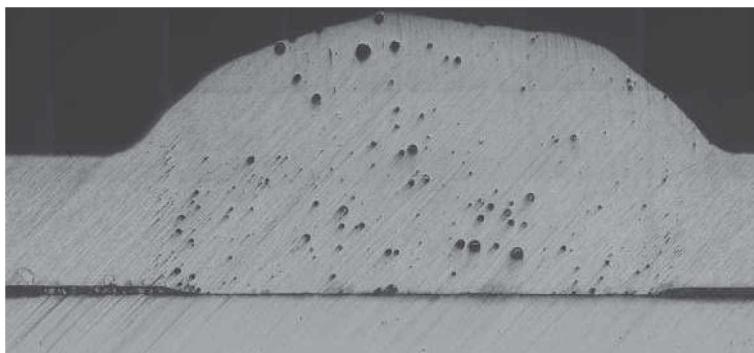
**Zusatzwerkstoff AISi5 - Aluminiumplatte AlMgSi1 - DX54 walzhart**

Abbildung 116: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

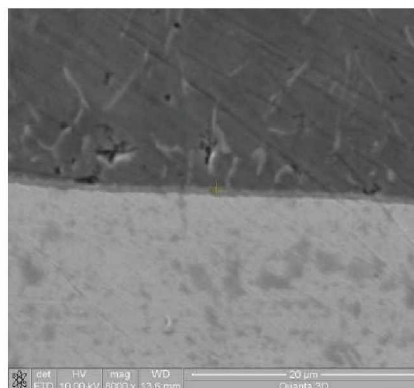
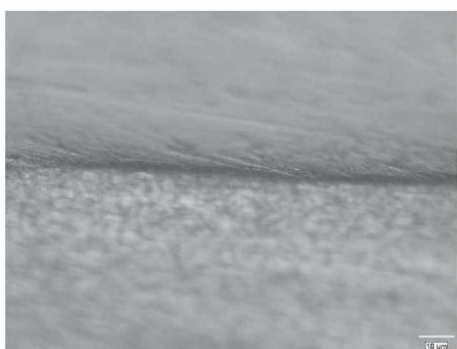


Abbildung 117: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Abbildung 118: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

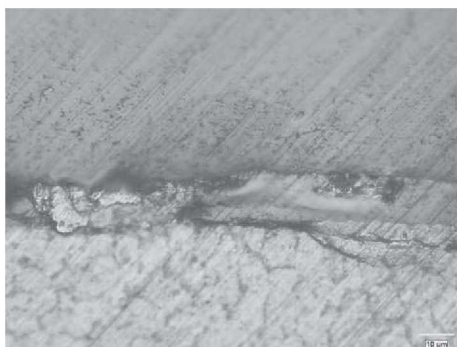


Abbildung 119: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

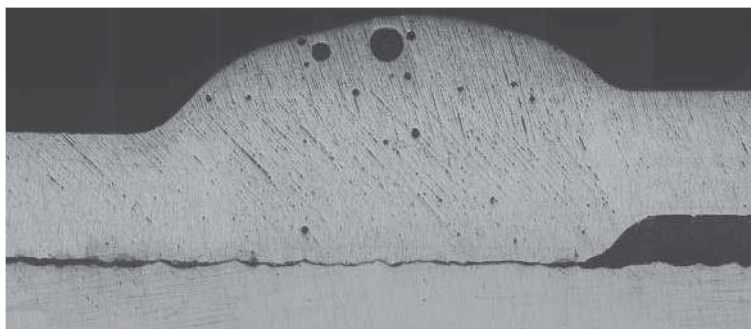
**Zusatzwerkstoff AISi5 - Aluminiumplatte AlMgSi1 - DX54 kugelgestrahlt**

Abbildung 120: Lichtmikroskop Mosaik-Aufnahme (25x)

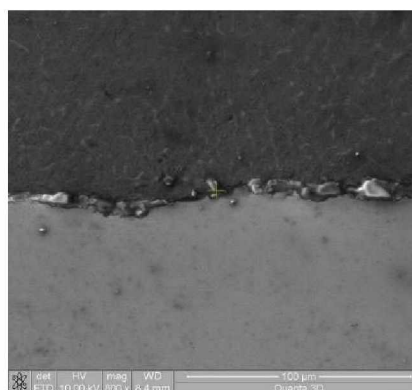
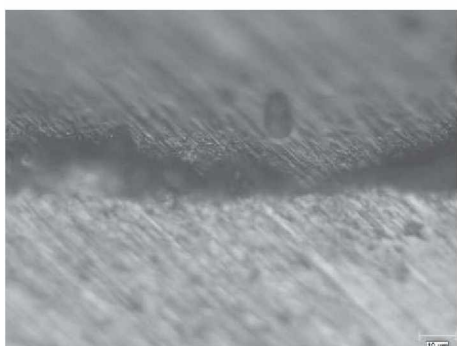


Abbildung 121: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Abbildung 122: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



Abbildung 123: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

## 10.3 Schichtdickenmessung der IMP

Messpunkt Nr.	Zusatzwerkstoff Al99,5					
	Aluminiumplatte Al99,5			Aluminiumplatte AlMgSi1		
	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt
1	5,1	1,6	1,6	6,1	4,3	x
2	5,0	1,9	1,9	6,5	4,4	x
3	4,7	1,8	2,2	6,2	4,9	x
4	4,9	2,3	2,4	6,6	5,5	x
5	4,7	2,3	2,6	3,0	4,4	x
6	5,0	2,3	2,7	6,4	4,2	x
7	4,6	2,6	2,9	6,6	4,5	x
8	3,6	2,7	3,2	6,9	4,3	x
9	3,6	2,7	3,3	6,6	4,3	x
10	3,9	2,9	3,3	6,8	4,4	x
11	2,8	5,0	3,7	6,7	x	x
12	2,9	5,5	3,9	7,0	x	x
13	3,3	5,2	3,9	6,9	x	x
14	1,3	5,4	4,3	x	x	x
15	1,5	5,5	4,4	x	x	x
16	1,8	7,2	4,7	x	x	x
17	1,9	7,4	5,1	x	x	x
18	1,9	7,9	5,1	x	x	x
19	4,7	6,2	5,2	x	x	x
20	4,9	9,8	5,3	x	x	x
<b>Mittelwert</b>	<b>3,61</b>	<b>4,51</b>	<b>3,6</b>	<b>6,35</b>	<b>4,52</b>	<b>x</b>
<b>Standardabw.</b>	<b>1,34</b>	<b>2,54</b>	<b>1,16</b>	<b>1,04</b>	<b>0,39</b>	

Angaben in  $\mu\text{m}$ 

Tabelle 16: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff Al99,5

Messpunkt Nr.	Zusatzwerkstoff AlSi3Mn					
	Aluminiumplatte Al99,5			Aluminiumplatte AlMgSi1		
	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt
1	1,3	1,1	1,9	2,5	2,1	1,9
2	1,4	0,9	1,7	2,1	2,0	1,4
3	1,5	1,1	5,2	1,8	2,1	1,6
4	1,5	1,1	1,7	1,4	1,9	1,6
5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,7	1,8
6	1,5	1,2	1,4	1,0	1,5	1,4
7	1,8	1,2	2,5	0,7	1,4	3,2
8	2,0	1,3	2,1	0,7	3,5	3,1
9	1,4	1,3	2,2	1,0	8,8	3,9
10	1,9	1,1	1,8	1,0	3,7	4,9
11	1,9	1,2	1,2	0,7	3,7	4,7
12	1,4	1,2	1,8	0,8	2,5	3,2
13	1,4	1,1	2,5	0,9	3,5	3,0
14	1,4	1,7	2,3	0,9	3,6	4,5
15	1,4	1,7	2,6	0,7	3,2	4,8
16	2,7	2,0	2,8	0,7	1,5	4,5
17	3,8	1,7	2,7	0,7	1,5	4,6
18	3,8	2,6	1,7	1,0	1,3	4,3
19	3,9	2,6	2,7	1,3	1,4	4,3
20	4,0	2,6	2,4	1,8	1,4	4,6
<b>Mittelwert</b>	<b>2,04</b>	<b>1,49</b>	<b>2,22</b>	<b>1,1</b>	<b>2,37</b>	<b>3,36</b>
<b>Standardabw.</b>	<b>0,98</b>	<b>0,54</b>	<b>0,84</b>	<b>0,55</b>	<b>0,96</b>	<b>1,32</b>

Angaben in  $\mu\text{m}$ 

Tabelle 17: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff AlSi3Mn

Messpunkt Nr.	Zusatzwerkstoff AlSi5					
	Aluminiumplatte Al99,5			Aluminiumplatte AlMgSi1		
	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt	unbehandelt	walzhart	kugelgestrahlt
1	0,8	0,8	2,4	1,2	1,0	1,7
2	0,8	1,0	2,1	3,2	0,8	1,8
3	0,7	0,8	1,4	3,7	0,7	2,2
4	0,7	0,9	2,3	3,4	0,6	2,4
5	0,6	0,7	1,5	3,0	0,8	2,5
6	0,9	1,1	1,7	3,3	0,7	2,0
7	0,8	0,9	2,2	3,2	1,0	1,9
8	0,7	1,1	1,9	0,9	1,4	2,1
9	0,8	1,5	2,4	1,3	1,5	1,5
10	0,9	1,3	1,8	0,9	1,1	2,1
11	0,8	1,2	1,7	0,9	1,3	0,8
12	1,1	1,2	2,2	1,1	1,2	0,8
13	0,8	1,3	1,9	1,0	1,4	0,8
14	0,9	0,9	2,0	0,8	1,2	0,9
15	0,9	1,1	2,5	0,9	0,9	x
16	1,1	0,8	2,6	0,8	1,0	x
17	0,9	1,6	4,8	0,7	1,2	x
18	1,3	1,5	4,0	0,7	1,2	x
19	0,9	1,4	5,0	0,7	1,1	x
20	1,2	1,5	4,9	0,8	1,1	x
<b>Mittelwert</b>	<b>0,88</b>	<b>1,14</b>	<b>2,56</b>	<b>1,6</b>	<b>1,06</b>	<b>1,68</b>
<b>Standardabw.</b>	<b>0,16</b>	<b>0,28</b>	<b>1,15</b>	<b>1,13</b>	<b>0,24</b>	<b>0,61</b>

Angaben in  $\mu\text{m}$ 

Tabelle 18: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff AlSi5

# 10.4 REM-EDX Analyse der IMP

Zusatzwerkstoff Al 99,5																							
Aluminiumplatte Al 99,5						Aluminiumplatte AlMgSi1																	
Stahlplatte unbehandelt		Stahlplatte walzhart		Stahlplatte kugelgestrahlt		Stahlplatte unbehandelt		Stahlplatte walzhart		Stahlplatte kugelgestrahlt													
Position	% Al	% Si	% Fe	Position	% Al	% Si	% Fe	Position	% Al	% Si	% Fe												
A	51,78	0,12	48,10	A	55,07	0,14	44,79	A	51,74	0,14	48,12	A	49,65	0,40	49,94	A	52,71	0,17	47,12	A	x	x	x
A	51,61	0,28	47,91	A	51,75	0,36	47,89	A	51,39	0,31	48,30	A	50,84	0,48	48,69	A	51,39	0,11	48,50	A	x	x	x
A	51,93	0,06	48,01	A	51,96	0,18	47,86	A	50,06	0,81	49,13	A	50,86	0,58	48,56	A	51,88	0,17	47,94	A	x	x	x
A	53,55	0,05	46,40	A	52,55	0,06	47,39	A	52,43	0,24	47,33	A	51,37	0,70	47,94	A	50,19	0,52	49,30	A	x	x	x
A	53,51	0,37	46,12	A	50,93	0,63	48,44	A	48,50	0,39	51,11	A	50,45	0,60	48,95	A	51,03	-0,04	49,01	A	x	x	x
A	50,72	0,20	49,08	A	50,89	0,13	48,98	A	49,29	0,75	49,96	A	50,22	0,70	49,08	A	50,32	0,17	49,50	A	x	x	x
A	52,88	0,04	47,08	A	51,04	0,32	48,64	A	49,39	0,33	50,28	A	51,12	0,24	48,64	A	50,26	0,36	49,38	A	x	x	x
A	51,19	0,16	48,65	A	51,16	0,20	48,64	A	42,94	0,47	56,59	A	49,60	0,63	49,77	A	50,57	0,27	49,16	A	x	x	x
A	51,17	0,26	48,57	A	51,26	0,42	48,32	A	50,63	0,55	48,82	A	50,78	0,37	48,85	A	50,43	0,29	49,28	A	x	x	x
A	49,30	0,07	50,63	A	50,93	0,14	48,93	A	48,91	0,51	50,58	A	49,75	0,40	49,84	A	51,27	0,37	48,37	A	x	x	x
M	52,93	0,51	46,56	M	52,00	0,26	47,74	M	52,62	0,09	47,29	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	52,89	0,67	46,44	M	48,11	0,03	51,86	M	51,82	0,03	48,15	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	51,03	0,13	48,84	M	48,41	0,33	51,26	M	52,44	0,42	47,14	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	51,65	0,06	48,29	M	53,05	0,12	46,83	M	52,54	0,04	47,42	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	53,91	0,05	46,04	M	52,69	0,16	47,15	M	51,66	0,01	48,33	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	53,75	0,46	45,79	M	54,83	0,10	45,07	M	56,84	0,04	41,32	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	51,15	0,14	48,71	M	54,27	0,19	45,54	M	49,49	0,42	50,09	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	52,10	0,17	47,73	M	45,95	0,15	53,90	M	51,65	0,34	48,01	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	50,57	1,27	48,16	M	58,73	0,11	41,16	M	50,24	0,01	49,75	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
M	55,14	0,66	44,20	M	53,65	0,24	46,11	M	51,20	0,06	48,74	M	x	x	x	M	x	x	x	M	x	x	x
E	52,91	0,15	46,94	E	54,13	0,03	45,84	E	50,98	0,47	48,55	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	52,23	0,37	47,40	E	54,62	0,15	45,23	E	49,33	0,11	50,56	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	51,80	0,11	48,09	E	53,45	0,42	46,13	E	52,78	0,08	47,14	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	50,21	0,18	49,61	E	55,73	0,09	44,18	E	51,45	0,42	48,13	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	50,44	0,03	49,53	E	51,84	0,96	47,20	E	49,82	0,09	50,09	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	52,22	0,06	47,72	E	55,47	0,34	44,19	E	50,39	0,51	49,10	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	53,43	0,99	45,58	E	51,75	0,36	47,89	E	52,62	0,05	47,33	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	50,35	0,93	48,72	E	51,96	0,18	47,86	E	52,03	0,08	47,89	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	56,84	0,73	42,43	E	52,55	0,06	47,39	E	51,13	0,17	48,70	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
E	59,69	0,06	40,25	E	55,43	0,13	44,44	E	50,75	0,40	48,85	E	x	x	x	E	x	x	x	E	x	x	x
<b>Mittelwert</b>	<b>52,4</b>	<b>0,3</b>	<b>47,3</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>52,5</b>	<b>0,2</b>	<b>47,2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>51,0</b>	<b>0,3</b>	<b>48,8</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>50,5</b>	<b>0,5</b>	<b>49,0</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>51,0</b>	<b>0,2</b>	<b>48,8</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
→ in at-%:	69,4	0,4	30,2	→ in at-%:	69,5	0,3	30,2	→ in at-%:	68,1	0,4	31,5	→ in at-%:	67,6	0,7	31,7	→ in at-%:	68,2	0,3	31,5	→ in at-%:	x	x	x

Tabelle 19: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff Al99,5

Zusatzwerkstoff AlSi3Mn

Aluminiumplatine Al 99,5

Aluminiumplatine AlMgSi1

Stahlplatine unbehandelt

Stahlplatine walzhart

Stahlplatine kugelgestrahlt

Stahlplatine unbehandelt

Stahlplatine walzhart

Stahlplatine kugelgestrahlt

Position	% Al	% Si	% Fe
A	57,27	5,84	36,89
A	56,78	4,92	38,30
A	55,98	3,62	40,40
A	58,79	5,47	35,74
A	56,53	4,09	37,38
A	56,82	4,85	38,33
A	58,98	4,64	36,38
A	54,59	3,70	41,71
A	55,59	4,46	39,95
A	53,76	3,81	42,43
M	59,98	6,31	33,71
M	61,60	4,06	34,34
M	64,70	4,72	30,58
M	60,88	2,93	36,19
M	58,86	3,74	37,40
M	58,66	3,56	37,78
M	53,02	2,64	44,34
M	55,64	2,95	41,41
M	57,86	5,13	37,01
M	55,23	3,86	40,91
E	52,77	3,35	43,88
E	51,39	4,01	44,60
E	53,67	0,09	46,24
E	48,44	6,33	45,23
E	48,89	3,15	47,96
E	55,75	4,18	40,07
E	49,05	3,84	47,11
E	49,40	3,79	46,81
E	49,87	3,30	46,83
E	55,38	4,94	39,68
<b>Mittelwert</b>	<b>55,6</b>	<b>4,1</b>	<b>40,3</b>
<b>-- in at-%:</b>	<b>70,3</b>	<b>5,2</b>	<b>24,5</b>

Position	% Al	% Si	% Fe
A	52,91	2,18	44,91
A	52,29	3,33	44,38
A	56,18	3,60	40,22
A	58,39	3,52	38,09
A	53,58	6,00	40,42
A	56,68	4,52	38,80
A	53,80	2,79	43,41
A	53,55	2,39	44,06
A	50,79	2,61	48,60
A	54,79	2,56	42,65
M	58,62	2,25	39,13
M	57,39	3,43	39,18
M	59,15	3,92	36,93
M	58,86	2,97	38,17
M	57,49	3,15	39,38
M	57,66	4,33	38,01
M	60,44	2,50	37,06
M	56,79	4,08	39,13
M	54,52	6,27	39,21
M	56,60	3,62	39,78
E	58,93	2,59	38,48
E	50,98	3,11	45,91
E	55,11	2,73	42,16
E	62,04	4,08	33,88
E	58,89	2,72	38,39
E	50,85	2,61	46,54
E	45,85	7,43	46,72
E	47,29	3,81	48,90
E	54,22	2,37	43,41
E	52,47	4,27	43,26
<b>Mittelwert</b>	<b>55,2</b>	<b>3,5</b>	<b>41,2</b>
<b>→ in at-%:</b>	<b>70,3</b>	<b>4,0</b>	<b>25,6</b>

Position	% Al	% Si	% Fe
A	55,60	4,69	39,71
A	53,67	2,24	44,09
A	49,42	2,13	48,45
A	53,99	2,49	43,52
A	50,85	2,05	47,10
A	47,79	2,90	49,31
A	46,20	3,78	50,02
A	47,32	3,50	49,18
A	47,69	4,24	48,07
A	47,65	3,91	48,44
M	49,79	3,73	46,48
M	41,07	3,60	55,33
M	53,53	3,07	43,40
M	52,11	3,50	44,39
M	50,81	3,47	45,72
M	57,29	4,34	38,37
M	54,60	4,54	40,86
M	49,33	3,39	47,28
M	52,07	2,16	45,77
M	49,51	3,00	47,49
E	48,51	2,13	49,36
E	47,75	2,00	50,25
E	47,44	2,48	50,08
E	51,97	2,29	45,74
E	50,80	3,70	45,60
E	48,51	2,07	49,42
E	47,56	4,11	48,33
E	49,42	2,81	47,77
E	53,07	5,29	41,64
E	52,93	3,08	43,99
<b>Mittelwert</b>	<b>50,3</b>	<b>3,2</b>	<b>46,5</b>
<b>→ in at-%:</b>	<b>66,1</b>	<b>4,1</b>	<b>29,9</b>

Position	% Al	% Si	% Fe
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
A	x	x	x
M	58,68	9,68	31,64
M	52,65	13,71	33,64
M	55,73	0,91	43,36
M	54,32	7,75	37,93
M	59,34	10,94	38,72
M	58,18	6,17	35,65
M	53,69	1,58	44,73
M	59,95	6,81	33,24
M	57,40	5,39	37,21
M	59,12	9,71	31,17
E	59,70	6,42	33,88
E	57,62	6,68	35,70
E	55,09	6,90	38,01
E	56,72	9,42	33,86
E	56,72	6,78	36,50
E	57,18	9,43	33,39
E	59,46	8,60	31,94
E	59,98	9,27	30,75
E	63,20	7,89	28,91
E	61,02	1,64	37,34
<b>Mittelwert</b>	<b>57,3</b>	<b>7,3</b>	<b>35,4</b>
<b>→ in at-%:</b>	<b>70,4</b>	<b>8,7</b>	<b>20,9</b>

Position	% Al	% Si	% Fe
A	58,96	4,25	36,79
A	58,80	4,70	36,50
A	60,97	4,42	34,61
A	53,94	3,30	42,76
A	59,93	4,13	35,94
A	57,80	3,74	38,46
A	59,85	4,19	35,96
A	55,45	3,99	40,56
A	60,41	5,06	34,53
A	63,35	4,95	31,70
M	55,11	5,36	39,53
M	55,36	4,29	40,35
M	56,93	2,60	40,47
M	61,52	3,55	34,93
M	55,63	3,82	40,55
M	59,27	5,68	35,05
M	59,24	5,83	34,93
M	55,12	5,09	39,79
M	57,38	2,73	39,89
M	57,30	1,78	40,92
E	56,73	5,72	37,55
E	55,20	3,71	41,09
E	59,58	5,32	35,10
E	60,24	4,25	35,51
E	60,99	3,77	35,24
E	60,24	1,77	37,99
E	59,56	3,93	36,51
E	59,88	4,94	35,18
E	55,86	3,51	40,63
E	59,52	3,77	36,71
<b>Mittelwert</b>	<b>58,3</b>	<b>4,1</b>	<b>37,5</b>
<b>→ in at-%:</b>	<b>72,5</b>	<b>5,0</b>	<b>22,5</b>

Position	% Al	% Si	% Fe
A	57,62	3,61	38,77
A	51,43	3,68	44,89
A	59,03	4,48	36,49
A	64,80	5,45	29,75
A	59,38	4,98	35,64
A	60,41	3,38	36,21
A	63,80	6,35	29,85
A	70,29	6,20	23,51
A	56,60	3,67	39,73
A	59,60	1,24	39,16
M	57,04	3,83	39,13
M	53,79	5,53	40,68
M	59,26	8,84	31,90
M	63,43	4,71	31,86
M	60,34	2,22	37,44
M	58,42	3,22	38,36
M	58,15	5,59	36,26
M	60,44	4,68	34,88
M	59,58	2,67	37,75
M	60,28	3,47	36,25
E	59,78	4,15	36,07
E	59,17	3,63	37,20
E	56,53	4,58	38,89
E	62,42	8,74	28,84
E	57,71	6,80	36,49
E	58,31	5,83	35,86
E	59,64	7,27	33,09
E	59,50	2,07	38,43
E	58,98	2,55	38,47
E	59,49	2,29	38,22
<b>Mittelwert</b>	<b>59,5</b>	<b>4,5</b>	<b>36,0</b>
<b>→ in at-%:</b>	<b>73,4</b>	<b>5,2</b>	<b>21,4</b>

Tabelle 20: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff AlSi3Mn

Zusatzwerkstoff AISi5

Aluminiumplatine Al 99,5

Aluminiumplatine AlMgSi1

Stahlplatine unbehandelt

Stahlplatine walzhart

Stahlplatine kugelgestrahlt

Stahlplatine unbehandelt

Stahlplatine walzhart

Stahlplatine kugelgestrahlt

Position	% Al	% Si	% Fe
A	58,54	5,36	36,10
A	55,21	8,86	35,93
A	56,67	8,20	35,13
A	56,47	8,00	35,53
A	57,87	6,30	35,83
A	61,80	4,61	33,59
A	56,88	4,89	38,23
A	61,94	5,99	32,07
A	55,17	8,49	36,34
A	58,21	4,99	36,80
M	54,70	9,94	35,36
M	66,46	6,42	27,12
M	51,14	10,06	38,80
M	58,03	12,22	29,75
M	59,53	11,60	28,87
M	53,53	8,27	38,20
M	54,88	8,88	36,44
M	59,00	9,85	31,15
M	53,33	10,07	36,60
M	55,56	8,10	36,34
E	54,47	8,97	36,56
E	59,52	4,90	35,58
E	54,95	9,28	35,79
E	53,26	8,40	38,34
E	55,03	8,24	36,73
E	53,66	10,16	36,18
E	58,37	5,29	36,34
E	59,70	3,87	36,43
E	59,57	4,01	36,42
E	55,65	9,74	34,61
<b>Mittelwert</b>	<b>57,0</b>	<b>7,8</b>	<b>35,2</b>
→ In at-%:	69,9	9,2	20,9

Position	% Al	% Si	% Fe
A	57,68	2,68	39,64
A	56,65	4,71	38,64
A	57,73	8,91	33,36
A	56,32	4,75	38,93
A	59,00	5,28	35,72
A	54,18	10,17	35,65
A	57,69	2,58	39,73
A	58,95	5,81	35,24
A	56,40	6,39	37,21
A	59,12	9,71	31,17
M	58,70	7,42	33,88
M	55,62	7,68	36,70
M	55,09	6,90	38,01
M	57,72	5,42	36,86
M	57,72	8,78	35,50
M	57,18	9,43	33,39
M	59,46	8,60	31,94
M	59,98	9,27	30,75
M	63,20	7,89	28,91
M	61,02	7,64	31,34
E	55,43	9,47	35,10
E	59,33	5,19	35,48
E	61,02	6,84	32,14
E	52,41	9,65	37,94
E	58,58	6,11	35,31
E	54,86	6,82	38,32
E	53,85	7,68	38,47
E	55,32	9,56	35,12
E	55,54	10,10	34,36
E	55,06	10,95	33,99
<b>Mittelwert</b>	<b>57,4</b>	<b>7,3</b>	<b>35,3</b>
→ In at-%:	70,4	8,7	20,9

Position	% Al	% Si	% Fe
A	55,72	7,64	36,64
A	64,65	6,55	28,80
A	53,59	7,18	39,23
A	56,16	7,41	36,43
A	59,00	6,38	39,89
A	53,45	8,13	38,42
A	54,53	8,98	36,49
A	56,76	8,63	34,61
A	59,33	7,52	33,15
A	57,66	7,23	35,11
M	57,51	6,49	36,00
M	60,80	7,00	32,20
M	57,23	6,12	36,65
M	59,22	6,75	34,03
M	56,37	12,79	30,84
M	57,62	8,69	33,69
M	55,73	11,00	33,27
M	50,04	14,51	35,45
M	55,07	2,10	42,83
M	54,00	5,57	40,43
E	57,44	13,78	28,78
E	56,79	9,59	33,62
E	57,86	4,34	37,80
E	62,43	3,32	34,25
E	52,74	13,55	33,71
E	58,36	4,20	37,44
E	58,02	3,64	38,34
E	56,14	3,96	39,90
E	55,76	9,79	34,45
E	54,16	4,17	41,67
<b>Mittelwert</b>	<b>56,6</b>	<b>7,6</b>	<b>35,8</b>
→ In at-%:	69,7	8,9	21,4

Position	% Al	% Si	% Fe
A	61,54	3,36	35,10
A	59,21	4,86	35,93
A	58,67	6,20	35,13
A	59,47	5,00	35,53
A	57,87	6,30	35,83
A	58,80	1,61	39,59
A	55,88	5,89	38,23
A	59,94	5,99	34,07
A	58,17	6,49	35,34
A	59,21	4,99	35,80
M	58,70	5,94	35,36
M	60,46	5,42	34,12
M	57,14	4,06	38,80
M	61,03	9,22	29,75
M	61,53	9,60	28,87
M	58,53	6,27	35,20
M	54,88	8,68	36,44
M	59,00	9,85	31,15
M	58,33	6,07	35,60
M	55,56	8,10	36,34
E	58,47	4,97	36,56
E	58,52	5,90	35,58
E	57,95	6,26	35,79
E	57,26	4,40	38,34
E	58,03	5,24	36,73
E	59,66	2,16	38,18
E	61,37	5,29	33,34
E	61,70	1,87	36,43
E	61,57	2,01	36,42
E	60,65	4,74	34,61
<b>Mittelwert</b>	<b>59,0</b>	<b>5,6</b>	<b>35,5</b>
→ In at-%:	72,4	6,6	21,0

Position	% Al	% Si	% Fe
A	64,68	0,68	34,64
A	63,65	0,71	35,64
A	61,73	1,91	36,36
A	62,32	2,75	34,93
A	63,00	3,28	33,72
A	60,18	4,17	35,65
A	62,69	3,58	33,73
A	60,95	4,81	34,24
A	61,40	4,39	34,21
A	62,12	9,71	28,17
M	62,70	2,42	34,88
M	61,62	4,38	34,00
M	60,09	5,90	34,01
M	62,72	6,42	30,86
M	61,72	5,78	32,50
M	66,18	0,43	33,39
M	64,46	4,60	30,94
M	63,98	5,27	30,75
M	63,20	0,89	35,91
M	61,02	4,64	34,34
E	62,43	5,47	32,10
E	62,33	2,19	35,48
E	61,02	1,84	37,14
E	63,41	0,65	35,94
E	62,58	2,11	35,31
E	61,86	3,82	34,32
E	61,85	2,68	35,47
E	61,32	4,56	34,12
E	61,54	3,10	35,36
E	62,06	3,95	33,99
<b>Mittelwert</b>	<b>62,4</b>	<b>3,6</b>	<b>34,1</b>
→ In at-%:	75,8	4,2	20,0

Position	% Al	% Si	% Fe
A	52,72	4,64	42,64
A	53,65	4,55	41,80
A	52,59	5,18	42,23
A	52,16	4,41	43,43
A	53,73	4,38	41,89
A	53,45	4,13	42,42
A	54,53	3,98	41,49
A	51,76	3,63	44,61
A	55,33	3,52	41,15
A	50,66	8,23	41,11
M	52,51	4,44	43,05
M	51,60	5,00	43,20
M	52,23	5,12	42,65
M	54,22	2,75	43,03
M	50,37	6,79	42,84
M	53,62	4,69	41,69
M	53,73	3,00	43,27
M	50,04	4,51	45,45
M	51,07	4,10	44,83
M	54,00	3,57	42,43
E	50,44	4,78	44,78
E	51,79	4,59	43,62
E	54,86	4,34	40,80
E	52,43	5,32	42,25
E	51,74	4,55	43,71
E	50,36	5,20	44,44
E	52,02	4,64	43,34
E	50,14	4,96	44,90
E	50,76	4,79	44,45
E	53,16	5,17	41,67
<b>Mittelwert</b>	<b>52,4</b>	<b>4,6</b>	<b>43,0</b>
→ In at-%:	67,5	5,7	26,8

Tabelle 21: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff AISi5

## 10.5 Daten zur Zugprüfung

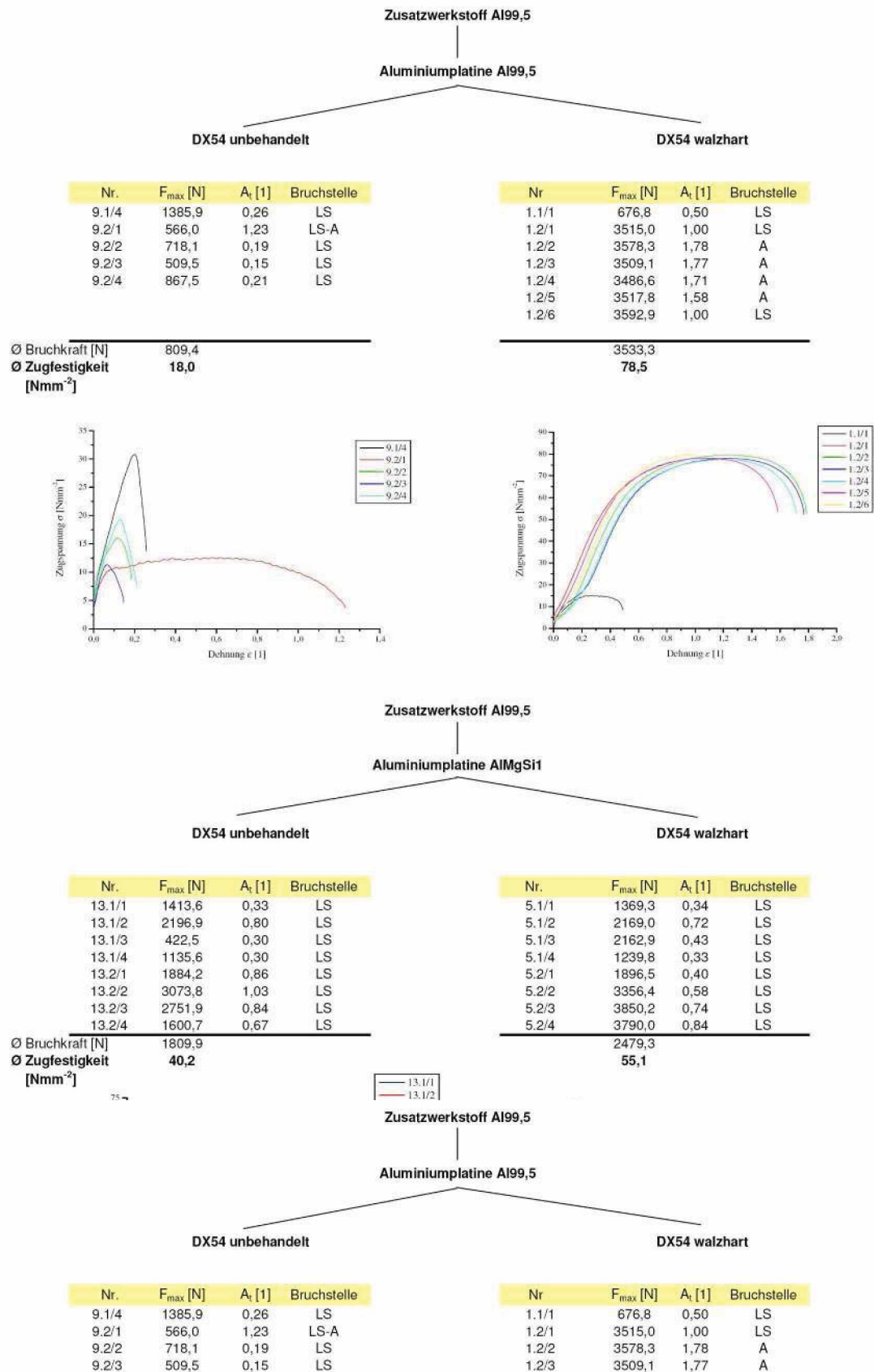


Abbildung 124: Zugprüfung; Auswertung der Ergebnisse, Zusatzwerkstoff Al99,5



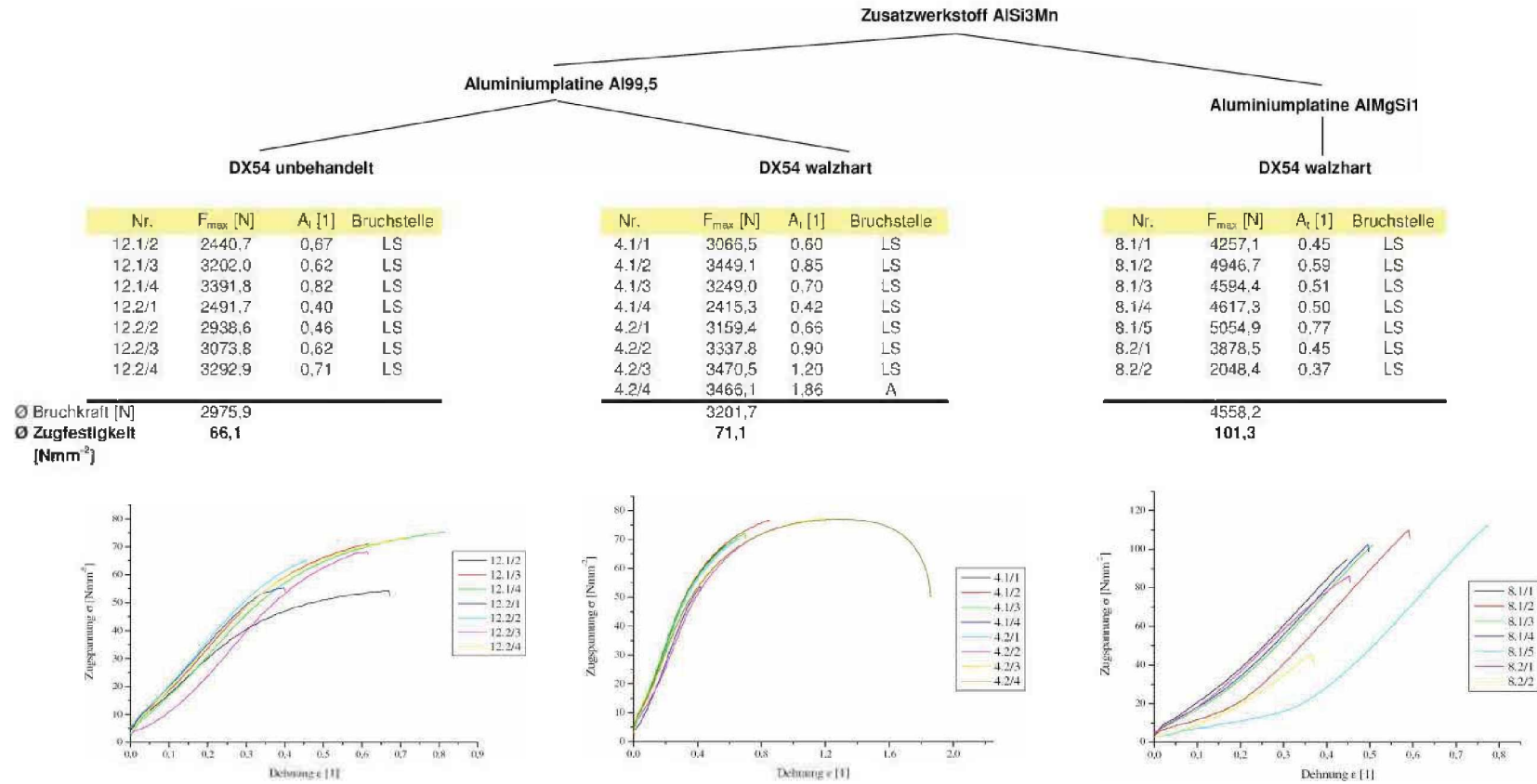


Abbildung 125: Zugprüfung; Auswertung der Ergebnisse, Zusatzwerkstoff AlSi3Mn

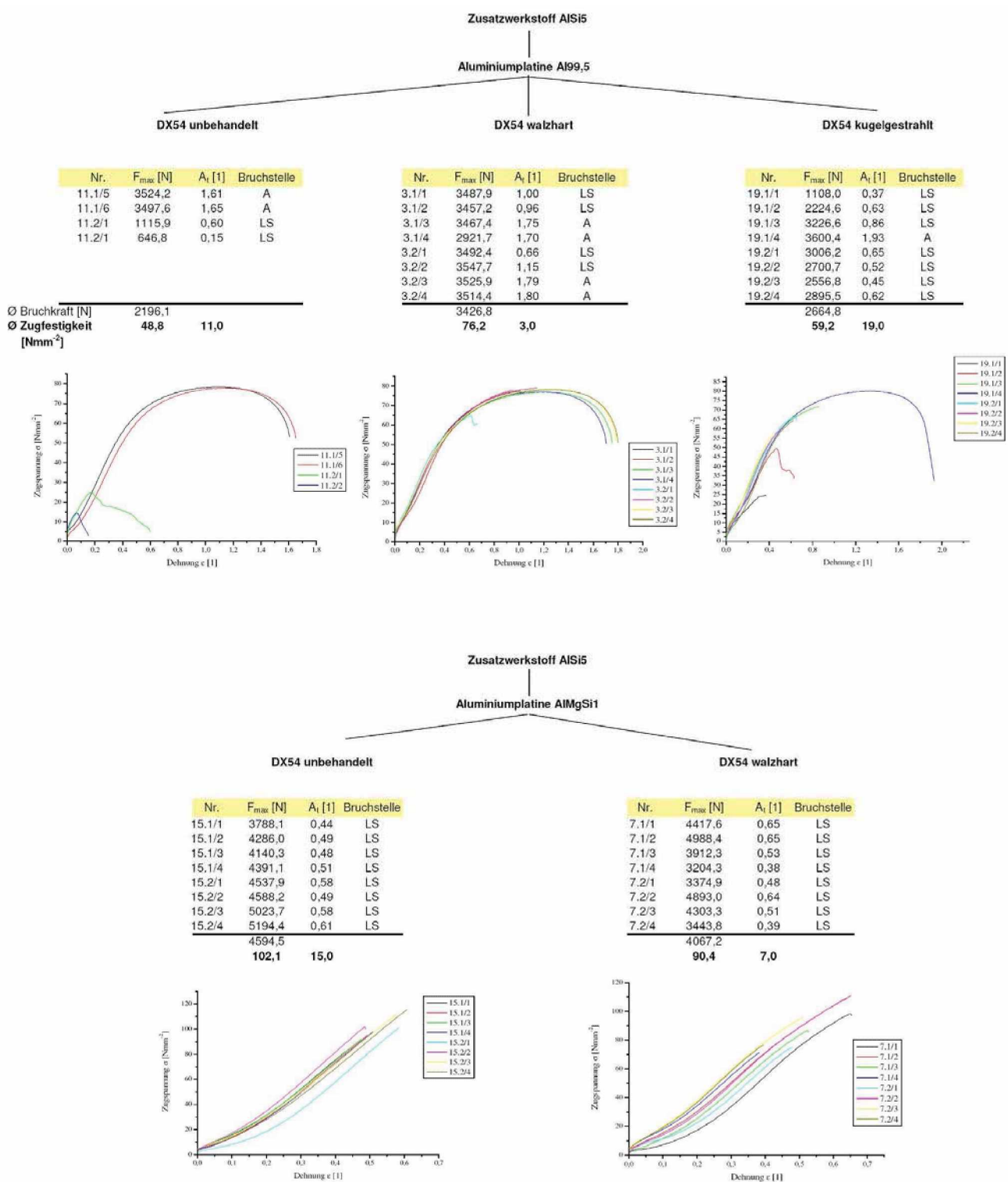


Abbildung 126: Zugprüfung; Auswertung der Ergebnisse, Zusatzwerkstoff AISi5

## 10.6 Nanointender: Daten zur Prüfung

Probe	E-Modul [GPa]	Standardabw.	Härte HV
1m	9,04	0,25	1076
5m	8,98	0,26	1068
7m	6,47	-	770
19m	7,45	0,39	886
20m	6,14	0,33	731

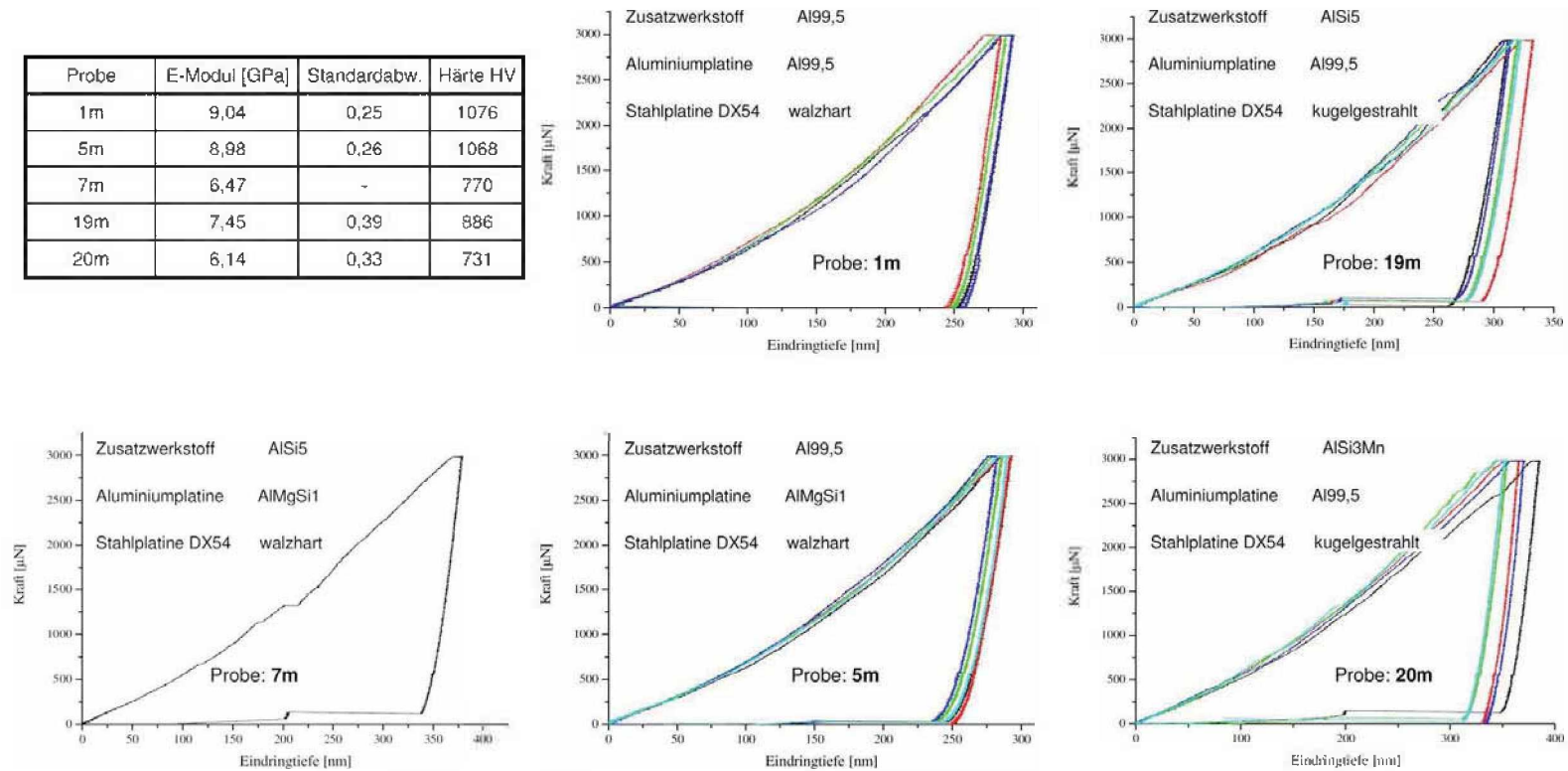


Abbildung 127: Nanointender; Auswertung der Ergebnisse

## 10.7 CMT Parameter

### CMT Parameter

Probe	Puls - Zyklen	CMT - Zyklen	$v_s$ [m/min]	Spannung U [V]	Spannung $U_{rms}$ [V]	Stromstärke I [A]	Stromstärke $I_{rms}$ [A]	$v_d$ [m/min]
1	7	10	0,45	12,2	14,7	68,2	80,8	3,50
3	7	10	0,45	12,6	15,0	68,9	81,9	3,57
4	7	10	0,45	12,0	14,3	68,7	81,7	3,32
7	7	10	0,45	11,5	13,6	69,0	81,9	3,50
8	7	10	0,45	11,8	14,1	69,1	82,1	3,50
9	7	10	0,45	12,2	14,7	68,2	80,7	3,50
11	7	10	0,45	12,1	14,5	68,6	81,3	3,61
12	7	10	0,45	11,7	14,1	68,3	80,9	3,41
Probe	Puls - Zyklen	CMT - Zyklen	$v_s$ [m/min]	Spannung U [V]	Spannung $U_{rms}$ [V]	Stromstärke I [A]	Stromstärke $I_{rms}$ [A]	$v_d$ [m/min]
1	7	10	0,45	12,2	14,7	68,2	80,8	3,50
3	7	10	0,45	12,6	15,0	68,9	81,9	3,57
4	7	10	0,45	12,0	14,3	68,7	81,7	3,32
7	7	10	0,45	11,5	13,6	69,0	81,9	3,50
8	7	10	0,45	11,8	14,1	69,1	82,1	3,50
9	7	10	0,45	12,2	14,7	68,2	80,7	3,50
11	7	10	0,45	12,1	14,5	68,6	81,3	3,61
12	7	10	0,45	11,7	14,1	68,3	80,9	3,41

Tabelle 22: CMT-Parameter der geschweißten Verbindungen

### Interne Probenbezeichnung

Probe	Aluminium- platte	Aluminium- blechdicke [mm]	Stahlplatte	Stahlblechdicke [mm]	Schweißzusatz- werkstoff	Lotdurchmesser [mm]
1	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	Al 99,5	1,2
3	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	AlSi5	1,2
4	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	AlSi3Mn1	1,2
5	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	Al 99,5	1,2
7	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	AlSi5	1,2
8	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	AlSi3Mn1	1,2
9	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	Al 99,5	1,2
11	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	AlSi5	1,2
12	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	AlSi3Mn1	1,2
13	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	Al 99,5	1,2
15	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	AlSi5	1,2
16	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	AlSi3Mn1	1,2
17	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>3</sup>	1	Al 99,5	1,2
19	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>3</sup>	1	AlSi5	1,2
20	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>3</sup>	1	AlSi3Mn1	1,2
21	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>3</sup>	1	Al 99,5	1,2
23	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>3</sup>	1	AlSi5	1,2
24	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>3</sup>	1	AlSi3Mn1	1,2

<sup>1</sup> walzhart  
<sup>2</sup> unbehandelt  
<sup>3</sup> kugelgestrahlt

Tabelle 23: Interne Probenbezeichnung

## 10.8 Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff AlZn5

### 10.8.1 Lichtmikroskopische- und REM-EDX-Aufnahmen

Zusatzwerkstoff AlZn5

Aluminiumplatine Al99,5

DX54 unbehandelt

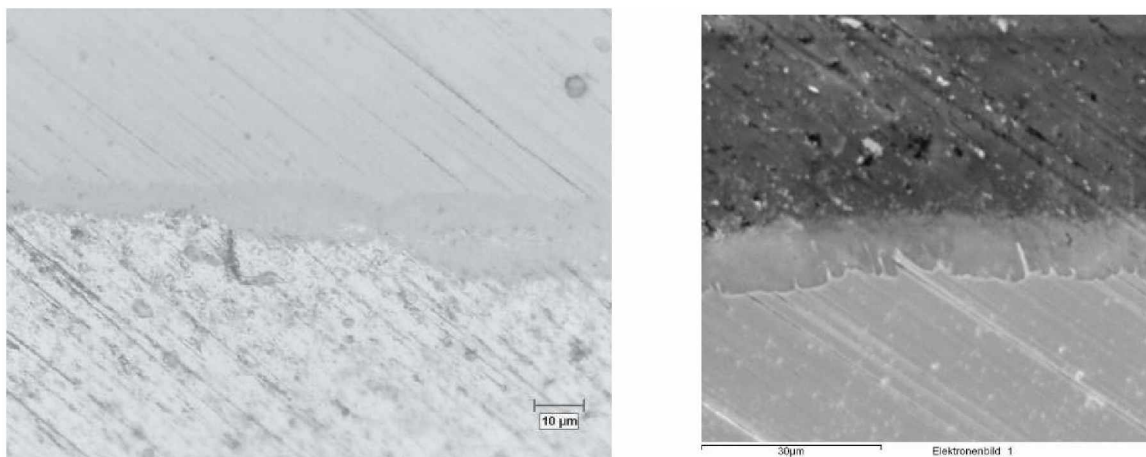


Abbildung 128: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

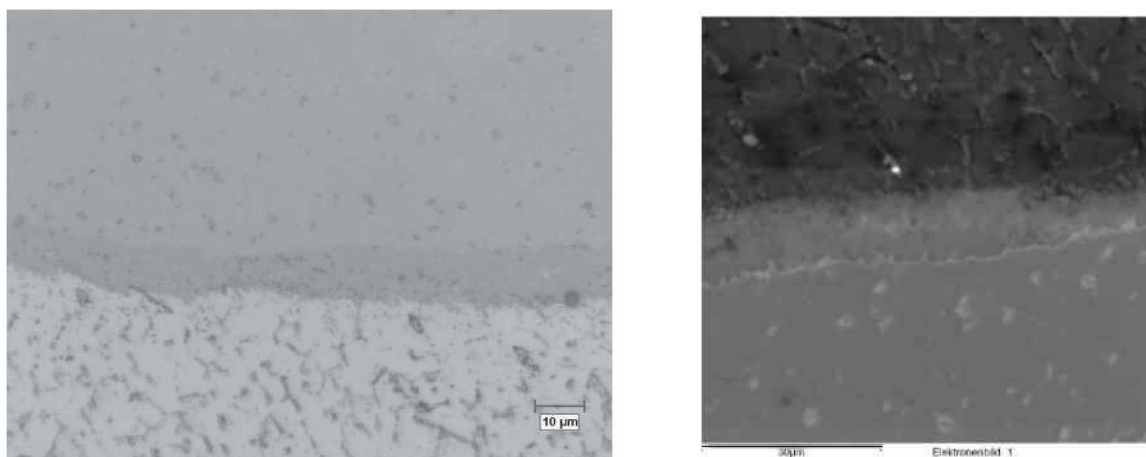


Abbildung 129: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

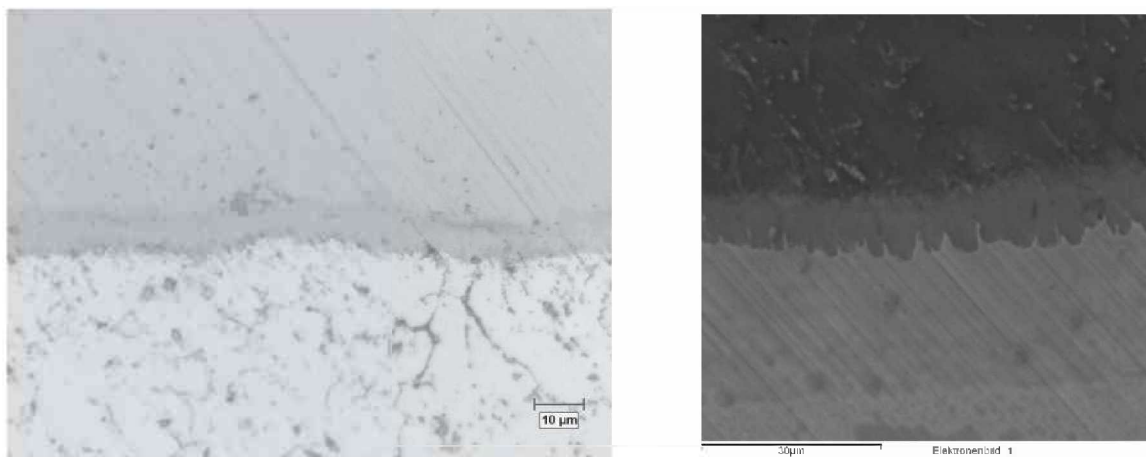


Abbildung 130: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AlZn5

Aluminiumplatte Al99,5

DX54 walzhart

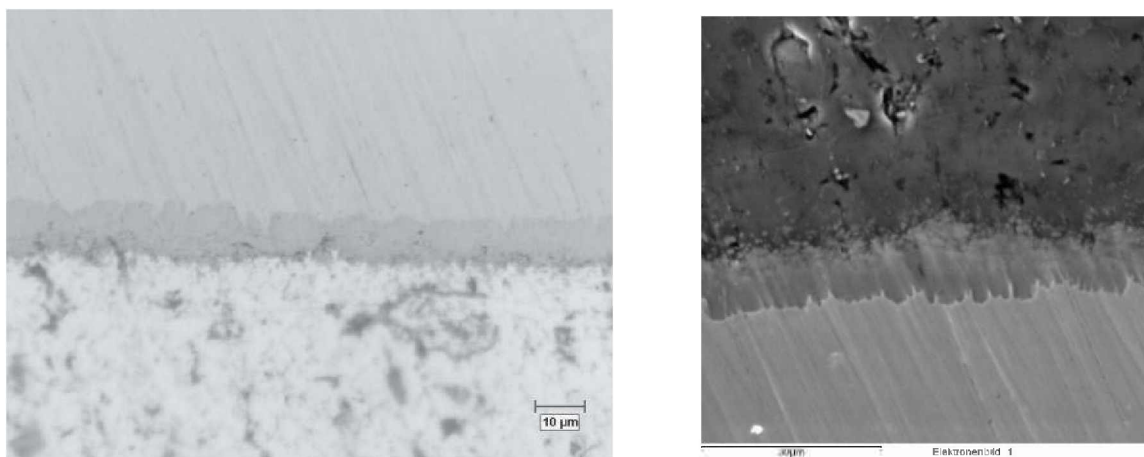


Abbildung 131: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

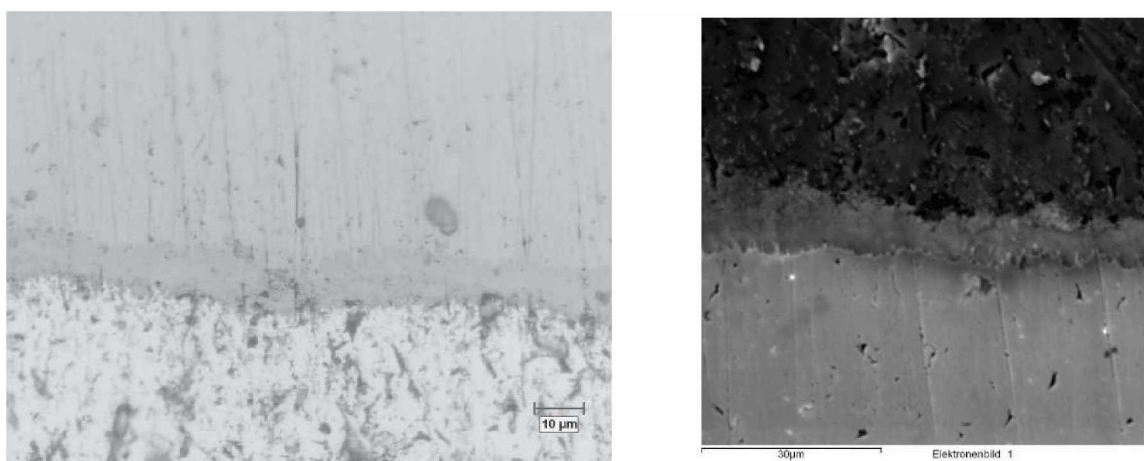


Abbildung 132: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

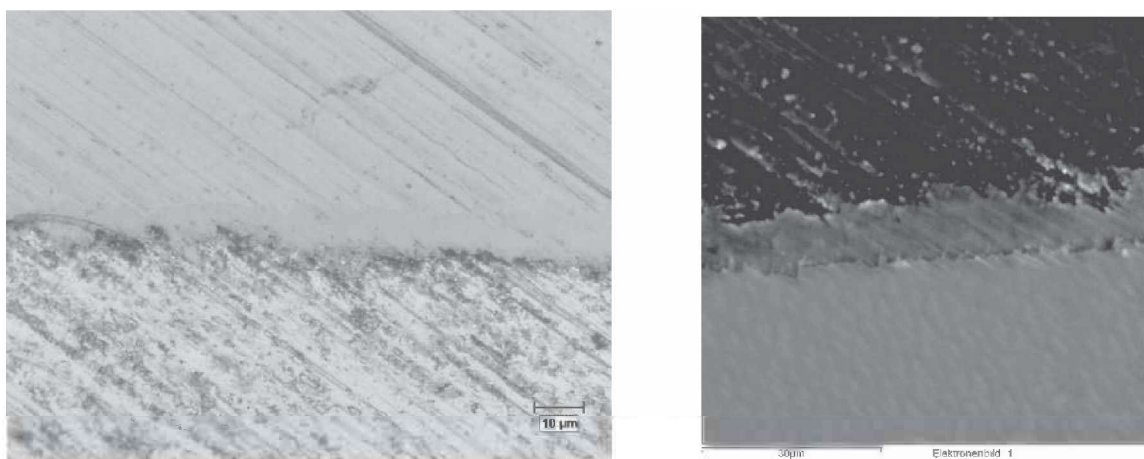


Abbildung 133: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AlZn5

Aluminiumplatte AlMgSi1

DX54 unbehandelt

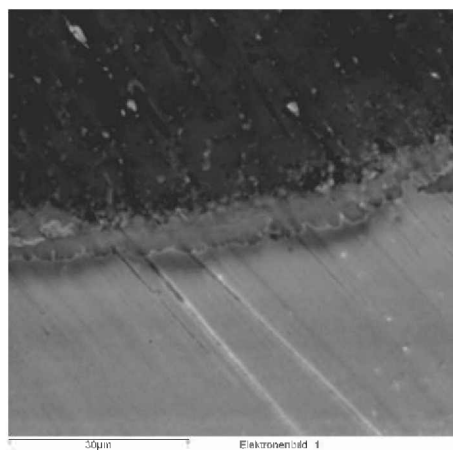


Abbildung 134: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

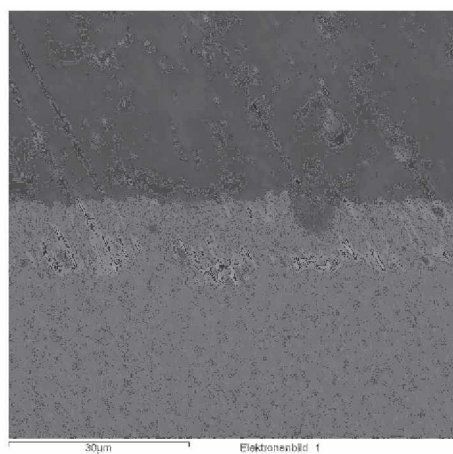


Abbildung 135: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

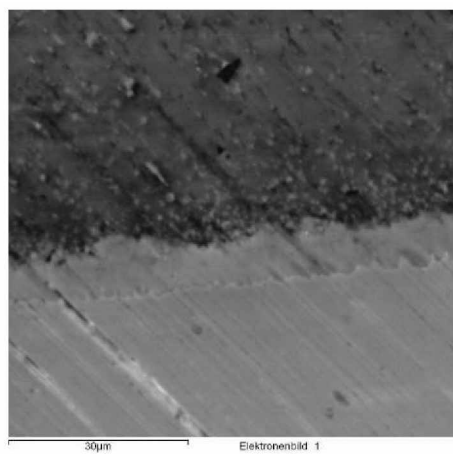


Abbildung 136: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

Zusatzwerkstoff AlZn5

Aluminiumplatine AlMgSi1

DX54 walzhart

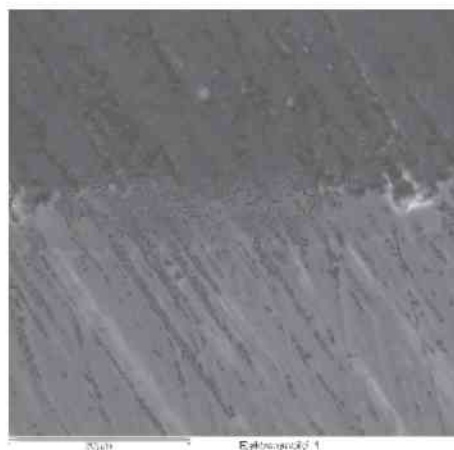
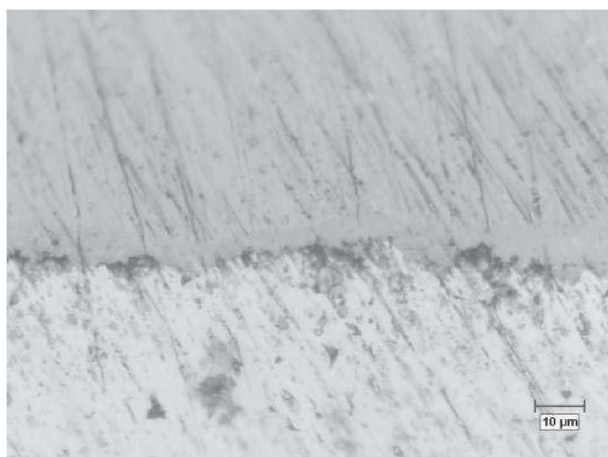


Abbildung 137: Schweißnahtanfang; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

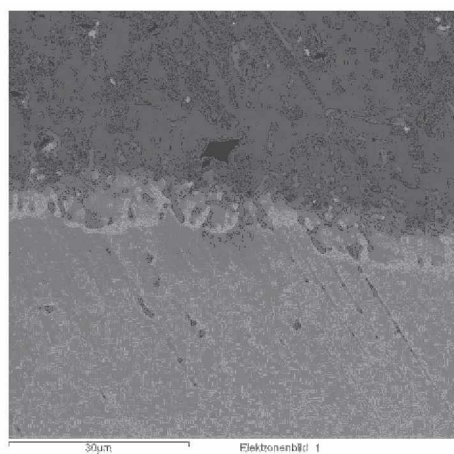


Abbildung 138: Schweißnahtmitte; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX

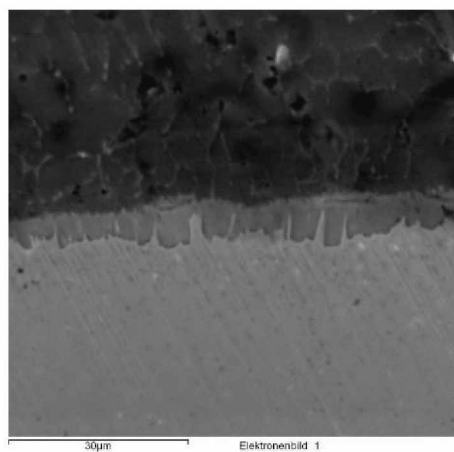
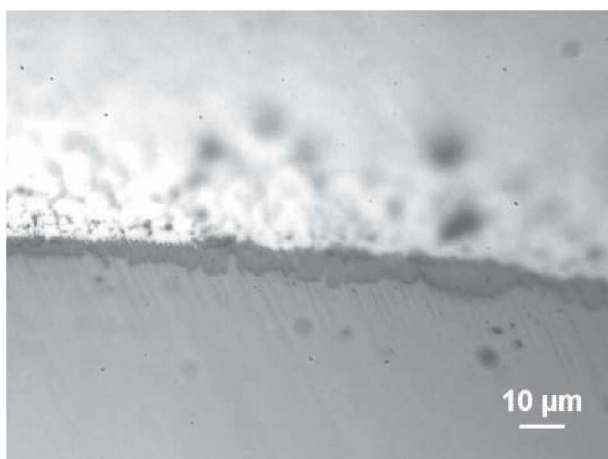


Abbildung 139: Schweißnahtende; links: Lichtmikroskop (500x), rechts: REM-EDX



## 10.8.2 Schichtdickenmessung der IMP

Zusatzwerkstoff AlZn5				
Aluminiumplatte Al99,5			Aluminiumplatte AlMgSi1	
Messpunkt Nr.	unbehandelt	walzhart	unbehandelt	walzhart
1	7,8	10,2	7,2	5,7
2	7,2	8,4	6,3	4,5
3	6,2	8,3	6,8	5,1
4	8,4	8,8	7,0	5,2
5	10,2	8,3	6,9	6,2
6	6,5	9,0	5,9	6,0
7	13,0	7,9	6,0	4,9
8	9,8	8,4	6,8	7,5
9	10,1	10,1	5,7	6,4
10	7,1	9,5	5,5	7,0
11	5,2	8,4	4,8	6,5
12	9,8	8,5	5,1	6,9
13	11,2	8,0	5,0	8,4
14	6,4	10,2	5,5	8,0
15	8,5	10,5	8,7	6,9
16	7,1	9,3	6,8	4,5
17	6,5	7,2	7,1	6,3
18	8,3	7,9	6,6	8,1
19	6,8	7,6	6,9	6,5
20	7,1	8,1	6,6	6,4
<b>Mittelwert</b>	<b>8,2</b>	<b>8,7</b>	<b>6,4</b>	<b>6,4</b>
<b>Standardabw.</b>	<b>1,97</b>	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	<b>1,14</b>

Angaben in µm

Tabelle 24: Schichtdickenmessung, Zusatzwerkstoff AlZn5

## 10.8.3 REM-EDX Konzentrationen

Zusatzwerkstoff AlZn5											
Aluminiumplatte Al 99,5			Aluminiumplatte AlMgSi1								
Stahlplatte unbehandelt		Stahlplatte walzhart	Stahlplatte unbehandelt		Stahlplatte walzhart						
Position	% Al	% Fe	Position	% Al	% Fe	Position	% Al	% Fe	Position	% Al	% Fe
A	57,27	42,73	A	56,09	43,91	A	59,18	40,82	A	56,74	41,26
A	56,99	43,01	A	59,03	40,97	A	59,80	40,20	A	60,52	39,48
A	57,16	42,84	A	55,78	44,22	A	57,29	42,71	A	65,13	34,87
A	48,74	51,26	A	56,50	43,50	A	59,84	40,16	A	67,56	32,44
A	59,90	40,10	A	55,81	44,19	A	59,79	40,21	A	64,30	35,70
A	57,40	42,60	A	58,48	41,52	A	57,46	42,54	A	56,52	41,48
A	57,61	42,39	A	57,81	42,19	A	65,01	34,99	A	66,03	33,97
A	61,49	38,51	A	57,98	42,02	A	56,15	43,85	A	63,85	36,15
A	61,89	38,11	A	61,45	38,55	A	57,67	42,33	A	60,65	39,35
A	62,15	37,85	A	59,09	40,91	A	56,46	43,54	A	56,89	43,11
M	58,97	41,03	M	61,80	38,20	M	x	x	M	60,20	39,80
M	56,74	43,26	M	61,65	38,35	M	x	x	M	60,90	39,10
M	55,04	44,96	M	61,81	38,19	M	x	x	M	56,68	43,32
M	55,96	44,04	M	66,28	33,72	M	x	x	M	63,41	36,59
M	56,80	43,20	M	62,68	37,32	M	x	x	M	61,90	38,10
M	57,27	42,73	M	66,43	33,57	M	x	x	M	61,90	38,10
M	55,41	44,59	M	61,70	38,30	M	x	x	M	65,00	37,00
M	58,71	41,29	M	58,94	41,06	M	x	x	M	62,96	37,04
M	57,78	42,22	M	60,51	39,49	M	x	x	M	57,51	42,49
M	58,84	41,16	M	58,31	41,69	M	x	x	M	48,35	51,65
E	63,70	36,30	E	61,78	38,22	E	57,34	42,66	E	59,26	40,74
E	59,95	40,05	E	61,35	28,65	E	58,65	41,35	E	60,47	39,53
E	63,29	36,71	E	61,45	38,55	E	58,59	41,41	E	62,44	37,56
E	64,14	35,86	E	55,36	44,64	E	59,32	40,68	E	59,27	40,73
E	58,80	41,40	E	57,98	42,02	E	57,54	42,46	E	64,52	35,48
E	60,98	39,02	E	60,08	39,92	E	62,57	37,43	E	61,10	38,90
E	63,53	36,47	E	57,83	42,17	E	59,99	40,01	E	60,32	39,68
E	66,50	33,50	E	62,63	47,37	E	62,74	37,26	E	56,69	41,31
E	58,27	41,73	E	62,66	47,34	E	63,20	36,80	E	58,75	41,25
E	57,77	42,23	E	56,92	43,08	E	62,32	37,68	E	58,59	41,41
<b>Mittelwert</b>	<b>59,0</b>	<b>41,0</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>59,2</b>	<b>40,5</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>59,5</b>	<b>40,5</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>60,7</b>	<b>39,3</b>
→ in at-%:	74,9	25,1	→ in at-%:	75,2	24,8	→ in at-%:	75,3	24,7	→ in at-%:	76,2	23,8

Tabelle 25: REM-EDX Analyse der IMP, Zusatzwerkstoff AlZn5

### 10.8.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der Verwendung des Zusatzwerkstoffes AlZn5 bildete sich eine relativ dicke intermetallische Phase aus. Die Dicke erreichte unter Verwendung der Aluminiumplatte Al99,5 eine Größe von etwa 8  $\mu\text{m}$  – im Gegensatz zur Aluminiumplatte AlMgSi1 die eine Dicke von 6,4  $\mu\text{m}$  aufwies.

Die grobe, fingerförmige Struktur der intermetallischen Phasen ist in den REM-EDX Aufnahmen deutlich zu erkennen.

Die gemessenen Konzentrationen der IMP weisen unter den verwendeten Werkstoffkombinationen keine Unterschiede auf. Mithilfe des binären Zustandsdiagramms, Abbildung 1, konnte bei sämtlichen Proben die intermetallische Phase als  $\text{FeAl}_3$  charakterisiert werden.

### 10.8.5 Schweißparameter

#### CMT - Parameter für den Zusatzwerkstoff AlZn5

Probe	Puls - Zyklen	CMT - Zyklen	$v_s$ [m/min]	Spannung U [V]	Stromstärke I [A]	Stromstärke $I_{rms}$ [A]	$v_d$ [m/min]
1	8	7	0,30	12,2	70,3	84,2	3,52
2	8	7	0,30	12,2	70,0	83,8	3,90
3	8	7	0,30	11,8	70,0	83,8	3,90
4	8	7	0,30	11,8	70,0	83,8	3,70

Tabelle 26: CMT-Parameter der geschweißten Verbindungen

#### interne Probenbezeichnung für den Zusatzwerkstoff AlZn5

Probe	Aluminiumplatte	Aluminiumblechdicke [mm]	Stahlplatte	Stahlblechdicke [mm]	Schweißzusatzwerkstoff	Lotdurchmesser [mm]
1	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	AlZn5	1,2
2	Al 99,5	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	AlZn5	1,2
3	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>1</sup>	1	AlZn5	1,2
4	AlMgSi1	1,5	DX 54 <sup>2</sup>	1	AlZn5	1,2

<sup>1</sup> unbehandelt

<sup>2</sup> walzhart

Tabelle 27: Interne Probenbezeichnung