Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Fertigungstechnik

13.770 B / 4

Name der Forschungsstelle

AiF-Vorhaben-Nr. /GAG

1.6.2003 bis 31.5.2005

Bewilligungszeitraum

# Schlussbericht für den Zeitraum : 1.6.2003 bis 31.5.2005

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die

geförderten IGF-Forschungsvorhaben
Normalverfahren

Forschungsthema:
Untersuchung der metallurgischen Grundlagen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen dünner Aluminiumbleche

(Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht)

Ilmenau, 28.9.2005

Unterschrift des Projektleiters

Abschlussbericht

Antragsteller:

Forschungsvereinigung Schweißen
und verwandte Verfahren e. V.
Aachener Straße 172
40223 Düsseldorf

Forschungsstelle:

Fachgebiet Fertigungstechnik
Technische Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden
Neuhaus 1
98693 Ilmenau

Thema: Untersuchung der metallurgischen Grundlagen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen dünner Aluminiumbleche

AiF-Nr.: 13.770 B

Laufzeit: 01.06.2003 bis 30.05.2005

Berichtsdatum: September 2005

**Zusammenfassung**

Der zunehmende Einsatz von Aluminiumwerkstoffen verlangt nach innovativen Strategien für dessen Bearbeitung. Der Schweißtechnik wird unter diesen Gesichtspunkt zunehmend besonders Rechnung getragen. Aluminiumwerkstoffe gelten im Allgemeinen als schweißgeeignet, wobei die hohe Wärmeleitfähigkeit und die hochschmelzende Oxidschicht die Prozessführung stark beeinflussen.

Hochleistungsverfahren, wie zum Beispiel das Laserstrahlschweißen und das Elektronenstrahlschweißen bieten den Vorteil einer örtlich begrenzten Wärmezufuhr, so dass diese Verfahren sich in der Serienfertigung etabliert haben.

KmU stellen in der Regel ein dynamisches System dar, das auf wechselnde Randbedingungen im Markt schnell reagieren muss. Dabei müssen kmU sehr flexibel agieren, d.h. gegebenenfalls kleine Stückzahlen bei hoher Typenvielfalt zu fertigen. Unter diesem Gesichtspunkt sind die bereits genannten Verfahren mit einem hohen Investitionsaufwand verknüpft.

Das WIG-Schweißen und das MIG-Schweißen bieten an dieser Stelle den Vorteil der geringen Investitionskosten, haben jedoch aus technologischer Sicht den Nachteil einerseits der hohen Wärmeeinbringung in das Bauteil und des damit verbundenen Verzuges und andererseits der Spritzerbildung, die die optischen Eigenschaften negativ beeinflussen.

Die Plasma-Technik stellt eine kostengünstige Alternative zum Stichlochschweißen dar und kann für Aluminiumlegierungen bis zu Dicken von 5 mm eingesetzt werden. Der Einsatz von drahtförmigen Zusatzwerkstoffen begrenzt jedoch die 3-D Tauglichkeit des Verfahrens, so dass die Entwicklung und die Anwendung des Plasma-Pulver-Verbindungsschweißens vorzuziehen ist. Die Übertragung und die Durchführung von Schweißarbeiten auf dünne Aluminiumbleche mit einer Dicke < 2 mm mit AlSi-Legierungen wurde in vorherigen Untersuchungen als eher mäßig bezeichnet. Pulverpartikel besitzen eine eigene Oxidhaut, die eine hohe Wärmeeinbringung zum Zerstören erfordert. Dieser Eintrag führt bereits zum Aufschmelzen des Blechwerkstoffes noch vor dem Aufschmelzen des Pulverwerkstoffes.

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen belegen, dass eine direkte Übertragung der Erkenntnisse zur Prozessführung auf Dünnbleche nicht möglich ist. Im Rahmen des Vorhabens

konnten jedoch Prozessfenster für die Bearbeitung von 2 mm und 1,5 mm Blechen erarbeitet werden. Die Reproduzierbarkeit ist grundsätzlich gegeben, auch wenn leichte Abweichungen vom optimalen Bereich bereits zu Unregelmäßigkeiten führen können. Die Untersuchungen zeigen, dass als Prozesskenngrößen die Balance, die Schweißgeschwindigkeit, die Plasmagasmenge und der Schweißstrom im Zusammenspiel mit der verwendeten Werkstoffkombination das Nahtprofil und die Schweißnahtgüte bestimmen.
Für das Plasma Wechselstromschweißen ist es empfehlenswert ein Verhältnis der Plus/Minushalbwelle um 30/70 % einzustellen, um eine Durchschweißung des Aluminiums bei gleichzeitigem Aufschmelzen des Pulverwerkstoffes zu erreichen. Für Bleche der Stärke 1,5 mm gilt ein Stromstärkenbereich von 40-50 A bei einer Schweißgeschwindigkeit um 40 cm/min. Der Einsatz weiterer Zusatzwerkstoffe wie AlSi12, AlMg5 oder AlMgSi0,5 ändert das Verhalten nicht wesentlich. Rissbildung konnte in diesem Zusammenhang nicht festgestellt werden.
Einen ausgeprägten Einfluss der Oxidpulverbelegung konnte nicht nachgewiesen werden. Vielmehr spielt eine regelmäßige Förderung des Pulvers eine wichtige Rolle. Diese ist bei der geringen geförderten Menge und bei der geringen Dichte des Aluminiums mit den heutigen Pulverförderern für das PPAW nicht immer gewährleistet.

Aluminiumbauteile werden nach dem Fügeprozess einer Eloxalbehandlung unterzogen, mit dem Ziel die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen. Dabei handelt sich um einen elektrochemischen Vorgang. Unter konventionellen Bedingungen, d.h. bei dem Einsatz von Al-Si-Legierungen weist das Schweißgut ein völlig anderes Verhalten auf, da das elektrochemische Potenzial auf Grund der chemischen Zusammensetzung verändert wird. Aus diesem Grund sind im Rahmen der Untersuchungen andere Zusatzwerkstoffe auf Basis AlMg und AlMgSi ausgewählt worden mit dem Ziel, eine Annährung des Verhaltens des Schweißgutes zum Grundwerkstoff zu erzielen und somit die Farbechtheit zu gewährleisten.
Alle untersuchten Kombinationen weisen eine bessere Farbechtheit als AlSi-Legierungen auf.

Im Fall der naturharten Legierungen konnte durch den Einsatz eines artgleichen Zusatzwerkstoffes eine hohe Güte erreicht werden. Die Verbindungen, die auch bei

unterschiedlichen Farben (rot, blau und schwarz) bewertet worden sind, zeigen eine eindeutige Farbechtheit zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass in diesem Fall die chemische Zusammensetzung eine wichtigere Rolle als der Gefügezustand spielt. Nur im Bereich der WEZ konnte eine messerförmige Zone erkannt werden, in der der Aufbau der Oxidschicht unterschiedlich ist, wobei dieses Merkmal mit den geometrischen Eigenschaften der Schweißnaht verknüpft werden kann. Die Schweißnaht weist in der Regel im Decklagenbereich eine geringe Oberflächenrauheit auf, die durch die ungeschmolzenen Partikel hervorgerufen wird. Ein Abtragen der Nahtüberhöhung führt bereits zu wesentlich besseren Ergebnissen. Poren wirken sich grundsätzlich negativ aus, da diese als bevorzugte Angriffstelle beim Eloxieren wirken.
Der Einsatz eines artgleichen Werkstoffes führt nicht zu einer Abnahme des mechanisch-technologischen Eigenschaftsprofils der Verbindung. Festigkeit und Verformbarkeit bleiben unverändert, während das Versagen am Übergang WEZ/Schweißgut auftritt.

Die Ergebnisse an den aushärtbaren Legierungen zeigen, dass auch in diesem Fall bei artgleichen Verbindungen, d.h. bei ähnlicher Zusammensetzung, eine gute Farbannährung zu erkennen ist. Auch wenn die Ausscheidungsverteilung in der WEZ/GW/Schweißgut sehr unterschiedlich ist, kann für den praxisrelevanten Einsatz davon ausgegangen werden, dass nur geringfügige Farbunterschiede auftreten. Der Einsatz artfremder Zusatzwerkstoffe verschlechtert zwar das Ergebnis, jedoch ist die Farbabweichung sehr begrenzt. In diesem Fall ist jedoch mit einer Abnahme der Zugfestigkeit zu rechnen, die mit der Härteabnahme neben der Schweißnaht verknüpft ist.

Zusammenfassend lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse feststellen, dass:

- das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen auch für dünnere Bleche prozesssicher und wirtschaftlich (0,4 m/min) durchgeführt werden kann.
- Für den praxisrelevanten Einsatz der chemischen Zusammensetzung in Bezug auf die Farbechtheit besonders Rechnung zu tragen ist. Der Gefügezustand spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle für das Eloxierverhalten.

**Projektbegleitender Ausschuss**

**Castolin GmbH**

Herr Dipl.-Ing. W. Satke, Gutenbergstr. 10, 65830 Kriftel, Deutschland

**DURUM GmbH**

Herr Dr.-Ing. F. Schreiber, Linsellensstraße 125, 47877 Willich, Deutschland

**Weld Consult GmbH**

Herr Dr. U. Wende, Neckarstr. 52, 45219 Essen, Deutschland

**Schnelldorfer Maschinenbau GmbH**

Herr Dr. Wolf, Kappelweg 6, 91625 Schnelldorf, Deutschland

**ABICOR BINZEL GmbH**

Herr Dr.-Ing. E. Schubert, Kiesacker, 35418 Buseck, Deutschland

**Messer Griesheim GmbH**

Herr Dipl.-Ing. Wolters, Fütingsweg 34, 47793 Krefeld, Deutschland

*1 Einleitung und Problemstellung ... 1*

*2 Stand der Technik ... 2*

**2.1 Einsatz von Aluminiumwerkstoffen ... 2**

**2.2 Aluminiumwerkstoffe und deren Schweißeignung ... 3**

**2.3 Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen zum Fügen von Aluminiumwerkstoffen ... 8**

2.3.1 Anodisieren von Aluminiumwerkstoffen ... 16

*3 Zielsetzung ... 19*

*4 Experimentelle Vorgehensweise ... 21*

**4.1 Werkstoffauswahl ... 21**

**4.2 Schweißanlage und Handhabungssystem ... 22**

**4.3 Methoden zur Bewertung der Eigenschaften der Verbindung ... 25**

4.3.1 Makroskopische Beurteilung, Metallographie und Härteprüfung ... 25

4.3.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersive Röntgenanalytik (EDX) ... 26

4.3.3 Rutherford-Back-Scattering (RBS) ... 26

4.3.4 Quasistatische mechanische Eigenschaften ... 28

**4.4 Probennachbehandlung (Eloxalprozess) ... 28**

*5 Ergebnisse und Diskussion ... 30*

**5.1 Werkstoff- und prozesstechnische Grundlagen für das Schweißen von Aluminiumblechen der Dicke 2 mm ... 30**

5.1.1 Zusammenfassung der Untersuchungen an 2 mm Blechen ... 38

**5.2 Übertragung der Erkenntnisse auf Aluminiumblechwerkstoffe der Dicke < 2 mm ... 38**

5.2.1 Eigenschaftsprofil hinsichtlich Prozessreproduzierbarkeit, Farbechtheit und mechanisches Verhalten von AlMg-Legierungen ... 39

5.2.2 Eigenschaftsprofil hinsichtlich Prozessreproduzierbarkeit, Farbechteheit und mechanisches Verhalten von AlMgSi-Legierungen ... 44

*6 Zusammenfassung ... 56*

*7 Literaturverzeichnis ... 60*

# 1 Einleitung und Problemstellung

Leichtbaukonstruktionen finden über den Flug- und Fahrzeugbau zunehmend Interesse für eine Vielzahl von Anwendungen im Apparatebau. Exemplarisch sei hier die Lüftungs- und Klimatechnik, der Schaltschrankbau oder auch der Lebensmittelapparatebau genannt. Die erforderlichen Verbindungen werden heute meist mittels WIG-, MIG- oder teilweise auch mittels Laserstrahlschweißens hergestellt. Mit der Plasma-Pulver-Verbindungsschweißtechnik (PPAW) steht seit kurzem ein Schweißverfahren für kmU zur Verfügung, das im Vergleich zum WIG den Vorteil der höheren erzielbaren Prozessgeschwindigkeit, zum MIG den Vorteil der geringeren Spritzerbildung, reduzierten Schweißnahtbreite sowie Richtungsunabhängigkeit der Werkstoffzufuhr und zur Lasertechnik den Vorteil der einfacheren Handhabbarkeit und geringeren Investitionskosten bietet.
Auf Grund der genannten Vorteile besteht seitens kmU großes Interesse daran, das PPAW zum Fügen dünner höherfester Aluminiumbleche einsetzen zu können. Hierbei ergibt sich neben der Prozesstechnik die Problematik eines geeigneten Schweißzusatzwerkstoffes. Da die zu schweißenden Bauteile im Allgemeinen nach dem Fügeprozess einerseits aus Korrosionsschutzgründen und andererseits aus optischen Gründen eloxiert werden, muss die Schweißnaht farbecht eloxierbar sein. Hieraus ergibt sich die wissenschaftliche Problemstellung für industriell relevante Al-Bleche Empfehlungen zum Einsatz eloxierfähiger Schweißzusatzwerkstoffe zu erarbeiten, die sowohl den Festigkeitsanforderungen und den optischen Anforderungen genügen als auch prozesssicher mit dem PPAW verarbeitbar sind.

# 2 Stand der Technik

## 2.1 Einsatz von Aluminiumwerkstoffen

Der Einsatz von Aluminiumwerkstoffen hat in den letzten Jahren rasant zugenommen. In jüngster Zeit kam wieder Dynamik in den Aluminiumpreis. Zeitweise notierte das Leichtmetall auf dem höchsten Stand seit Anfang 1995. Dennoch bleibt die Preisentwicklung hinter anderen Metallen - insbesondere gegenüber Zink - zurück. Die Nachfrage steigt jedoch stärker als das Angebot. Bereits 2004 kam es zu einem Nachfrageüberhang von rund 0,35 Millionen Tonnen Aluminium. In diesem Jahr soll sich das Defizit auf 0,45 Millionen Tonnen noch vergrößern. Hinzu kommt, dass die Herstellung von Aluminium sehr energieaufwendig ist. Da sich die Energiepreise nach oben bewegen, dürften die Aluminiumhersteller diese Kostensteigerungen weitergeben.

Abbildung 1: Preisentwicklung des Werkstoffes Aluminium (/www05/) im Zeitraum 2003-2005.

Bereits im Jahre 2001 kündigte der Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. an (/Wellner01/), dass für das laufende Jahr eine weitere positive konjunkturelle Entwicklung und mittel- bis langfristig ein stabiles Wachstum in allen Märkten zu erwarten war. Der Aluminiumbedarf in Deutschland lag im Jahr 2000 bei rund 2,6 Mill. Tonnen. Hauptmärkte für Aluminiumprodukte waren dabei der Verkehrssektor mit 41 Prozent (%) Marktanteil, der Bau mit 18 %, der Maschinenbau mit 9 % und der

Verpackungssektor mit 7 %. Bei der Pro-Kopf-Nutzung lag dabei die Bundesrepublik mit 27,1 Kilogramm in Europa an der Spitze. Im Jahr 2004 lag der Umsatz der deutschen Aluminiumindustrie bei 13,2 Mrd. Euro, was einem Anstieg von 1,5% gegenüber dem Vorjahr entspricht. Der Bedarf in Deutschland ist um ca. 2,3% auf 3,02 Millionen Tonnen gewachsen (/GDA04/).
In Anwendungen des Verkehrssektors, des Bauwesens, der Elektrotechnik, in der Verpackung und weiteren bedeutenden Märkten sind Aluminiumprodukte heutzutage nicht mehr wegzudenken. Für die Anwendung und die Weiterentwicklung des Werkstoffes Aluminium stellt sicherlich der Automobilbau, wie bereits im Jahr 2001 auch von der GDA angekündigt, weiterhin eine treibende Kraft dar, wobei auch weitere Geschäftsfelder wie z.B. die Anlagentechnik oder die Verpackungsindustrie zunehmend an Bedeutung gewinnen.

## 2.2 Aluminiumwerkstoffe und deren Schweißeignung

Aluminiumwerkstoffe zeichnen sich auf Grund der geringen Dichte, der hohen Festigkeit, der außerordentlichen Langlebigkeit, der Korrosions- und Witterungsbeständigkeit sowie die Wiederverwertbarkeit aus. Darüber hinaus besitzen Aluminiumwerkstoffe eine ausgezeichnete Umformeignung, die es ermöglicht auf einfache Art und Weise Halbzeuge über Strangpressen herzustellen.

Reinaluminium besitzt eine kfz-Gitterstruktur und eine Schmelztemperatur von 660°C. Die geringe Festigkeit von Reinaluminium, die im Bereich von 40-120 $N/mm^2$ liegt, kann durch Zugabe von Legierungselementen (dabei handelt es sich um Mischkristall- und Ausscheidungshärtung) wesentlich erhöht werden.
Allgemein werden Aluminiumlegierungen in Knet- und Gusslegierungen unterteilt, die wiederum naturhart oder aushärtbar sein können. Die wichtigsten Legierungselemente für Al-Legierungen sind Silizium, Magnesium und Kupfer, wie Abbildung 2 schematisch veranschaulicht.

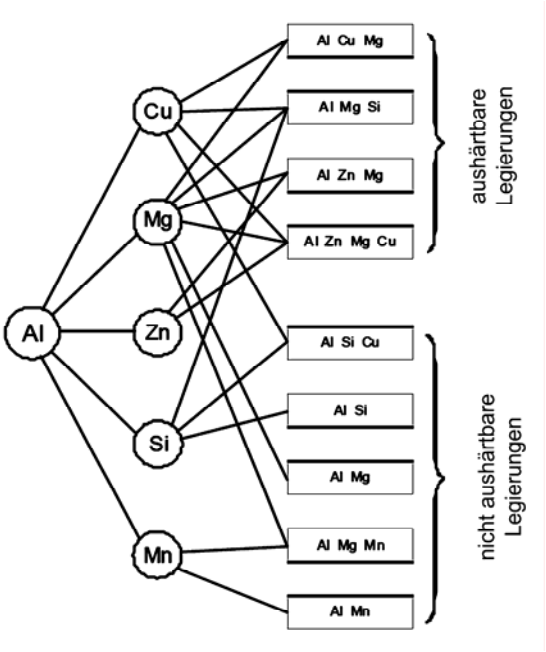



Abbildung 2: Schematische Einteilung der Aluminiumwerkstoffe (/Dilthey95/)

Die Mehrzahl der Aluminiumlegierungen besitzt eine ausreichend gute Schweißeignung, auch wenn sich das Schweißen auf Grund der thermophysikalischen und der werkstoffspezifischen Eigenschaften durch eine Vielzahl an Merkmalen im Vergleich zu unlegierten Stahlwerkstoffen auszeichnet. Eine zusammenfassende Darstellung der für die Schweißeignung maßgeblichen thermophysikalischen Eigenschaften gibt Tabelle 1 im Vergleich zu ferritischen und austenitischen Werkstoffen wieder.

| | | Al-Legierung | Stahl/Ferrit | Stahl/Austenit |
|---|---|---|---|---|
| spez. Wärmekapazität | kJ/kg K | 0,051 | 0,0262 | 0,0286 |
| spez. Entropie | W/m K | 9,7…17,7 | 2,26 | 1,13 |
| Ausdehnungskoeffizient | $K^{-1}$ | $24 \cdot 10^{-6}$ | $11,6 \cdot 10^{-6}$ | $17,5 \cdot 10^{-6}$ |
| Wärmeleitfähigkeit | W/m K | 110…220 | 46…50 | 15…21 |
| Dichte | $Kg/m^3$ | $2,6 – 2,8 \cdot 10^3$ | $7,7 \cdot 10^3$ | $7,8 \cdot 10^3$ |
| Schmelzbereich | K | 760…928 | 1673…1793 | 1593…1723 |

Tabelle 1: Thermophysikalische Eigenschaften von Aluminiumlegierungen und Stahl nach /Goecke04/.

Im Wesentlichen stellen die hohe Wärmeleitfähigkeit, die z.T. großen Erstarrungsintervalle sowie die hochschmelzenden Oxidschicht Merkmale dar, die die Schweißeignung beeinflussen. Typische auftretende Fehler beim Schweißen von

Aluminiumwerkstoffen sind Porosität, Heißrissbildung, Bindefehler und Spritzerbildung. Aus werkstofftechnischer Sicht treten auf Grund der Wärmezufuhr Entfestigung oder Lösungsglühen der Ausscheidungen, die mit einem Abfall der Festigkeitswerte im Bereich der Schweißnaht verknüpft sind.

Die hohe Affinität von Aluminium zu Sauerstoff führt zur Bildung einer charakteristischen Oxidhaut. Diese bildet sich in sehr kurzer Zeit und besitzt eine Dicke von 0,01 bis 0,1 µm. Die Schicht zeichnet sich dadurch aus, dass sie dünn, zäh, elektrisch nichtleitend und sehr dicht ist. Sie besteht aus einer porenfreien Sperrschicht und einer wasserstoff- und wasserhaltigen Deckschicht. Die den Aluminiumwerkstoff umgebende Oxidschicht verleiht dem Werkstoff zwar eine gute Korrosionsbeständigkeit, jedoch wird die Schweißeignung verringert.

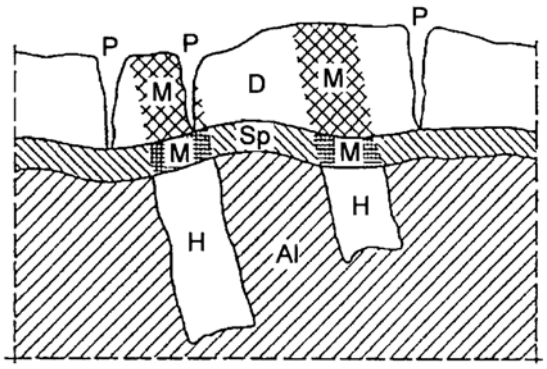



Abbildung 3: Aufbau einer auf Reinaluminium in feuchter Luft gebildeten Oxidschicht. Al: Grundwerkstoff; Sp: Sperrschicht; D: Deckschicht; P: Poren; H: Heterogenitäten im Grundwerkstoff; M: Mischoxid (/Gra97/).

Die Aluminiumoxidschicht ($Al_2O_3$) besitzt eine Schmelztemperatur über 2000°C. Beim Schweißen sinken die schweren und noch festen Oxide in der Aluminiumschmelze nach unten in die Wurzel oder haften an den Nahtflanken, so dass die Gefahr von Bindefehlern stark erhöht wird. Während des Schweißens wird die Neubildung der Oxidschicht durch den inerten Schutzgasmantel weitestgehend verhindert. In der industriellen Praxis wird dem Einfluss der Oxidschicht durch beispielsweise mechanisches Abarbeiten oder Beizen entgegengewirkt. Darüber hinaus kann beim WIG-Schweißen mit Wechselstrom die sogenannte kathodische Reinigungswirkung genutzt werden.

Der Löslichkeitssprung beim Übergang flüssig-fest begünstigt die Porenbildung. Aluminium besitzt im flüssigen Zustand eine etwa 20-mal höhere Wasserstofflöslichkeit als im festen Zustand, so dass es beim schnellen Abkühlen und Erstarrungsvorgang nach dem Schweißen zum „Einfrieren“ von Wasserstoff in Form von Poren kommt.

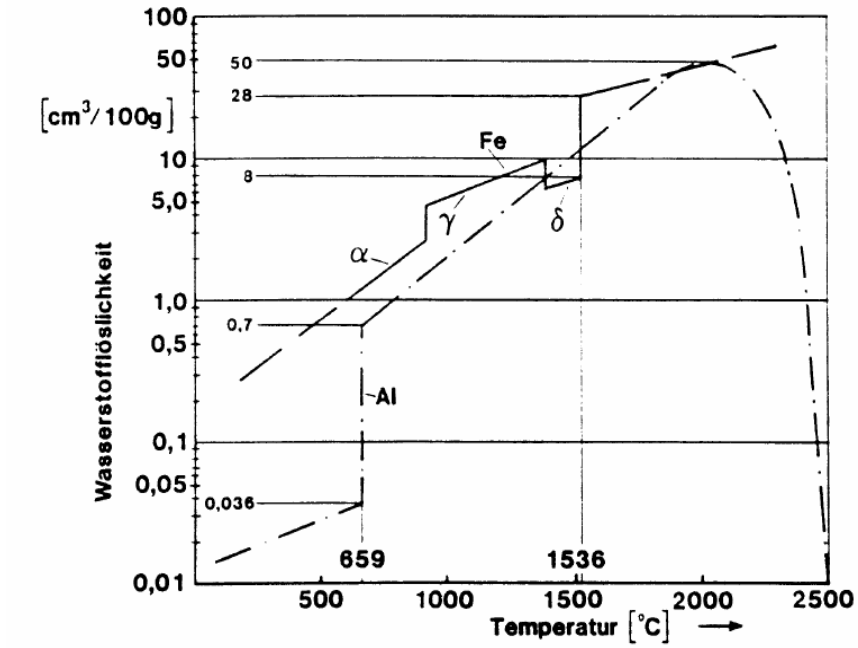
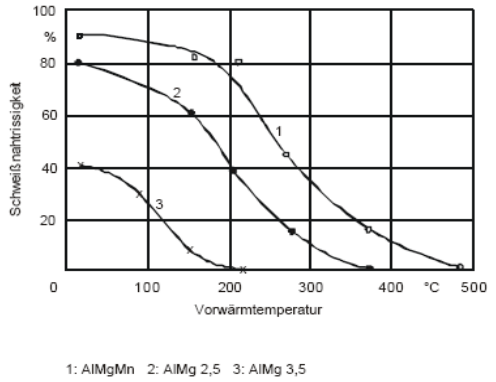



Abbildung 4: Temperaturabhängiger Verlauf der Wasserstofflöslichkeit in Aluminium (/Goecke04/).

Aluminiumwerkstoffe gelten im Allgemeinen als heißrissgefährdet. Heißrisse entstehen beim Abkühlen, wenn sich zwischen bereits gebildeten Kristallen noch flüssige Bereiche (z. B. niedrigschmelzende Eutektika) befinden. Diese lagern sich an den Korngrenzen ab. Beim Erstarren der Schmelze kommt es durch das Schrumpfen zu Lageveränderungen bereits erstarrter Körner. Die bei der Abkühlung entstehenden Schrumpfspannungen können durch die noch flüssigen Bereiche nicht aufgenommen werden (/Schoer98/). Der entstehende Riss ist interkristalliner Art.
Die Rissgefahr von Aluminiumlegierungen ist abhängig vom Legierungstyp und von der Höhe der Legierungsgehalte. Sie nimmt mit zunehmendem Erstarrungsintervall zu. So neigen z. B. nichtaushärtende Aluminiumlegierungen mit 1 - 2 % Magnesium verstärkt zur Heißrissbildung. Der Einsatz von Si-, Cr- oder Mn-haltigen Zusatzwerkstoffen begrenzt die Gefahr von Heißrissen (/Schoer98/, /Dilthey95/).

In der Praxis wird daher mit hochmagnesium- und hochsiliziumhaltigen Zusatzwerkstoffen gearbeitet. Bei AlSi-Werkstoffen kommt der Vorteil hinzu, dass bei der eutektischen Legierung AlSi12 ein Nachspeisen möglich ist.
Eine weitere häufig angewendete Maßnahme ist das Vorwärmen der Bleche zur Reduzierung der auftretenden Schrumpfung und somit Spannung.



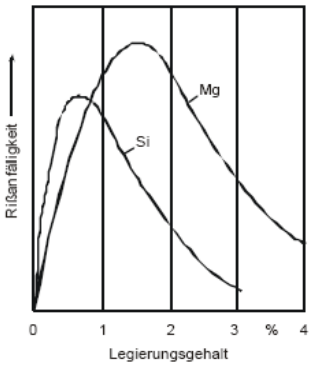




Abbildung 5: Abhilfemaßnahmen zur Vermeidung von Heißrissen beim Fügen von Aluminiumwerkstoffen (/Dilthey95/)

Heißrisse können auch in der WEZ auftreten, wo die an den Korngrenzen gelagerten niedrigschmelzenden Phasen auf Grund des Wärmeeintrages wiederaufgeschmolzen werden. Wiederaufschmelzrisse können in einem weiten Bereiche neben der Schweißnaht auftreten. Beim Laserstrahlschweißen kann dieser Bereich bis zu 100 µm breit sein (/Waldmann00/, /Hilbinger00/).

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumlegierungen führt in der Praxis zu einer raschen Bauteilerwärmung, zu einer verminderten Schweißgeschwindigkeit und zu einer reduzierten Einbrandtiefe. Darüber hinaus auch wenn Aluminiumlegierungen einen niedrigeren Schmelzbereich als Stahlwerkstoffe aufweisen, wird in der Praxis beim Schweißen gleicher Blechdicken eine vergleichbare Wärmemenge zugeführt, so dass mit einem hohen Verzug gerechnet werden muss (/Baumann98/).

Während beim Schweißen von naturharten Legierungen eine Entfestigung in der Schweißnaht auftritt, kommt es bei aushärtbaren Legierungen zu einem Lösungsglühen und somit zur Auflösung der Ausscheidungen. Beide Vorgänge in unterschiedlicher Art sind mit einer Veränderung der Zugfestigkeit verbunden, so dass eine Nachbehandlung der Schweißverbindung notwendig ist.

## 2.3 Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen zum Fügen von Aluminiumwerkstoffen

In der industriellen Praxis haben sich zum manuellen Schweißen von Aluminiumwerkstoffen das Wolfram-Inert-Gasschweißen und das MIG-Schweißen etabliert. Diese Verfahren zeichnen sich jedoch durch eine geringe Leistungsdichte aus. Die Auswirkungen der hohen Wärmeleitfähigkeit auf das Schweißverhalten von Aluminiumwerkstoffen sind jedoch durch den Einsatz von Schweißverfahren mit hoher Energiedichte positiv zu beeinflussen. Aus diesem Grund haben sich in den letzten Jahren für Anwendungen in der Serienfertigung, insbesondere im Automobilbau und in der Zuliefererindustrie, Verfahren wie das Laserstrahlschweißen und das Elektronenstrahlschweißen etabliert (/Gomes97/, /Rapp96/, /Dilthey01/).
Für kmU stellen einerseits die hohen Investitionskosten ein Hindernis für den Einsatz des Laserstrahlschweißens dar. Andererseits sind die mit dem WIG erzielbaren Prozessgeschwindigkeiten nicht wettbewerbsfähig und für hochqualitative Anwendungen im Sichtbereich ist die Spritzerneigung des MIG-Schweißens als negativ zu beurteilen.

Die Plasmatechnik bietet eine attraktive Alternative zu den anderen Schweißprozessen, da sie sich durch eine hohe Leistungsdichte auszeichnet. Das Plasma-Lichtbogenschweißen hat sich im Wesentlichen aus dem WIG-Verfahren entwickelt. Während beim WIG-Schweißen der Lichtbogen zwischen einer nichtabschmelzenden Elektrode und dem Werkstück frei brennt, wird der Lichtbogen durch eine optimierte strömungsmechanische Auslegung des Düsensystems und einen Gasstrom zusätzlich eingeschnürt (/Dzelnitzki04/). Abbildung 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Plasmaschweißens.

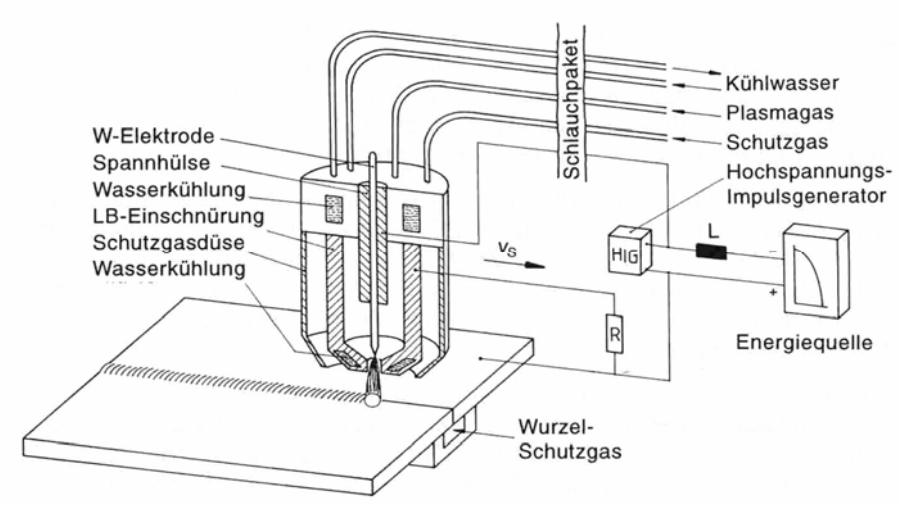



Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau des Plasma-Lichtbogenschweißen (/Dilthey95/).

Die Einschnürung führt zu einer hohen Leistungsdichte auf dem Werkstück (Abbildung 7), während in der Strahlmitte die Temperatur etwa 15.000 bis 20.000 K beträgt.

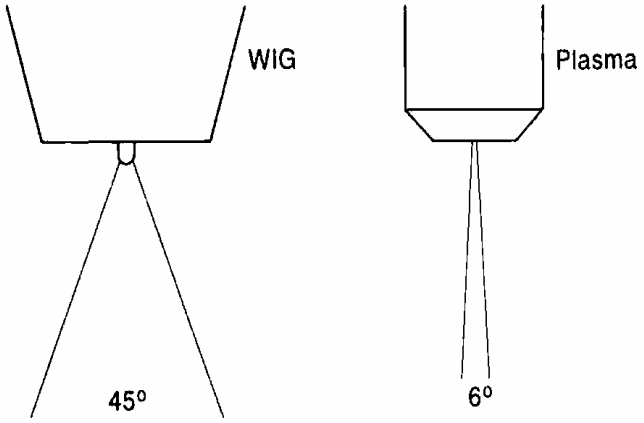



Abbildung 7: Ausbildung der Lichtbogensäule (/Dilthey95/).

Die Ausbreitung des Schmelzbades kann somit begrenzt werden, der Einbrand wird tiefer, so dass das Stichlochschweißen bei Aluminiumlegierungen auch über 4 mm Dicke möglich ist (/Dzelnitzki04/).

Zur Anwendung kommen sowohl das Wechselstrom- als auch das Gleichstromschweißen mit plus- oder minusgepolter Elektrode.

Grundsätzlich ist das Plasmaschweißen mit den Verfahrensvarianten Plasma-Pluspolschweißen, Plasma- Minuspolschweißen und Plasma-Wechselstromschweißen zum Schweißen des Werkstoffs Aluminium geeignet. Alle

diese Verfahren haben das Aufbrechen der den Werkstoff Aluminium umgebenden Oxidschicht zum Ziel.
Das Plasma- Pluspolschweißen ist eine Verfahrensvariante, bei der die Elektrode plusgepolt wird. Das Verfahren zeichnet sich durch eine sehr gute Reinigungswirkung aus und erzeugt eine hohe Nahtqualität. Nach derzeitigem Kenntnistand brechen die während des Prozesses entstehenden Gasionen die hochschmelzende Oxidschicht der Aluminiumlegierung beim Aufprall mechanisch auf. Dabei wird die Oxidschicht beseitigt.
Nachteil dieses Verfahrens ist die hohe thermische Belastung der Elektrode aufgrund der Polarität. Die Bewegungsenergie der in Richtung der Elektrode beschleunigten Elektronen wird in Wärme umgewandelt und bewirkt somit ein starkes Aufheizen. Darüber hinaus werden dickere Elektroden eingesetzt, die eine schnellere Wärmeableitung ermöglichen. Die Lichtbogengestalt und damit auch die Druckwirkung auf das Schmelzbad werden durch die Plasmaströmung von der Anode bestimmt. Für dieses Verfahren charakteristisch ist eine geringe Einbrandtiefe (/Dzelnitzki04/).

Das Plasma- Minuspolschweißen mit negativ gepolter Elektrode und positiv gepoltem Werkstück (DCSP-Direct Current Straight Polarity) ist ein sehr wenig verbreitetes Schweißverfahren. Die kathodische Reinigungswirkung durch die Ionen tritt bei dieser Polarität nicht ein. Das Aufbrechen der Oxidhaut muss hier auf anderem Wege erfolgen. Durch Verwendung von Helium als Schutzgas wird beim Plasma-Minuspolschweißen eine ausreichende Wärmekonzentration erzeugt und die Oxidhaut beseitigt. Nachteilig für den Einsatz von Helium als Schutzgas sind die entstehenden hohen Gaskosten, sowie die Ausbildung eines größeren Schmelzbades in Verbindung mit ausgeprägten Schmelzbadturbulenzen. Eine wichtige Rolle spielt die Zusammensetzung der Oxidschicht. AlSi- Legierungen begünstigen das Plasma- Minuspolschweißen, da der Schmelzpunkt der Oxidschicht mit zunehmendem Si-Gehalt abnimmt. Magnesiumhaltige Aluminiumlegierungen sind schwieriger zu verarbeiten, da durch die Magnesiumaufnahme die Schmelztemperatur der Oxidschicht angehoben wird. Die thermische Zersetzung der Oxidschicht führt bei Minuspolung im Vergleich zum Plasma- Pluspolschweißen nicht zu der erwarteten hohen Qualität der Nahtoberfläche. Die Elektrode wird bei der Minuspolung im Vergleich zur Pluspolung weniger thermisch beansprucht und

dadurch weniger verschlissen. Da die Plasmaströmung in der Lichtbogensäule fast vollständig von der Katode ausgeht, hat der eingeschnürte Plasmastrahl eine hohe Energiedichte. Durch den Plasmagasstrom wird die Druckwirkung des Lichtbogens weiter unterstützt. Es entsteht ein tiefer Einbrand , den die größere Wärmemenge beim Schweißen unter Helium oder Helium mit geringen Argonkomponenten zusätzlich verstärkt. Um die thermische Oxidbeseitigung zu realisieren, wird der Schweißstrom erhöht und der Abstand zwischen Plasmadüse und Werkstück in Abhängigkeit von der Oxidzusammensetzung verkürzt. Der Plasmalichtbogen wird mit einem Pilotlichtbogen, der zwischen der spitzen Elektrode und der Plasmadüse brennt, gezündet (/Dzelnitzki04/).

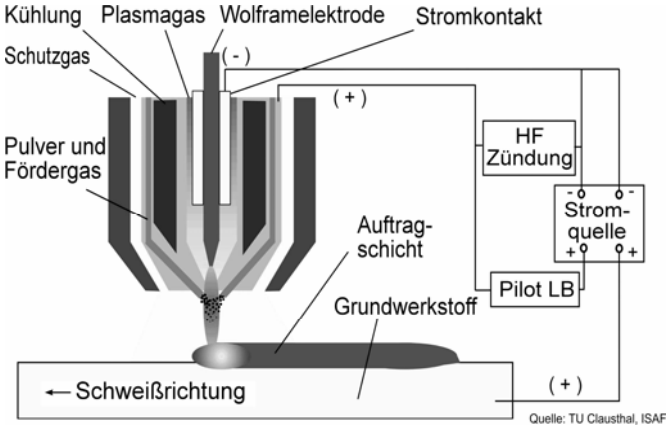
Das Plasma- Wechselstromschweißen verbindet eine ausreichende Reinigungswirkung während der Plusphase mit der sehr hohen Energiedichte in der Minusphase. Die Strombelastbarkeit der Elektrode verbessert sich, da die Minushalbwelle als Abkühlphase betrachtet werden kann. Neben der Feldemission werden auch die erforderlichen hohen Temperaturen zur thermischen Emission erreicht.

Beim Schweißen von Aluminium wirkt sich der große Temperaturunterschied an den wechselnden Kathoden nachteilig aus. Der Austritt von Elektronen aus einem Werkstoffverbund nimmt bei der thermischen Emission mit steigender Temperatur zu. Somit steht der Elektronenemission aus dem relativ kalten Schmelzbad (Schmelztemperatur von Aluminium ca. 660°C) eine erleichterte Emission an der hocherhitzten Wolframelektrode (Schmelzpunkt etwa 3350°C) gegenüber. Befindet sich der Minuspol an der Elektrode fließt mehr Strom als wenn der Grundwerkstoff negativ gepolt ist. In der Plusphase vergrößert sich der Widerstand des Lichtbogens wegen der geringeren Anzahl von Ladungsträgern. Ähnlich wirkt sich auch eine Verlängerung des Lichtbogens aus, die zu einem Anstieg der Schweißspannung führt. Konventionelle Schweißtransformatoren mit fallenden Kennlinien gleichen den Anstieg der Spannung durch einen Abfall der Stromstärke aus, d.h. der Einfluss von Brennerabstandsänderungen wird somit gering gehalten.

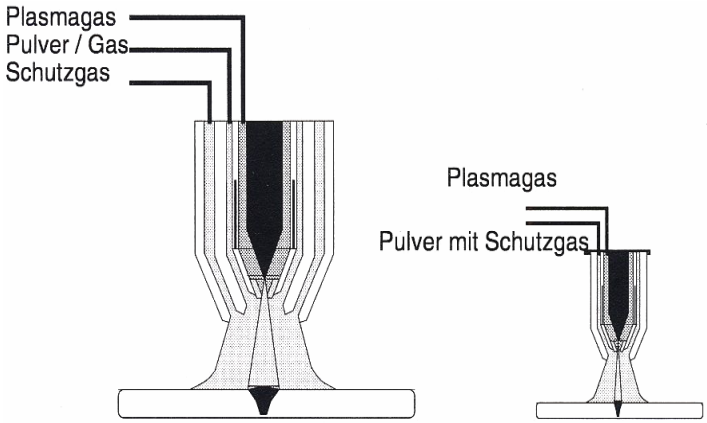
Nachteilig wirkt sich auch der typische sinusartige Verlauf des Stromes hierbei sowohl auf die Zündeigenschaften als auch die Stabilität des Lichtbogens aus. Die niedrigere Stromstärke in der positiven Halbwelle hat eine negative Gleichstromkomponente im Wechselstrom zur Folge, welche man als

Gleichrichterwirkung bezeichnet. Diese verschlechtert die Reinigungswirkung und führt zu einer stärkeren Erwärmung der Stromquelle. Der negative Gleichstromanteil wird deshalb häufig mit einem sogenannten Filterkondensator beseitigt. In moderneren Schweißanlagen bleibt aufgrund einer Konstantstromcharakteristik der Schweißstrom in beiden Halbwellen unverändert. Wegen der geringeren Anzahl an Ladungsträgern ist jedoch die Lichtbogenspannung in der positiven Halbwelle höher. Die Bogenspannung bei minusgepolter Elektrode kann je nach Einstellung nur etwa halb so groß sein wie bei Pluspolung. Ein wichtiger Einstellparameter ist die Balance. Sie beschreibt das Verhältnis der Zeitdauer der Plushalbwelle zur Minushalbwelle bezogen auf die Elektrode. Als sinnvoll für das Plasma-Wechselstromschweißen haben sich Werte von etwa 30/70-50/50 (Balance Plus-/Minushalbwelle [%]) erwiesen.

Das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen stellt eine Kombination zweier Plasmaverfahren, dem Plasma-Verbindungsschweißen und dem Plasma-Auftragschweißen dar. Bei beiden Verfahren brennt der Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück und ermöglichen somit eine Entkopplung der Zugabe des Zusatzwerkstoffes von der Stromstärke. Beim konventionellen Plasma-Verbindungsschweißen wird der Zusatzwerkstoff in Form von Draht extern zugeführt. Daraus ergeben sich die für externe Drahtzuführung bekannten Nachteile wie beispielsweise Schlupf des Drahtes, eingeschränkte Zugänglichkeit, Orientierungsabhängigkeit, insbesondere bei engen und kleinräumigen Bauteilkonturen.
Beim Plasma-Pulver-Auftragschweißen wird dagegen Pulver als Zusatzwerkstoff eingesetzt, das über einen Trägergasstrom transportiert wird. Der Zusatzwerkstoff kann in Abhängigkeit der Auslegung des Brenners und der Düse in den Pilot-Lichtbogen oder in den übertragenen Lichtbogen zugeführt werden (Abbildung 8). Einen exemplarischen Vergleich der Brennerauslegung stellt Abbildung 8 b dar.




a)




Auftragsschweißen Verbindungsschweißen

b)

Abbildung 8: Prinzipieller Funktionsweise des Plasma-Pulver-Auftragschweißen (a) und Vergleich der Brennerauslegung (b, /Dilthey95/)

In Abbildung 8 b sind für das Plasma-Pulver-Auftragschweißen drei koaxial angeordnete Kanäle zu erkennen. Beim Plasma-Pulver-Auftragschweißen brennt der nichtübertragene Lichtbogen (Pilotlichtbogen) zwischen Wolframelektrode und der wassergekühlten Kupferdüse. Ein zweiter Lichtbogen, der übertragene Lichtbogen (Hauptlichtbogen) brennt zwischen Wolframelektrode und dem Werkstück. Im Pilotlichtbogen erfolgt das Vorwärmen des pulverförmigen Zusatzwerkstoffes, im Hauptlichtbogen wird der Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen und trifft im schmelzflüssigen Zustand auf die Substratoberfläche. Durch das getrennte Regeln der beiden Lichtbögen ist eine effiziente und sichere Prozessführung möglich.

Die wassergekühlte Kupferdüse schnürt den Lichtbogen zusätzlich ein und erhöht somit die Leistungsdichte des Lichtbogens, wodurch hohe Auftragsleistungen von bis zu 20 kg/h ermöglicht werden.

Der für das Verbindungsschweißen mit Draht geeignete Brenner ist ebenso in Abbildung 8 b dargestellt. Erkennbarer Unterschied hierbei sind nur zwei konzentrische Gasströme. Zum einen das Plasmagas und zum anderen das Schutzgas, indem zugleich der Zusatzwerkstoff gefördert und von außen unter einem definierten Winkel in den Lichtbogen injiziert wird. Durch den Wegfall des Gasstroms vereinfacht sich die Brennerkonstruktion und lässt ein relativ kleines System entstehen.

Dem Plasma-Pulver-Verbindungsschweißtechnik (PPAW) wird vermehrt Bedeutung als Alternative zum WIG-Schweißen beigemessen. Gerade bei langen Nähten, bei denen die Schweißrichtung oft gewechselt wird, entfällt der durch die Zufuhr des Zusatzdrahtes hohe Programmieraufwand. Untersuchungen an X6CrNiMo17-12-2 (1.4571) belegen, dass durch eine aufgabenspezifische Auslegung des Düsensystems eine Zunahme des Pulvernutzungsgrades um 50% erreicht werden kann (/NN/).

In /Chruszez98/ wird über Untersuchungen zu den Prozessgrundlagen des Plasma-Pulver-Verbindungsschweißens berichtet. Der pulverförmige Zusatzwerkstoff wird mit dem Schutzgas an den Bearbeitungsort geführt und über die Düsenform auf die Schweißstelle fokussiert. Als günstiger Korngrößenbereich wird eine Fraktion von 40-130 µm ermittelt. Auf Grund der geringen Ionisationsenergie kommt vorwiegend Argon als Plasmagas zum Einsatz, dem zur Verbesserung der Wärmeleitung Wasserstoff oder Helium zugemischt werden kann. Untersuchungen zur Brennerführung zeigen, dass eine stechende Brennerstellung vorteilhafter ist. Im Vergleich zum WIG Schweißen werden höhere Prozessgeschwindigkeiten erzielt, so dass eine höhere Wirtschaftlichkeit möglich ist.

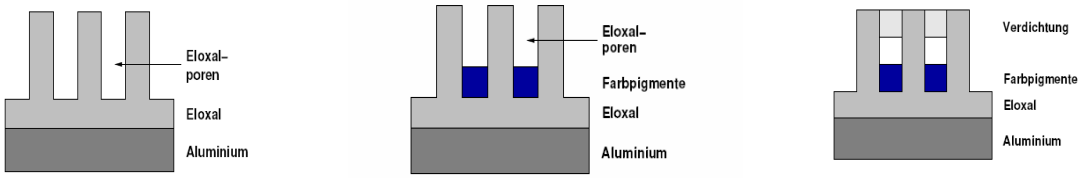
In Untersuchungen zum Fügen von NiCrMo-Stählen sowie ferritischen C-Stählen wird festegehalten, dass durch den kompakten Brenneraufbau mit integrierter richtungsunabhängiger Pulverzufuhr der Prozess beim manuellen Schweißen einfacher zu handhaben und Verbindungen in engen Zwischenräumen sind einfacher durchzuführen sind (/NN98/). Beim mechanisierten Schweißen entstehen insbesondere da Vorteile, wo die Schweißrichtung häufig wechselt, da der höhere Programmieraufwand zur exakten Positionierung des Zusatzdrahtes zum

Schweißkopf entfällt. Ebenso lassen sich auf Grund der kleinen Brennerabmessungen auch schwer zugängliche Stellen prozesssicher schweißen. Für Stahl- und Edelstahlbleche sowie verzinkte Bleche reicht der Blechdickenbereich von 0,8 bis 5 mm. Von besonderer Bedeutung für den industriellen Einsatz ist u.A. die hohe Nahtqualität, die ein Nacharbeiten i.A. nicht erforderlich macht sowie die im Vergleich zum WIG hohe Prozessgeschwindigkeit und die Möglichkeit in Zwangspositionen schweißen zu können. Im Vergleich zu MIG/MAG werden schmalere und glattere Nähte erzielt, wobei weniger Schweißspritzer entstehen und eine höhere Festigkeit erreicht wird.

Das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen von Al-Werkstoffen ist bis jetzt nur geringfügig untersucht worden. Untersuchungen zur Prozessführung sind in /AiF12.751_03/ und /Wesling03/´dargestellt. Im wesentlichen wird hier festgehalten, dass mittels PTA-Gleichstromtechnik keine Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse gegeben ist, da einerseits ein vollständiges Entfernen der Oxidschicht nicht möglich ist und andererseits die Oxidbelegung des Pulverzusatzwerkstoffes das Aufschmelzverhalten maßgeblich beeinflussen.
Eine Alternative bietet das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen mit Wechselstrom, da während der positiven Polung der Elektrode eine optimierte Reiningungswirkung erzielt werden kann. Allerdings ist es erforderlich, dass oxidarme Pulverzusatzwerkstoffe mit einer Kornfraktion 90-150 µm eingesetzt werden. Gute Ergebnisse konnten hier an Kehlnähten am Überlappstoß bei Werkstückdicken ab 3 mm mit einer Schweißgeschwindigkeit zwischen 20-80 cm/min in den Positionen PA, PF und PC erzielt werden. AlMg4,5Mn Blechwerkstoffe (Dicke 3 mm) konnten in Stumpfanordnung mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 cm/min gefügt werden.
Gleichermaßen wird jedoch festgehalten, dass das Verbindungsschweißen von dünnen Blechen (< 2mm) problematisch ist, da eine Mindestleistung zum Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes notwendig ist, diese aber für den Grundwerkstoff bereit zu hoch ist. Die Reiningungswirkung ist in diesem Fall auf der Blechoberfläche sichtbar, aber nicht im Pulverwerkstoff.
Die Untersuchungen erfolgten ausschließlich an nicht aushärtbaren Legierungen. Als Pulverwerkstoffe kamen AlSi-Legierungen, die eine gute Verarbeitbarkeit aufweisen, und AlMg5 zum Einsatz (/AiF12.751_03/, /Wesling03/).

### 2.3.1 Anodisieren von Aluminiumwerkstoffen

Auch wenn die Schweißverbindung eine hohe optische Güte aufweist und frei von zur Oberfläche offenen Poren ist, ist es, in der aluminiumverarbeitenden Industrie üblich, das Bauteil aus Korrosionsschutzgründen oder aus optischen Gründen zu eloxieren. Wie bereits in Absatz 2.2 dargestellt überziehen sich Aluminiumwerkstoffe an Luft durch die Reaktion mit Sauerstoff bzw. Wasserdampf mit einer dünnen, aber dichten natürlichen Oxidschicht. Diese erreicht bei Raumtemperatur in wenigen Minuten eine Dicke in der Größenordnung von einigen Tausendstel Mikrometer. Die natürliche Oxidschicht gewährt noch nicht in allen Fällen ausreichenden Schutz gegenüber Korrosionsbeanspruchungen, so dass eine Verstärkung der natürlichen Oxidschicht, wie z.B. durch Eloxieren, vorgenommen werden muss. Eloxieren oder auch Anodisieren nennt man das elektrolytische Oxidieren von Aluminium und seinen Legierungen. Dabei wird die Oberfläche in einem ersten Schritt in einem elektrochemischen Prozess umgewandelt und bis zu einem gewissen Dicken porös. Nach dem Eloxiervorgang werden diese Poren durch sogenanntes Verdichten geschlossen und die chemische Zwischenverbindung in ihre Endform Ausgeführt. Taucht man das Bauteil vor dem Verdichten in ein entsprechendes Farbbad, so lagern sich Farbpigmente in den Poren ein und können dann mitversiegelt werden.




a) elektrolytisch erzeugte Schicht b) Einlagern von Pigmenten c) Versiegeln

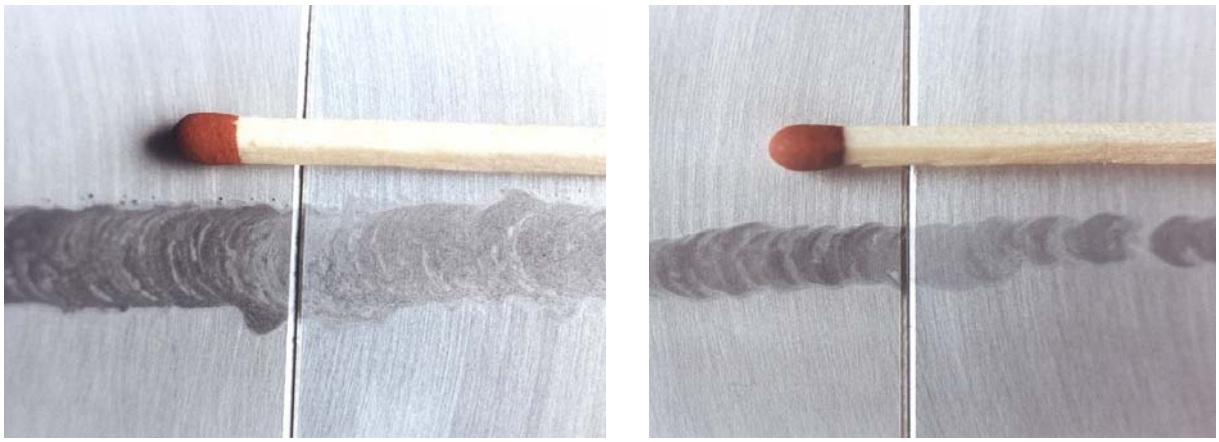
Abbildung 9: Aufbau der Eloxalschicht (/Drube05/).

Auf Grund der unterschiedlichen elektro-chemischen Potentiale der Legierungeselemente in dem Grundwerkstoff und Schweißnaht entsteht in der Eloxalschicht eine stark unterschiedliche Färbung. Die Wirkung der einzelnen Legierungselemente auf die Farbtönung der Schicht ist in Abhängigkeit von der Schichtdicke in Tabelle 2 zusammengefasst.

| Legierungselement | Farbtönung Schichtdicke < 10 µm | Farbtönung Schichtdicke > 10 µm |
|---|---|---|
| Silizium | grau | grau -> schwarz |
| Magnesium | natur | natur -> stahlgrau |
| Magnesiumsilizid | hellgrau | grau -> schmutziggrau |
| Kupfer | grau | grau -> dunkelgrau |
| Mangan | hellgrau | grau -> graubraun |
| Zink | natur | natur -> blaustichig |
| Chrom | gelbstichig | gelblich -> gelbbraun |
| Eisen | natur | natur -> grau |

Tabelle 2: Einfluss von Legierungselementen auf die Farbtönung beim Eloxieren

Das Ergebnis einer Eloxalbehandlung mit AlSi 12 geschweißter AlMg3 Bleche ist in Abb. 3 dargestellt. Der farbliche Unterschied zwischen Blechwerkstoff und Schweißnaht ist deutlich zu erkennen und dokumentiert die Problematik der Farbechtheit derartiger Verbindungen.



a) Deckseite b) Wurzelseite

Abbildung 10: Aussehen der Schweißverbindung nach dem Eloxieren

Aus der Literaturauswertung und den eigenen Vorversuchen ergibt sich die wissenschaftliche Problemstellung des Forschungsvorhabens. Einerseits belegen die genannten Literaturstellen das hohe Potenzial des PPAW insbesondere für den Einsatz in kmU. Der Literatur sind keine grundlegenden Untersuchungen zum PPAW von dünnen Al-Blechen zu entnehmen. Bisher erfolgten vereinzelte Untersuchungen,

die die prinzipielle Machbarkeit bestätigen, sich aber nicht auf industriell interessante AlMgSi bzw. AlMg Legierungen beziehen. Entscheidend für die Anwendung in der industriellen Fertigung ist aber die Lösung der Problematik der Farbechtheit bei einem nachfolgenden Eloxierprozess. Zur Lösung dieser Thematik sind der Literatur für das PPAW keine Untersuchungen zu entnehmen.

# 3 Zielsetzung

Leichtbaukonstruktionen und somit auch der Werkstoff Aluminium finden zunehmend Interesse für eine Vielzahl von Anwendungen. Das Fügen dieses Werkstoffes stellt besondere Anforderungen an die Schweißtechnologie. Auf Grund der thermophysikalischen Eigenschaften, insbesondere der hohen Wärmeleitfähigkeit und der hohen Schmelztemperatur der Aluminiumoxidschicht sind Verfahren, die eine hohe Leistungsdichte ermöglichen vorzuziehen. Für den Einsatz in der Massenfertigung hat sich das Laserstrahlschweißen in vielen Bereichen etabliert, wobei die Investitionskosten sehr hoch sind. Für den Einsatz in kmU, die eine hohe Flexibilität in der Fertigung aufweisen müssen, sind Strategien zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit unumgänglich.

Unter den sogenannten Hochleistungsverfahren stellt das Plasmaschweißen eine attraktive Alternative zum beispielsweise Laserstrahl- und Elektronenstrahlschweißen dar. Bereits erfolgte Untersuchungen belegen, dass das Schweißen von Aluminium mittels Plasmatechnik im Stichlochverfahren bis zu 5 mm möglich ist. Die Anwendung von drahtförmigen Zusatzwerkstoffen bringt jedoch den Nachteil der begrenzten Zugänglichkeit und der Oreintierungsabhängigkeit mit sich. Beim Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen erfolgt die Zufuhr des Zusatzwerkstoffes durch ein Düsensystem direkt in den Lichtbogen, so dass die Orientierungsabhängigkeit auch bei konturierten Bauteilen gegeben ist.

Das Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit pulverförmigen Zusatzwerkstoffen durch Plasmatechnik belegt die grundsätzliche Eignung, auch wenn im Dünnblechbereich Schwierigkeiten auftreten.

Vielmehr ist jedoch für das vorliegende Projekt die Nachbearbeitung der Schweißverbindungen von Interesse. Derzeit werden meist AlSi-Legierungen zum Fügen eingesetzt. Bei einer anschließenden Eloxalbehandlung zur Verbesserung des Korrosionsverhaltens sowie des Aussehens erscheint die Schweißnaht mit einer deutlich dunkleren Verfärbung, so dass bereits bei der Konstruktion des Bauteils Schweißstellen im Sichtbereich vermieden werden müssen.

Die unterschiedlichen Verfärbungen sind darin begründet, dass im elektrochemischen Prozess des Eloxierens die Schweißnaht, auf Grund der

unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung, ein völlig anderes Verhalten als der Grundwerkstoff aufweist.

Aus diesen Gründen ist es Ziel des Vorhabens, die metallurgischen Grundlagen zum PPAW von AlMg und AlMgSi Blechen insbesondere unter dem Aspekt der Farbechtheit bei einem nachfolgenden Eloxierprozess zu erarbeiten. Hierzu gilt es, den Einfluss der Legierungszusammensetzung des Zusatzwerkstoffes auf die Verbindungseigenschaften zu untersuchen und die Wahl des Zusatzwerkstoffes im Hinblick auf Festigkeit, Duktilität und Farbechtheit zu optimieren.
Im Hinblick auf die Umsetzung des PPAW in kmU wird mit dem Projekt das Ziel verfolgt, basierend auf den metallurgischen Untersuchungen Empfehlungen zur Zusatzwerkstoffauswahl und der Prozessführung zu erarbeiten.

Dazu gehören folgende Arbeitsschritte

- Vertieftes Prozessverständnis zum PPAW dünner Al-Bleche insbesondere unter der Berücksichtigung des Einflusses der unterschiedlichen Pulverwerkstoffe (prozesstechnischen Grundlagen)

- Bewertung des Zustandes nach dem Schweißen und nach dem anschließenden Eloxieren (Farbechtheit)

- Empfehlung zur Auswahl des Zusatzwerkstoffes und zur Prozessführung (Übertragung der Erkenntnisse).

# 4 Experimentelle Vorgehensweise

## 4.1 Werkstoffauswahl

Als Grundwerkstoffe kamen für die dargestellten Untersuchungen Blechwerkstoffe unterschiedlicher Dicke der Legierungsgruppen AA5xxx (naturhart) und AA6xxx (aushärtbar) zum Einsatz. Die chemische Zusammensetzung sowie der Dickenbereich der Blechwerkstoffe sind in Tabelle 3 zusammengefasst

| Werkstoff | Zustand | Blechdicke |
|---|---|---|
| AlMg3 | | 1,5 – 2 mm |
| AlMgSi1 | T4 | 1,5 – 2 mm |
| AlMgSi0,5 | T4 | 2 mm |
| AlMg0,4Si1,2 | T4 | 1,3 mm |

Tabelle 3: Zusammenfassung der Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe

Die Auswahl der Werkstoffe erfolgt unter Berücksichtigung der Anwendungen. Die Legierung AlMg3 besitzt eine hervorragende Umformbarkeit und findet zunehmend Einsatz in vielen Bereichen des Maschinenbaus, wie beispielsweise in der Möbelindustrie und im Apparatebau. Der Werkstoff AlMgSi1 wird als aushärtbare Aluminiumlegierung hauptsächlich im Bauwesen und der Elektrotechnik verwendet. AlMg0,4Si1,2 ist wie AlMgSi1 ebenfalls eine aushärtbare Aluminiumlegierung, die in der Fahrzeugtechnik eingesetzt wird.

| Pulvertyp | Korngröße |
|---|---|
| AlSi12 | -300 + 100 µm |
| Al99,5 | -400 + 63 µm |
| AlMg3 | 45 – 125 µm |
| AlMg5 | -125 + 45 µm |
| AlMg5 | -400 – 200 µm |
| AlMgSi0,5 | 45 – 125 µm |

Tabelle 4: Eingesetzte Pulverwerkstoffe für das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen.

Referenzuntersuchungen erfolgten mit dem Zusatzwerkstoff AlSi12. Für die weiteren Untersuchungen kamen grundwerkstoffähnliche Pulverwerkstoffe wie AlMg3, AlMg5 und AlMgSi0,5 zum Einsatz. Eine zusammenfassende Darstellung der Pulver und der Korngröße ist in Tabelle 4 dargestellt.

Die Auswahl erfolgte auch unter Berücksichtigung der pulvergrößenspezifischen Eignung für das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen.

## 4.2 Schweißanlage und Handhabungssystem

In der vorliegenden Arbeit wurden alle Schweißungen mittels einer Plasmastromquelle der Fa. Castolin „EUTRONIC GAP 3000 AC/DC“. Die wesentlichen Eigenschaften der Stromquelle sind in Tabelle 5 zusammengefasst.
Die Untersuchungen erfolgten im Wechselstrombetrieb. In exemplarischen Untersuchungen wurde darüber hinaus das Pluspolschweißen bewertet, wobei es für Aluminiumwerkstoffe nicht zielführend erschien.

a)

b)

Abbildung 11: a) Stromquelle GAP3000 AC/DC und b) Pulverförderer.

Als Brennersystem kam der Brenner GAP 52 der Fa. Castolin zum Einsatz. Dieser Brenner kann im Leistungsbereich von 5 bis 200 A betrieben werden und ist für den Wechselstrombetrieb geeignet. Die Pulverzuführung erfolgt über zwei Bohrungen um den Plasmastrahl.

| | |
|---|---|
| Stromstärke ÜLB | 5 bis 200A |
| Stromstärke NÜLB | k. A. |
| Pulverzuführung | Äußere Zuführung über zwei Löcher |
| Pulverdurchsatz | 3 bis 18 g/min |
| Kühlmedium | Wasser |
| Wolframelektrode | 4 mm |

Tabelle 5: Wesentliche technische Daten der eingesetzten Stromquelle.

Der Zusatzwerkstoff wird über einen Pulverförderer der Fa. Castolin „EP2“ zugeführt. Die Menge des zugeführten Pulvers und die Menge des Trägergases werden von der Schweißstromquelle geregelt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden im Eigenbau einige Veränderungen am Pulverförderer vorgenommen, um eine konstante Pulverzufuhr auch bei niedrigen Motorgeschwindigkeiten zu ermöglichen. Als Träger- sowie Schutzgas ist Argon 99,996 % verwendet worden. Exemplarisch sind Untersuchungen mit Argon/Stickstoff Mischungen durchgeführt worden, die jedoch zu keinem erheblichen Unterschied geführt haben.

Für die Schweißversuche kam ein 6-Achsen-Industrieroboter der Fa. FANUC zum Einsatz. Der weitere Aufbau setzte sich aus den bereits dargestellten Einzelkomponenten zusammen und ist in Abbildung 12 dargestellt. In weiteren Untersuchungen wurde der Pulverförderer unmittelbar in der Nähe der Schweißstelle positioniert.
Zur Herstellung der Schweißproben sind Spannmittel in unterschiedlichen, an die Schweißgeometrie angepassten Varianten genutzt worden. In Abbildung 13 werden diese für die Fügegeometrien Stumpfnaht und Ecknaht beispielhaft dargestellt.

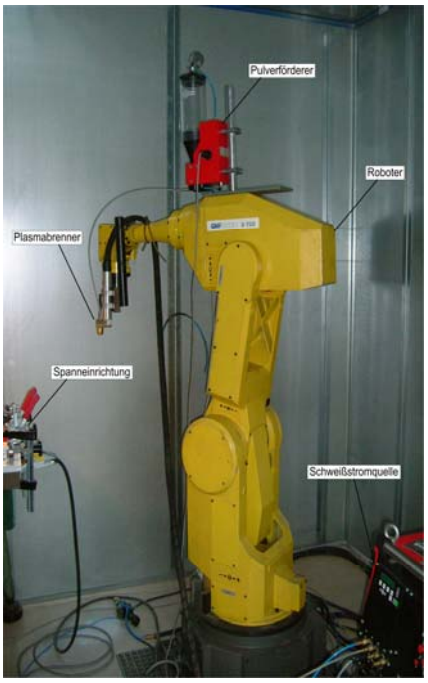
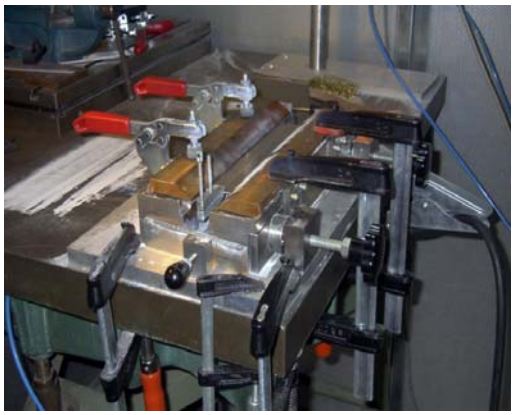
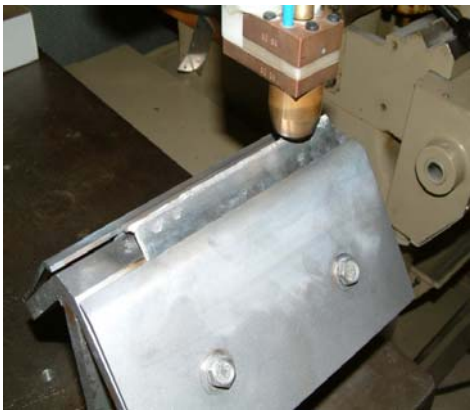



Abbildung 12: Robotersystem und Ankopplung Plasma-Roboter.





a) b)

Abbildung 13: Darstellung ausgewählter Spannmittel für das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen.

Einen Überblick über die möglichen Einstellparameter liefert Tabelle 6. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zuerst mit Hilfe der statistichen Versuchsplanung richtungsweisende Erkenntnisse über den Einfluss herausragender Parameter gewonnen.

Die Untersuchungen erfolgten am Stumpfstoß sowie an Ecknähten. Die Blechabmessungen variierten dabei zwischen 50x100 mm bis hinzu 300x150 mm.

| Pilotparameter | Hauptstromparameter | Pulverparameter |
|---|---|---|
| Gasvorströmzeit<br>Gasnachströmzeit<br>Zündgasmenge<br>Plasmagasmenge<br>Pilotzündstrom<br>Sollwert Pilotstrom | Hauptstrom<br>Impuls Pilotstrom<br>Schutzgasmenge<br>Anfangsstrom<br>Zeit Anfangstrom<br>Slope | Gasvorströmzeit<br>Gasnachströmzeit<br>Trägergasmenge<br>Motorgeschwindigkeit<br>Balance |

Tabelle 6: Übersicht über die Einstellmöglichkeiten mit der eingesetzten Anlagentechnik.

## 4.3 Methoden zur Bewertung der Eigenschaften der Verbindung

### 4.3.1 Makroskopische Beurteilung, Metallographie und Härteprüfung

Die makroskopische Beurteilung der Schweißergebnisse erfolgte nach folgendem Schema:

- Oberflächenbeurteilung (Riss-, Oberflächenporenfreiheit sowie Nahtschuppung) mit Hilfe eines Stereomikroskops,
- Durchschweißung durch Beurteilung der Anbindung im Wurzelbereich,
- Breite der Reinigungszone.

Bei der Beurteilung wurden die Merkmale der /DIN EN 30042/ berücksichtigt.

Zur Gefügebeurteilung sowie zur Feststellung von Bindefehlern und der Porenhäufigkeit in der Schweißnaht dienten metallographische Untersuchungen. Ausgewählten Proben wurden mittels einer Drahterodiermaschine Robofil 240 zugeschnitten. Anschließend erfolgte das Einbetten in Multifast Black und Polyfast mit Hilfe der Einbettpresse der Firma Buehler Simplimet 1000 bei 180°C und 240 bar 6 Minuten. In verschiedenen Schleif- und Poliervorgängen, mit P80, P320, P800, P1200, P2000 Schleifpapier sowie 3µm und 0,01µm Poliersuspension wurden die Einbettproben weiter aufbereitet. Als Ätzmittel wurde eine 10%ige Natronlauge verwendet. Das nun sichtbar gewordene Gefüge konnten mit einem Auflichtmikroskop der Firma Carl Zeiss untersucht, betrachtet und über eine Digitalkamera, die mit dem PC verbunden ist, als Bild abgespeichert werden.

Die Härtemessungen erfolgten an ausgewählten Schweißverbindungen mittels dem Kleinlasthärteprüfverfahren nach Vickers (HV0,3) unter Verwendung des Härtemessgeräts HMF2000 der Firma Shimadzu. Die Prüfpunkte der einzelnen Härteeindrücke wurden über einen Querschnitt von 16 mm aufgebracht. Im Grundwerkstoff erfolgten die Härteeindrücke in Abständen von 2 mm, in der WEZ und der Schweißnaht in 1 bzw. 0,5 mm Abständen.

### 4.3.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersive Röntgenanalytik (EDX)

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde vorrangig zur Analyse der räumlichen Verteilung der Ausscheidungen und zur Betrachtung der Schweißnahtdecklage und des Wurzeldurchhangs eingesetzt. Der nutzbare Vergrößerungsbereich reicht mit dem REM von etwa 5x bis zu etwa 100000x. Das dadurch erreichbare Auflösungsvermögen ist im Vergleich zum Lichtmikroskop um etwa den Faktor 100 besser. Ein besonderer Vorteil des REM liegt in seiner hohen Tiefenschärfe, wodurch trotz auftretender Unebenheiten am Beispiel der Schuppung der Nahtoberfläche scharfe Bilder aufgezeichnet werden können.

Die chemische Zusammensetzung ausgewählter Schweißverbindungen erfolgte in Kombination mit dem REM mittels einer Analyse der Elementenzusammensetzung unter Verwendung des Verfahrens der Energiedispersiven Röntgenanalytik (EDX) im oberflächennahen Bereich der Schweißverbindungen. Die Informationstiefe des Verfahrens liegt im μm-Bereich. Die zu untersuchenden Proben emittieren durch die Bestrahlung mit energiereichen Primärelektronen charakteristische Röntgenstrahlung. Die Auswertung der im Röntgenspektrum enthaltenen Spektrallinien erlaubt es, die einzelnen Elemente der untersuchten Schweißnahtprobe zu identifizieren und über die Intensität auch zu quantifizieren. Hierzu wird die Röntgenstrahlung hinsichtlich ihrer Energie analysiert und die jeweilige Intensität der Spektrallinien gemessen.

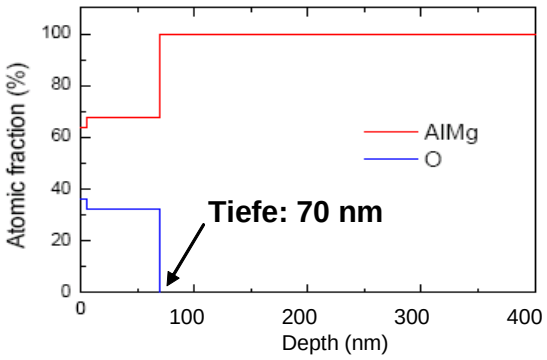
### 4.3.3 Rutherford-Back-Scattering (RBS)

Unter Fachleuten herrscht zur Zeit keine Einigkeit über den Einfluss der Oxidbelegung des Pulverwerkstoffes. Richtlinien zur Lagerungen gibt es ebenso in

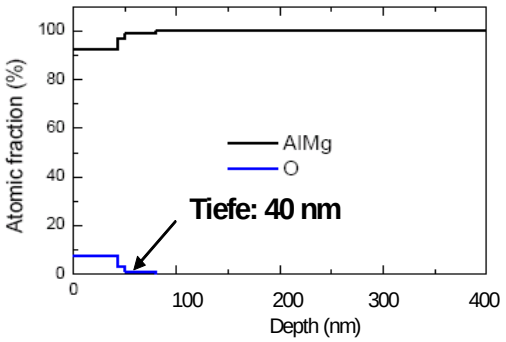
diesem Sinne nicht. Lieferanten empfehlen heutzutage in der Regel eine Lagerzeit von maximal einem Jahr unter trockenen Bedingungen.

Mittels RBS-Verfahren wurden am zweiten Physikalischen Institut der Universität Göttingen unter der Leitung von Herrn PD Dr. Peter Schaaf ausgewählte Pulverzusatzwerkstoffe und Schweißnahtoberflächen auf ihren Oxidanteil untersucht. Mit einem Beschleuniger der Firma IONAS wurden hochenergetische $\alpha$-Teilchen (900 keV) senkrecht auf die untersuchten Proben geschossen und unter einem Rückstreuwinkel von 165° detektiert. Das Elementenprofil der untersuchten Proben konnte so aus der Massen- und Tiefensensitivität bestimmt werden. Nachteilig wirkt sich dieses Analyseverfahren für Werkstoffzusammensetzungen aus, die sich aus Elementen eng benachbarter Massen am Beispiel von C, N und O sowie Al, Si und Mg zusammensetzen, da diese kaum voneinander getrennt werden können. Allerdings ist die Summe dieser Elemente signifikant und wird daher in den jeweiligen Auswertungsreihen für die Zusammensetzung der Aluminiumlegierungen angegeben. Die Tiefenskala wird als Flächendichte angegeben und kann durch die Division mit dem Zahlenwert 10 in eine Eindringtiefe an der Probenfläche in nm umgerechnet werden.

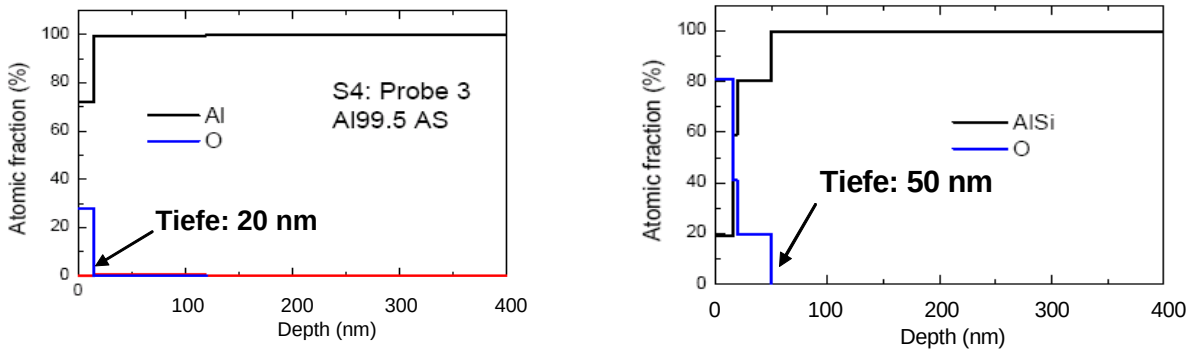
Untersuchungen erfolgten an vier Pulverchargen unter unterschiedlichen Zeitabständen und zeigen, dass keine signifikanten Änderungen auftreten. Grundsätzlich sind jedoch in Abhängigkeit der Pulvergröße Unterschiede sowohl in der Oxidation als auch im Sauerstoffgehalt zu erkennen.




AlMg5, -125+45 µm




AlMg5, -400+200 µm




Al99,5 AS, -400+63 µm AlSi12, -300+100 µm

Abbildung 14: Elementenprofil in ausgewählten Pulverwerkstoffen.

### 4.3.4 Quasistatische mechanische Eigenschaften

Für die Ermittlung der Tragfähigkeit sowie der Verformabarkeit der Verbindung kam eine Universalprüfmaschine Zwick 1455 zum Einsatz. Die Untersuchungen an Stumpfverbindungen wurden nach /DIN EN 895/ durchgeführt.

## 4.4 Probennachbehandlung (Eloxalprozess)

Nach dem Schweißvorgang erfolgte zur Bewertung der Farbechtheit das Eloxieren ausgewählter Verbindungen. Die Vorgehensweise beim Eloxieren kann wie folgt schematisch zusammengefasst werden:

- Entfetten, Beseitigung von Schmutz und Ölen auf der Oberfläche
- Beizen, Abtragen der natürlichen Oxidschicht, eine matte Oberfläche wird erzielt
  (20%ige NaOH 1-3 Min., T=60-90 °C)
- Spülen in $H_2O$
- Dekapieren, Beseitigen von Beizrückständen (1:1 verd. $HNO_3$, 5-20 s, Raumtemperatur)
- Eloxal , Erzeugung der anodischen Oxidschicht nach GS-Verfahren
- Spülen in $H_2O$
- Color-Bad, Färben der Eloxalschicht in hellbronze über dunkelbronze bis schwarz
- Spülen in $H_2O$
- Heißverdichtung,Verdichtung und Härtung der Eloxalschicht in $H_2O$ bei ca.

98 °C

Das Eloxieren erfolgte nach dem Gleichstrom-Schwefelsäure-Verfahren. Als Elektrolyt kam Schwefelsäure $H_2SO_4$ (250-280 g/l) und Aluminiumsulfat $Al_2(SO_4)_3$ 18 $H_2O$ (25 g/l) zum Einsatz. Die Temperatur betrug 18-20 °C und es wurde mit einer anodischen Stromdichte von 1,5 A/dm$^2$ und einer Spannung von 13 V gearbeitet. Die Kathode bestand aus Reinaluminium. Das Schichtwachstum betrug 1 µm pro 2,5 sec.

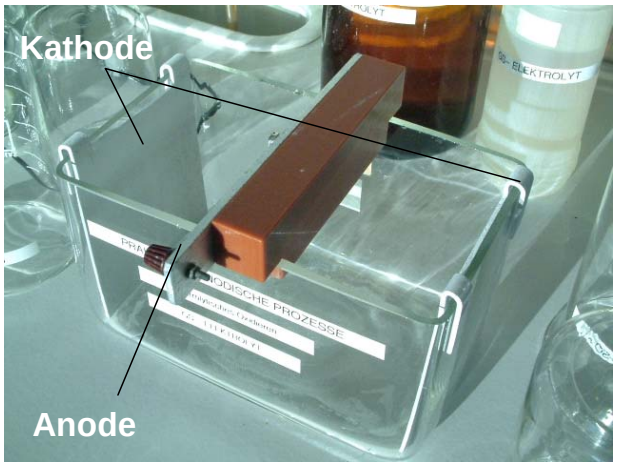



Abbildung 15: Darstellung des Eloxalbades.

# 5 Ergebnisse und Diskussion

Aus den im Stand der Technik gewonnenen Erkenntnissen resultiert, dass zum jetzigen Zeitpunkt das Fügen von Aluminiumblechwerkstoffen mit einer Dicke kleiner 2 mm nicht prozessicher durchgeführt werden kann, da eine Mindeststromstärke erforderlich ist, um den Zusatzwerkstoff aufzuschmelzen, diese aber bereits für den dünnen Grundwerkstoff zu hoch ist. Als Zusatzwerkstoffe werden hierbei Al-Si Legierungen eingesetzt, die eine gute Verarbeitbarkeit aufweisen. Erste Untersuchungen im Rahmen des durchgeführten Vorhabens erfolgten daher an Aluminiumwerkstoffen mit einer Dicke von 2 mm, mit dem Ziel erste Erkenntnisse über die optimale Prozessführung bei dem Einsatz von AlMg- und AlMgSi-Pulverwerkstoffen zu erzielen.

## 5.1 Werkstoff- und prozesstechnische Grundlagen für das Schweißen von Aluminiumblechen der Dicke 2 mm

Die Eingrenzung des optimalen Prozessbereiches zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen von dünnen Blechen erfolgte mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung. Hier wurden die Stromstärke, die Plasmagasmenge sowie die Schweißgeschwindigkeit als wesentliche Einflussgrößen herangezogen (statistischer Versuchplanung $2^3$). Die Bewertung erfolgte unter Berücksichtigung einerseits eines sicheren Prozessverlaufes und andererseits des optischen Erscheinungsbildes der Verbindung, wobei im Wesentlichen durch Betrachtung der Durchschweißung, der Anbindung und des Wurzeldurchhanges eine Einteilung vorgenommen worden ist (vgl. Tabelle 7).

| Bewertung | Bedeutung |
|---|---|
| 4 | Metallisch blanke Oberfläche, geringer Wurzeldurchhang und genügende Durchschweißung |
| 3 | Starker Wurzeldurchhang mit teilweise oxidierter Oberfläche |
| 2 | Ungenügende Durchschweißung |
| 1 | Tiefer Einbrand mit oxidierter Oberfläche oder ungenügender Durchschweißung |

Tabelle 7: Bewertungskriterien für die Nahtgüte

Die wesentlichen Zusammenhänge der Prozessparameter auf die Nahtgüte für AlMgSi1-Blechwerkstoff in Kombination mit den Pulverwerkstoffen AlMgSi0,5 und AlMg3 sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 zusammengefasst.

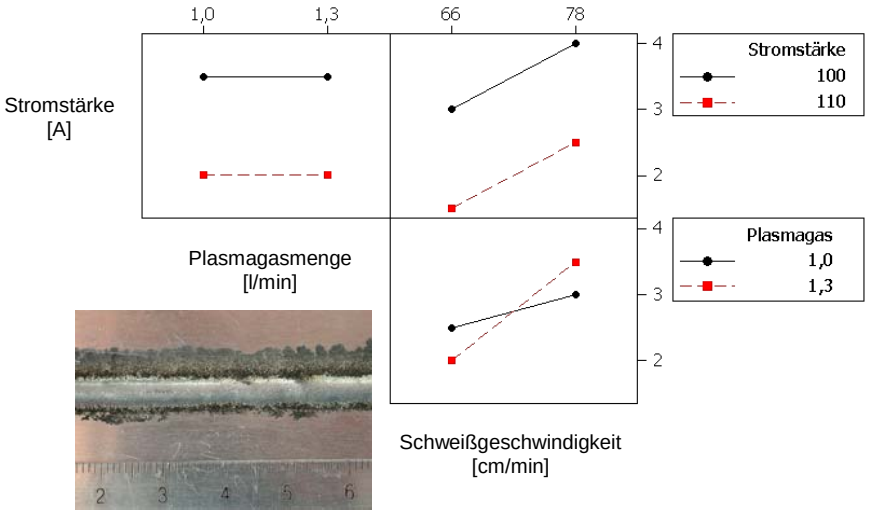



Abbildung 16: Kombinierter Einfluss der Prozessgrößen auf die Nahtgüte für AlMgSi1/AlMgSi0,5.

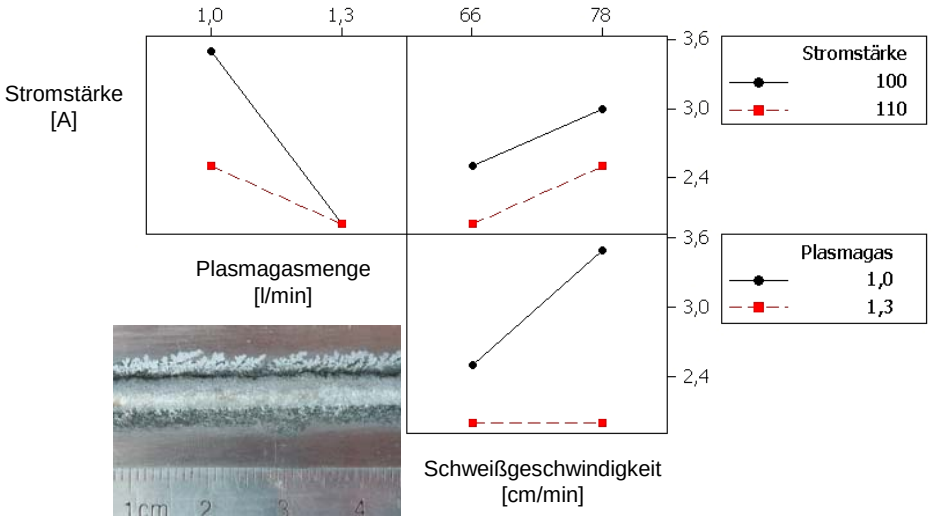



Abbildung 17: Kombinierter Einfluss der Prozessgrößen auf die Nahtgüte für AlMgSi1/AlMg3.

In beiden Fällen führt eine Zunahme der Geschwindigkeit von etwa 0,66 auf 0,8 m/min bei gleich bleibender Stromstärke zu einer Verbesserung der Nahtgüte, wobei für Blechwerkstoffe der Dicke 2 mm eine Stromstärke von 100 A zu empfehlen ist. Eine Erhöhung führt zu einem größeren Schmelzbad und zu einem übermäßigen Wurzeldurchhang (Abbildung 19).

Bei der Auswirkung der Plasmagasmenge ist ein werkstoffspezifisches Verhalten zu verzeichnen. So führt bei artfremden Verbindungen eine Zunahme des Plasmagasdurchflusses zu einem hohen Wärmeeintrag und zu einem starken Wurzeldurchhang (Abbildung 18).

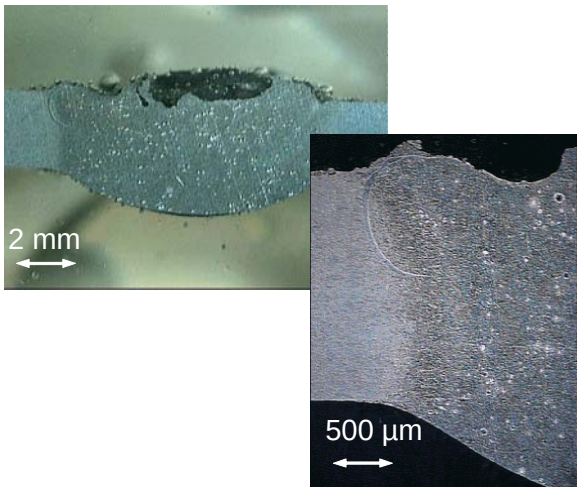



Abbildung 18: Einfluss einer erhöhten Plasmagasmenge auf die Güte der Schweißverbindung.

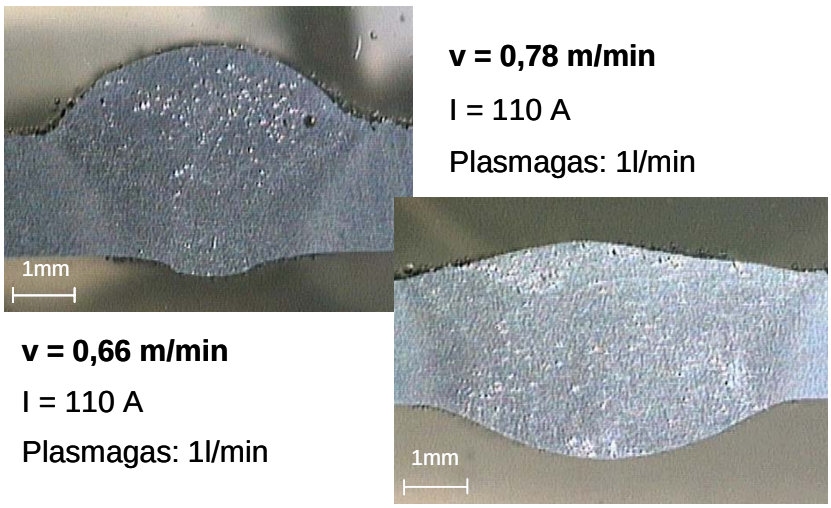
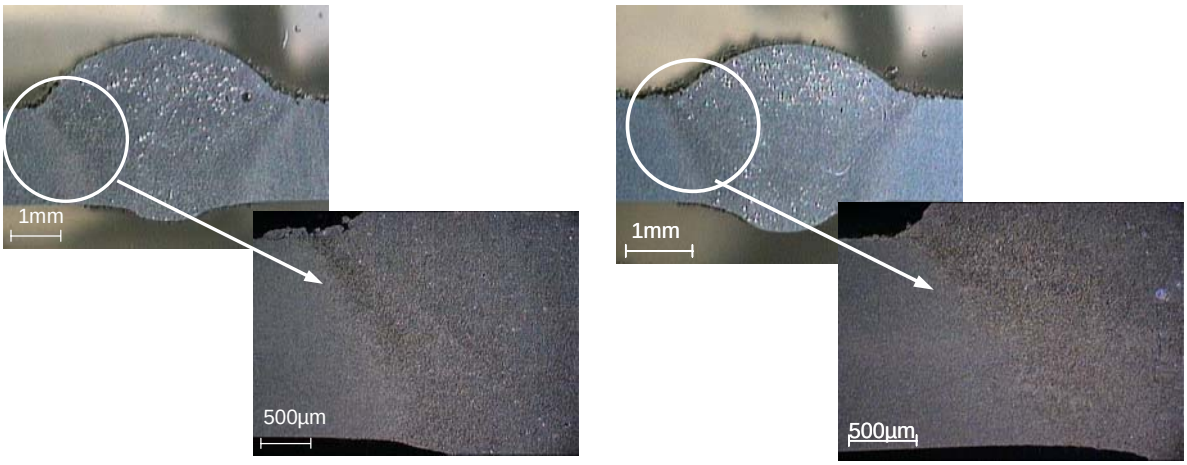



Abbildung 19: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Schweißnahtausbildung für AlMgSi1/AlMgSi0,5

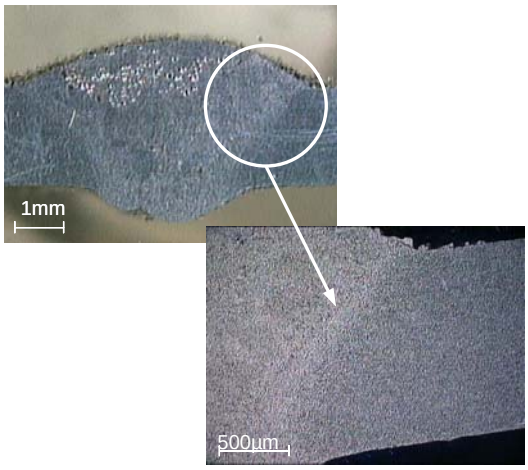
In Abbildung 20 wird der Einfluss des Pulverzusatzwerkstoffes auf die Schweißnahtausbildung beim Schweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi1 bei gleich bleibenden Schweißparametern dargestellt. Die Ausbildung der Schweißnaht ist für beide Kombinationen vergleichbar. Darüber hinaus weisen die Verbindungen eine gute Durchschweißung und eine begrenzte Wärmeeinflusszone von etwa 0,5-1 mm auf.



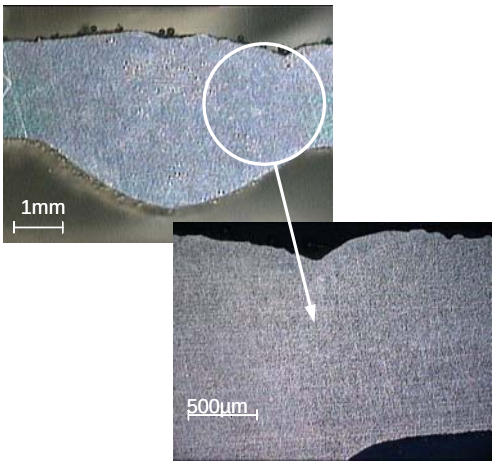

a) AlMgSi1/AlMgSi0,5 b) AlMgSi1/AlMg3

Abbildung 20: I-Naht am Stumpfstoß, Stromstärke 100 A, Plasmagasdurchfluss 1 l/min, Schweißgeschwindigkeit 0,66 m/min

Untersuchungen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen von AlMg3-Blechwerkstoffen belegen ein ähnliches Verhalten. Der Einfluss des Zusatzwerkstoffes auf die Schweißnahtausbildung von AlMg3-Verbindungen ist in Abbildung 21 dargestellt. Hier ist bei gleich bleibenden Schweißbedingungen ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Während eine artgleiche Verbindung von einer starken Porosität gekennzeichnet ist, weist die artfremde Verbindung von AlMg3 mit AlMgSi0,5 nur vereinzelt Poren auf. Dagegen sind jedoch ein starker Wurzeldurchhang und ein großes Schmelzbad zu erkennen, was darauf hin deutet, dass höhere Geschwindigkeiten angestrebt werden können.



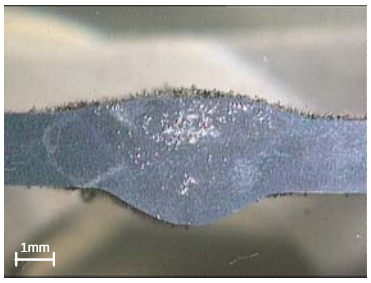

a) AlMg3/AlMg3



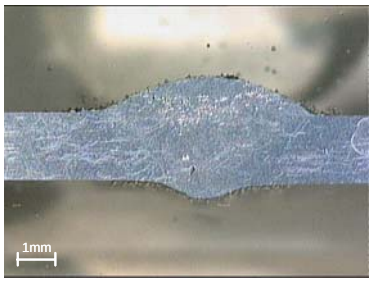

b) AlMg3/AlMgSi0,5

Abbildung 21: I-Naht am Stumpfstoß, Stromstärke 100 A, Plasmagasdurchfluss 1 l/min, Schweißgeschwindigkeit 0,8 m/min

Der Einfluss der Stromstärke auf die artgleiche Verbindung AlMg3 ist in Abbildung 22 dargestellt. Eine Zunahme der Stromstärke um 10% führt zu einer übermäßigen Durchschweißung und Porosität (Abbildung 22).




a) Stromstärke: 110 A




b) Stromstärke: 100 A

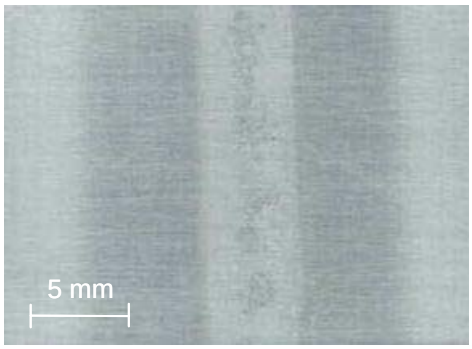
Abbildung 22: Einfluss der Stromstärke beim Fügen von AlMg3

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass das Schweißen von Blechen der Dicke von 2 mm durchaus reproduzierbar möglich ist, wobei bereits geringe Änderungen der Schweißparameter zu einer erheblichen Veränderung des Erscheinungsbildes der Verbindung führen.

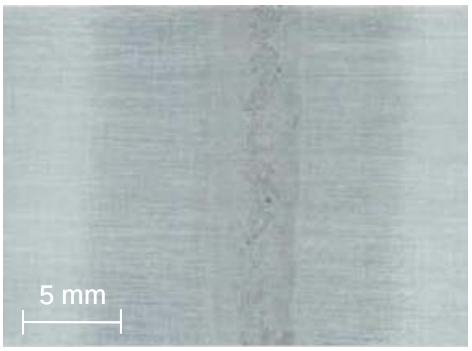
Hinsichtlich Farbechtheit nach dem Eloxieren ist ein werkstoffspezifisches Verhalten zu erkennen. Das Aussehen der geschweißten AlMgSi-Verbindungen nach einer

Eloxalbehandlung ist in Abbildung 23 wiedergegeben. Für die artgleiche Verbindung kann festgehalten werden, dass die Wärmeeinflusszone eine deutlich dunklere Farbe aufweist. Die Schweißnaht selbst dagegen besitzt eine ähnliche Farbe wie der Grundwerkstoff. Die artfremde Verbindung weist in der Wärmeeinflusszone sowie in der Schweißnaht keine Farbgleichheit mit dem Grundwerkstoff. Die Schweißnaht sowie die Schmelzlinie sind an der Oberfläche deutlich sichtbar.

Bei den AlMg3-Verbindungen ist ein unterschiedliches Verhalten festzustellen. Hier ist die Beeinflussung durch den Schweißprozess deutlich geringer. In einem Bereich von etwa 5 mm neben der Schweißnaht kann eine unterschiedliche Farbe im Vergleich zum Grundwerkstoff erkannt werden.

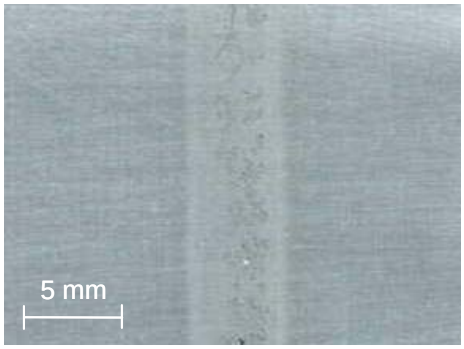



a) AlMgSi1/AlMgSi0,5

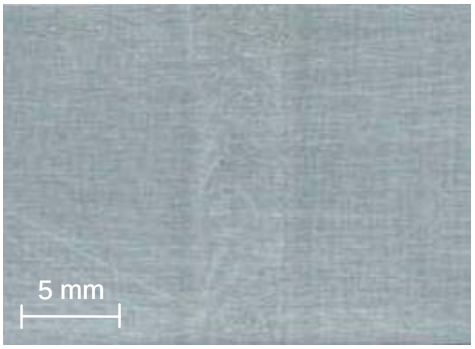



b) AlMgSi1/AlMg3

Abbildung 23: AlMgSi1-Verbindungen nach Eloxalbehandlung (Schichtdicke ca. 10µm)




a) AlMg3/AlMg3




b) AlMg3/AlMgSi0,5

Abbildung 24: AlMg3-Verbindungen nach Eloxalbehandlung (Schichtdicke ca. 10µm)

Artgleiche Verbindungen, d.h. bei Verwendung von mit dem Grundwerkstoff vergleichbarem Pulverzusatzwerkstoff, zeigen eine gute Farbechtheit zwischen

Grundwerkstoff und Schweißgut. Eine Elementverteilung an der Kombination AlMgSi/AlMgSi im Bereich des Überganges Grundwerkstoff/WEZ/Schmelzzone zeigt eine homogene Verteilung der Elemente Al, Mg und O, so dass an dieser Stelle festzuhalten ist, dass eine vergleichbare chemische Zusammensetzung nicht ausreichend für die Farbechtheit ist. Vielmehr spielt der Gefügezustand eine herausragende Rolle, wie auch in weiteren Untersuchungen bestätigt wird.

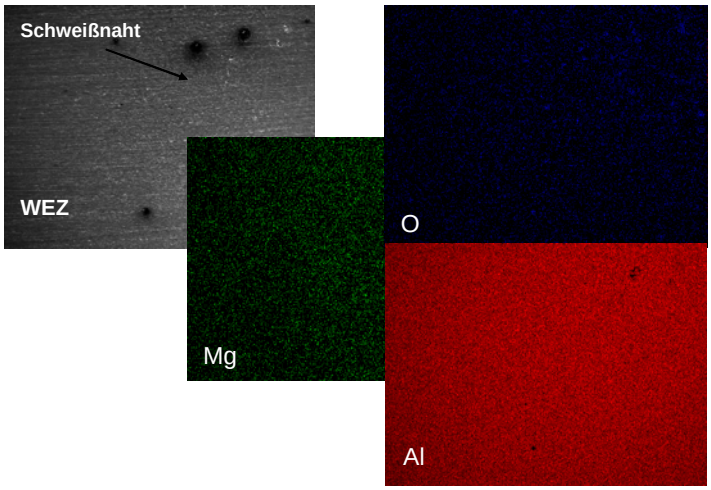



Abbildung 25: Elementenverteilung am Beispiel der Paarung AlMgSi1/AlMgSi0,5.

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten Eckstoßverbindungen geschweißt werden. Auch hier ergab die statistiche Versuchsplanung Bereiche, die vergleichbar mit den Einstellungen der Stumpfverbindung sind. Abbildung 26 stellt den Verbindungsaufbau der Eckverbindungen für die Blechwerkstoff/Pulver-Kombination AlMgSi1/AlMgSi0,5 und AlMg3/AlMg3 dar. Die wesentlichen Schweißparameter sind ebenso zusammengefasst. Es sind im Allgemeinen eine gute Durchschweißung und eine mäßige Porenbildung zu erkennen.

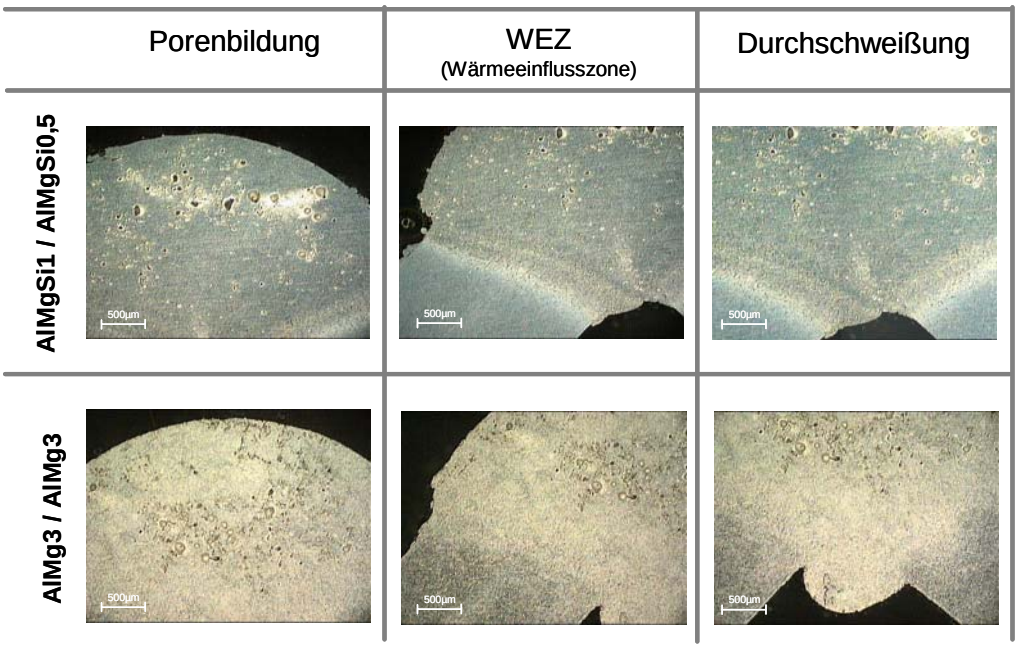



Abbildung 26: Schweißnahtausbildung beim Fügen von 2 mm Dicke Aluminiumblechen mit i=90 A, v=90 cm/min, Plasmagasmenge=1,3 l/min.

Die anschließende Eloxalbehandlung erfolgte nach dem Schleifen der Nahtüberhöhung. Auch in diesem Fall ist lediglich eine leichte Verfärbung in der Schweißnaht sichtbar, wobei die WEZ eine ähnliche Farbe zum Grundwerkstoff aufweist (Abbildung 27).

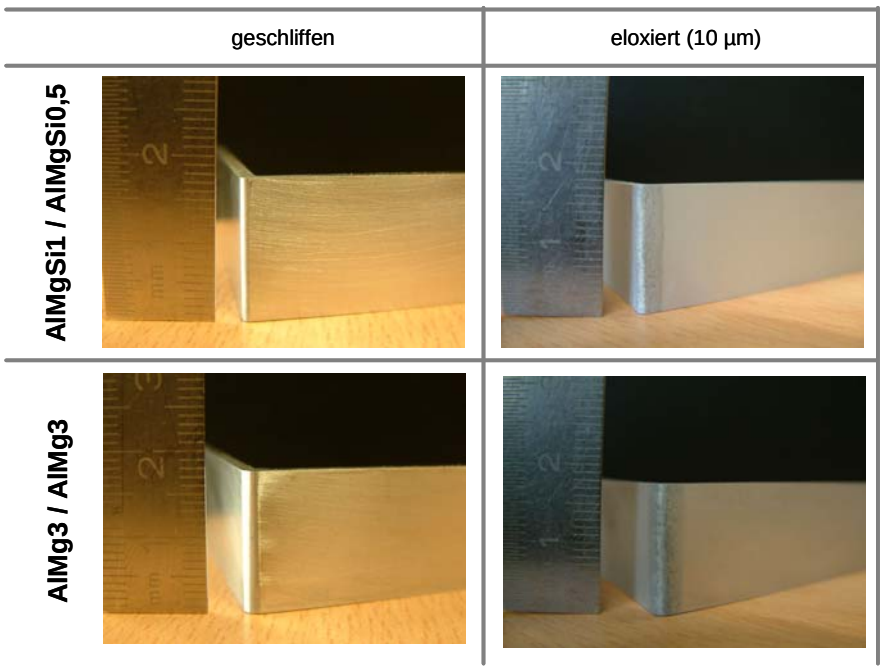



Abbildung 27: Makroaufnahme eloxierter Ecknähte an AlMgSi1 (a) und AlMg3 Blechen (b) (Schichtdicke ca. 10 µm)

### 5.1.1 Zusammenfassung der Untersuchungen an 2 mm Blechen

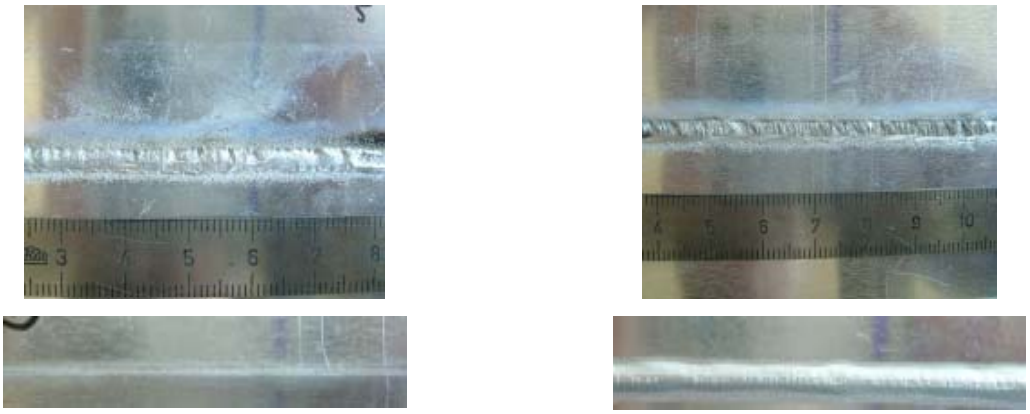
An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen von Aluminiumblechwerkstoffen der Blechstärke 2 mm mit Pulverzusatzwerkstoffen AlMg und AlMgSi mit Schweißgeschwindigkeiten bis zu etwa 1 m/min reproduzierbar möglich sind.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass unter gleichen Schweißbedingungen AlMg3-Werkstoffe einen größeren Wurzeldurchhang als AlMgSi1-Bleche aufweisen. Bei AlMg3 führt das Anwenden von artfremden Zusatzwerkstoffen zu einer Verschlechterung des Erscheinungsbildes der Schweißnaht. Insbesondere ist der Schweißnahtverlauf sehr unregelmäßig und es treten vermehrt Kerben am Nahtübergang auf. Dagegen ist die Ausbildung der Schweißnaht bei AlMgSi-Blechen unabhängig vom verwendeten Pulverwerkstoff (AlMg3, AlMgSi0,5). Ausgewählte Schweißproben wurden eloxiert und auf ihre Farbechtheit beurteilt. Die Eloxalbehandlung geschweißter AlMgSi1 Bleche mit AlMgSi0,5 Pulver ergab nur geringe farbliche Unterschiede zwischen Schweißnaht und Blechwerkstoff, jedoch kam es zu einem starken Farbunterschied in einem breiten Streifen neben der Schweißnaht. Gute Eloxierergebnisse wurden mit AlMg3-Blechen erzielt. Hier kam es nur zu einem geringen Farbunterschied zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff.

## 5.2 Übertragung der Erkenntnisse auf Aluminiumblechwerkstoffe der Dicke < 2 mm

Eine Übertragung der prozesstechnischen Erkenntnisse aus den Blechwerkstoffen mit 2 mm Dicken war an dieser Stelle nicht möglich. Für das Schweißen von Blechen der Dicke 1,5 mm mussten neue Prozessfenster erarbeitet werden, wobei auch hier der Nachweis der Reproduzierbarkeit erbracht wurde.

Die einzelnen Prozessfenster werden detailliert dargestellt, an dieser Stelle wird der Einfluss des Bilanzeffektes exemplarisch am Beispiel einer Stumpfverbindung aus AlMg0,4Si1,2 mit AlMgSi0,5 als Pulverzusatzwerkstoff (vgl. Abbildung 28) dargestellt.



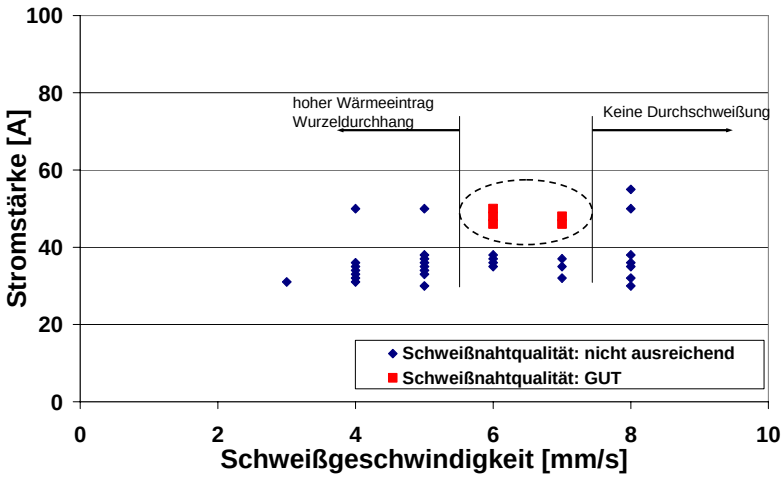
a) 50/50 b) 30/70

Abbildung 28: Exemplarischer Beispiel des Bilanzeffektes am Beispiel der Kombination AlMg0,4Si1,2/AlMgSi0,5..

In Abhängigkeit des Plus-Minus-Verhältnis ist bei weiteren gleich bleibenden Schweißparametern im Fall von einer Einteilung 50/50 keine Durchschweißung zu erzielen. Eine Änderung des Balanceverhältnises von 50/50 auf 30/70 führt zu einem erhöhten Energieeintrag, der ein Durchschweißen ermöglicht. Auch die Nahtoberseite unterscheidet sich deutlich. Beim Balanceverhältnis 50/50 ist die Nahtschuppung der Schweißnaht völlig unregelmäßig, bei Balanceverhältnis 30/70 dagegen ist eine regelmäßige Nahtschuppung zu erkennen. Bei beiden Proben ist keine schwarze Oxidablagerung neben der Naht zu erkennen. Die Nahtoberfläche bei Balanceverhältnis 50/50 glänzt stärker als die Nahtoberfläche bei Balanceverhältnis 30/70. Aus diesem Grund ist bei allen nachfolgenden Untersuchungen ein „Balance“-Effekt von etwa 30/70 oder 35/65 ausgewählt worden.

### 5.2.1 Eigenschaftsprofil hinsichtlich Prozessreproduzierbarkeit, Farbechtheit und mechanisches Verhalten von AlMg-Legierungen

In Abbildung 29 sind die optimalen Bedingungen für das prozesssichere Schweißen von AlMg3 mit AlMg3 Pulverwerkstoffen dargestellt. Der optimale Schweißbereich ist sehr eingeschränkt und liegt zwischen 40-50 A und einer Schweißgeschwindigkeit von 30 bis 42 cm/min.




| | |
|---|---|
| Zusatzwerkstoff | AlMg3 |
| Pulverförderrate: | 3,6 g/min |
| Schweißstrom | 46 A |
| Schweißgeschwindigkeit | 6 mm/s |
| Balance | 35/65 |
| Schutzgas (SG): Ar/He (50/50) | 20 l/min |
| Plasmagas (PG): Ar | 3,5 l/min |
| Pilotstrom | 10 A |
| Trägersmenge (TG): Ar | 1,5 l/min |
| Frequenz | 85 Hz |
| Positive Halbwelle | Sinus |
| Negative Halbwelle | Rechteck |

Abbildung 29: Optimierte Bearbeitungsbedingungen für AlMg3/AlMg3 Paarung.

In diesen Bereichen wird eine regelmäßige Durchschweißung erreicht, bei der nur eine mäßige Schuppung der Nahtoberfläche vorliegt (Abbildung 30). Die Nahtüberhöhung ist niedriger als 1,0 mm, während der Wurzeldurchhang geringer als 2,0 mm ist. In Abbildung 31 ist ein Detail des Überganges Schweißgut/Grundwerkstoff zu sehen. Bei einem höheren Wärmeeintrag wird ein Durchbrechen der Schmelze mit erhöhtem Wurzeldurchhang erzielt. Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten hingegen wird zwar der Pulverwerkstoff aufgeschmolzen, aber eine Durchschweißung erfolgt nicht.

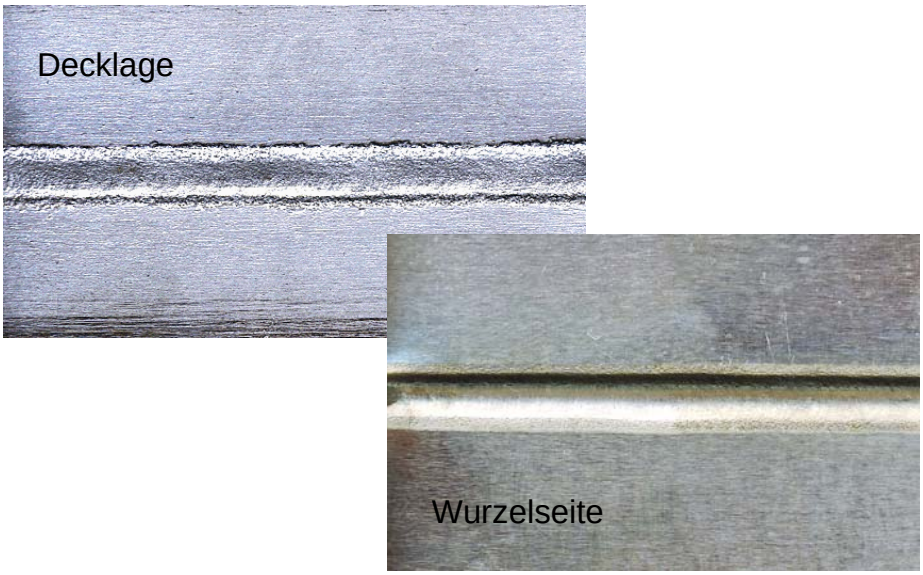



Abbildung 30: Optisches Erscheinungsbild der Schweißverbindung

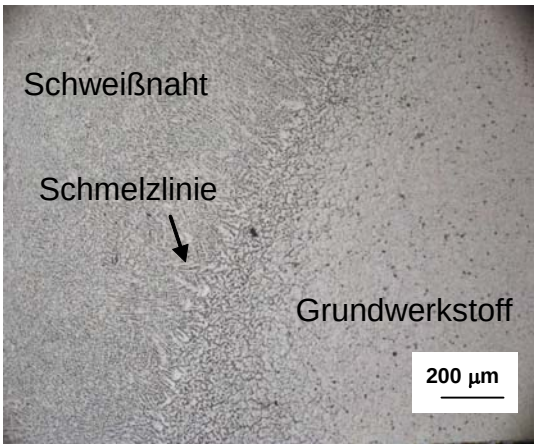



Abbildung 31: Detail des Überganges Schweißgut/Grundwerkstoff.

Der Härteverlauf über die Schweißnaht zeigt eine geringe Abnahme der Härte neben dem Schweißgut in der WEZ (vgl. Abbildung 32).

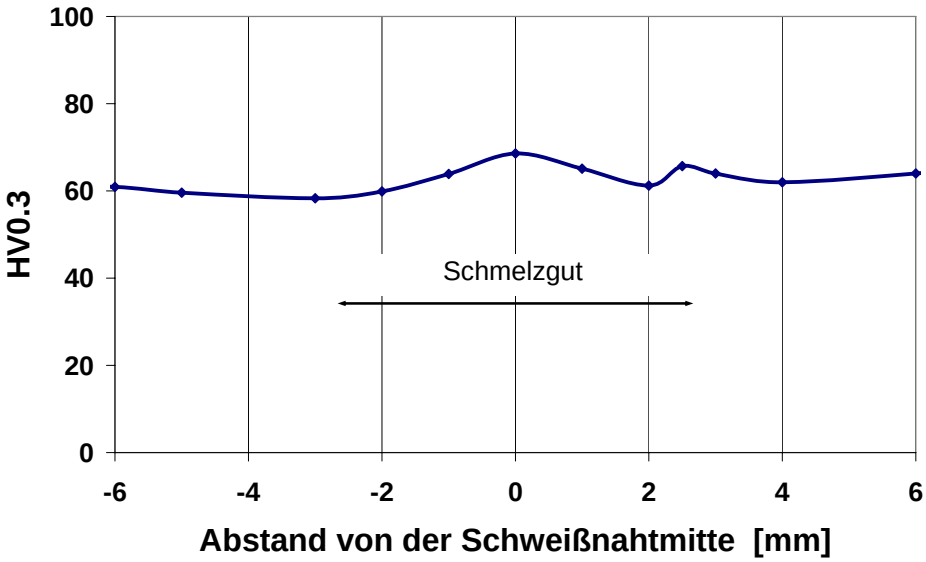



Abbildung 32: Härteverlauf über die Schweißverbindung AlMg3-Blech, AlMg3-Pulver.

Die Ergebnisse der mechanisch-tehnologischen Prüfung zeigen, dass das Verhalten der Verbindung vergleichbar mit dem des Grundwerkstoffes ist, so dass nicht mit einer Abnahme des mechanisch-technologischen Eigenschaftsprofils zu rechnen ist.

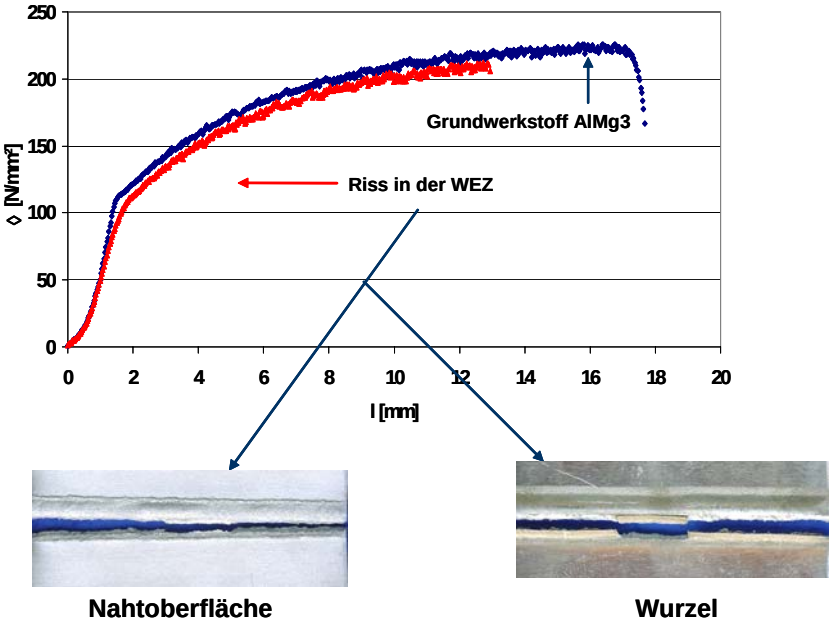



Abbildung 33: Exemplarischer Verlauf aus mindestens 3 Proben.

Das Versagen tritt in der WEZ neben der Naht am Übergang zur WEZ.

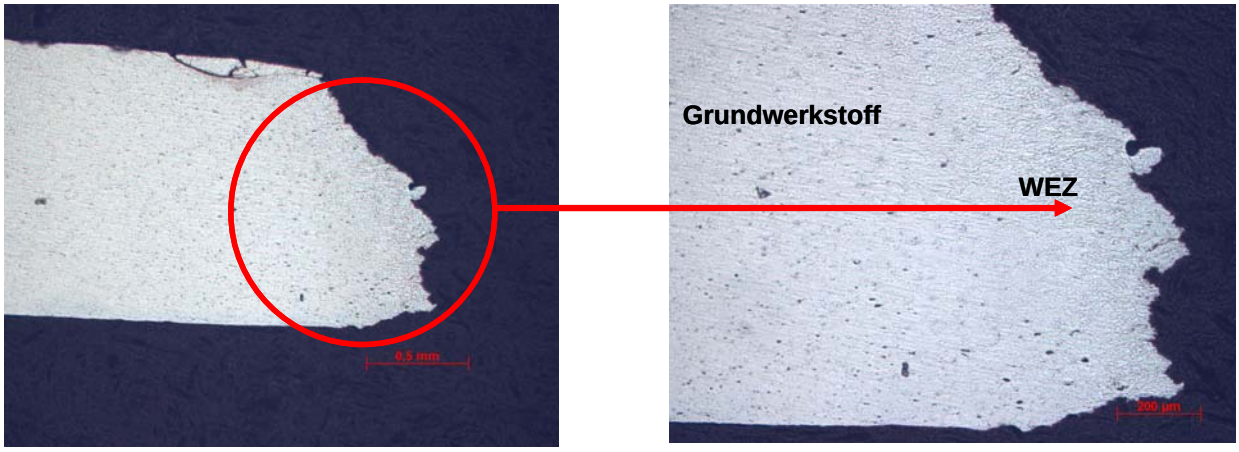



Abbildung 34: Versagensverhalten im Zugversuch

Die Farbechtheit nach dem Eloxieren wurde ohne und mit dem Einsatz von Pigmenten überprüft und ist zusammenfassend in Abbildung 35 dargestellt.

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass im eingefärbten Zustand eine gute Farbannährung des Schweißgutes mit dem Grundwerkstoff zu erkennen ist, jedoch zeichnet sich ein hellerer linienförmiger Bereich in der WEZ auf der Wurzelseite ab.

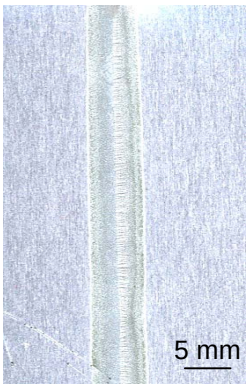
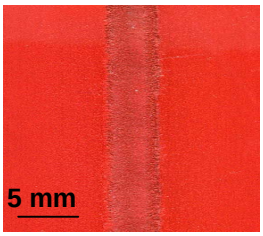
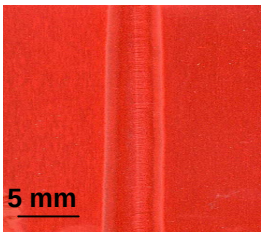
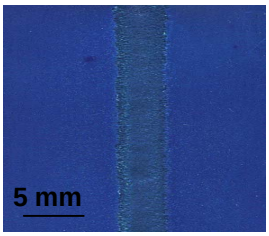
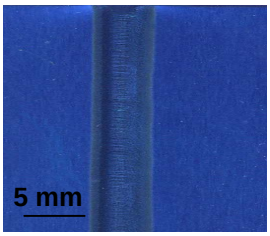
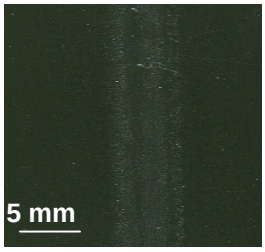
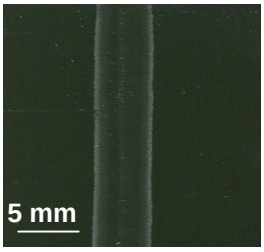
| Farbe | Deckseite | Wurzelseite |
|---|---|---|
| Zustand: wie geschweißt<br>Ohne Farbmittel<br>Schichtdicke: 10 µm | |  |
| rot |  |  |
| blau |  |  |
| schwarz |  |  |

Abbildung 35: Untersuchungen zur Farbechtheit nach dem Eloxieren mit unterschiedlichen Einfärbungen. Schweißbedingungen: i=46 A, v=46 cm/min.

Deutliche Unterschiede sind im nicht verfärbten Zustand zu erkennen. Hier besitzt die Schweißnaht in der Aufnahme einen dunkleren Aspekt als der Grundwerkstoff, wobei dieser einerseits mit dem Oberflächenzustand des Schweißgutes zu verknüpfen ist. Der Zustand nach Abtragen der Nahtüberhöhung und Eloxieren ist in Abbildung 36 wiedergegeben. Es ist zu erkennen, dass im Schweißgut eine bessere Farbannährung zum Grundwerkstoff zu erreichen ist, wobei vereinzelte Poren als Angriffstellen erscheinen und als dunkle Bereiche sichtbar werden.

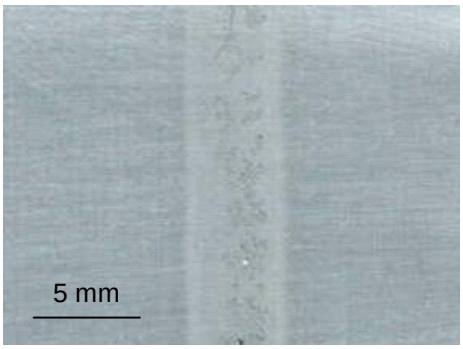



Abbildung 36: AlMg3 Verbindung mit abgetragenem Deckbereich.

### 5.2.2 Eigenschaftsprofil hinsichtlich Prozessreproduzierbarkeit, Farbechteheit und mechanisches Verhalten von AlMgSi-Legierungen

#### 5.2.2.1 Schweißen von AlMgSi-Blechwerkstoffen mit AlSi12 Zusatzwerkstoff

Das Schweißen mit AlSi12 als Zusatzwerkstoff hat sich im industriellen Einsatz bereits etabliert, da dieser Werkstoff ausgezeichnete Eigenschaften hinsichtlich Fließeigenschaften besitzt. Im Rahmen der Untersuchungen diente diese Verbindungsart als Referenz.

Der Oberflächenzustand nach dem Schweißen ist in Abbildung 37 dargestellt. Es ist eine regelmäßige Nahtbildung zu erkennen mit einer durchgehenden Durchschweißung ohne Wurzeldurchhang.

a) Decklage b) Wurzellage

Abbildung 37: Optische Bewertung der Schweißgüte einer AlMgSi1 Verbindung mit AlSi12 als Pulverzusatzwerkstoff. Schweißbedingungen: i=42 A, v=24 cm/min.

Die Nahtausbildung ist exemplarisch in Abbildung 38 dargestellt und weist eine sehr homogene Mikrostruktur mit einer ausreichenden Durchmischung Zusatzwerkstoff/Grundwerkstoff und eutektischer Erstarrung auf.

Korngrenzanschmelzungen sind in der WEZ in einem Bereich von etwa 100 µm zu erkennen.

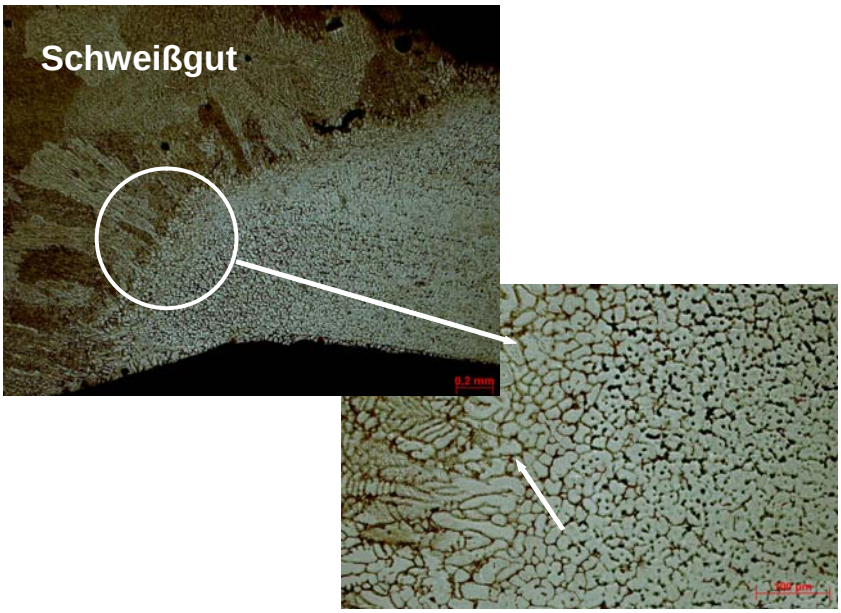
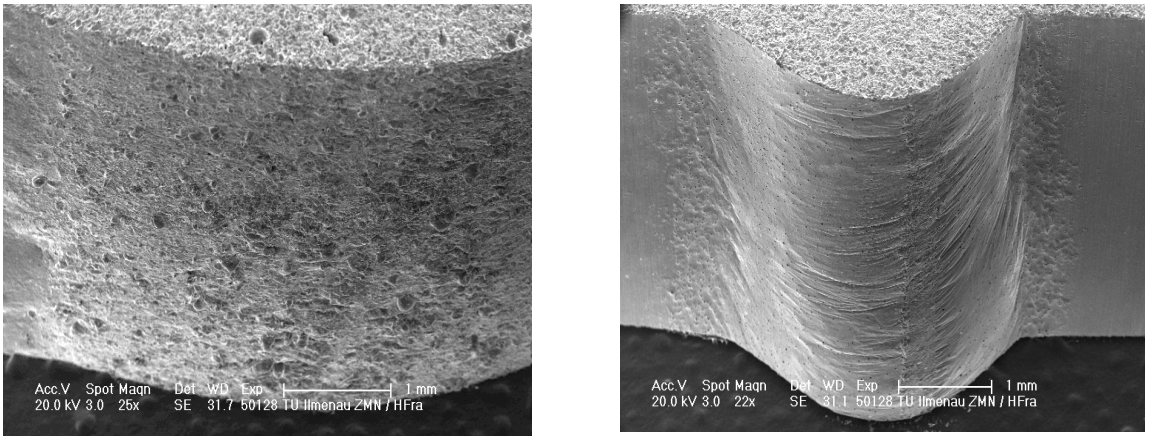



Abbildung 38: Metallographische Bewertung der Schweißverbindung.

REM Aufnahmen der Oberflächentopographie geben Aufschluss über den Verlauf der Schweißnahtdecklage und der Schweißnahtwurzel und sind in Abbildung 39 zusammengefasst.




a) b)

Abbildung 39: Schweißverbindung AlMgSi1/AlSi12, a) Schweißnahtdecklage, b) Wurzeldurchhang.

Anhand der Aufnahmen mit dem REM konnte für die Schweißverbindung AlMgSi1/AlSi12 eine fehlerlose Ausbildung der Schweißnahtdecklage und –wurzel beobachtet. Die Schweißnahtdecklage konnte mit einer Nahtüberhöhung < 1 mm und der Wurzeldurchhang mit einer Höhe < 2 mm reproduzierbar geschweißt werden.

Erkennbar ist auch, dass sich unvollständig geschmolzenes Pulver auf der Decklagenoberfläche ansammelt und für eine gewisse Rauheit sorgt, die die Bewertung der Farbechtheit verfälschen könnten.

Die Bewertung der Farbechtheit nach dem Eloxieren zeigt, dass in der Schweißnaht eine deutliche Verdunkelung auftritt, die die Anwendung im Sichtbereich stark einschränkt (vgl. Abbildung 40).

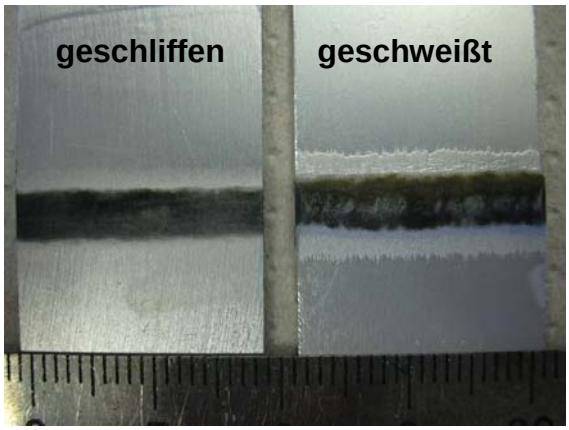
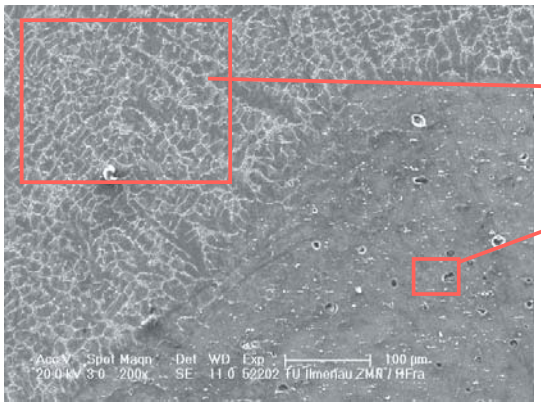



Abbildung 40: Eloxierergebnis für AlSi12 Pulverwerkstoffe.

Die Flächenanalyse des Schweißnahtgefüges und des Grundwerkstoffs ergab für die Elementezusammensetzung die bereits bekannten Ausgangswerte, die das unterschiedliche Verhalten beim Eloxieren erklären. Die Ergebnisse der Flächenanalyse sind in Abbildung 41 dargestellt.



| | | |
|---|---|---|
| F3 | 0,8 At.-% Mg | ( 0,7 Gew.-%) |
| | 87,7 At.-% Al | (87,4 Gew.-%) |
| | 11,4 At.-% Si | (11,9 Gew.-%) |
| F4: | 1,3 At.-% Mg | ( 1,1 Gew.-%) |

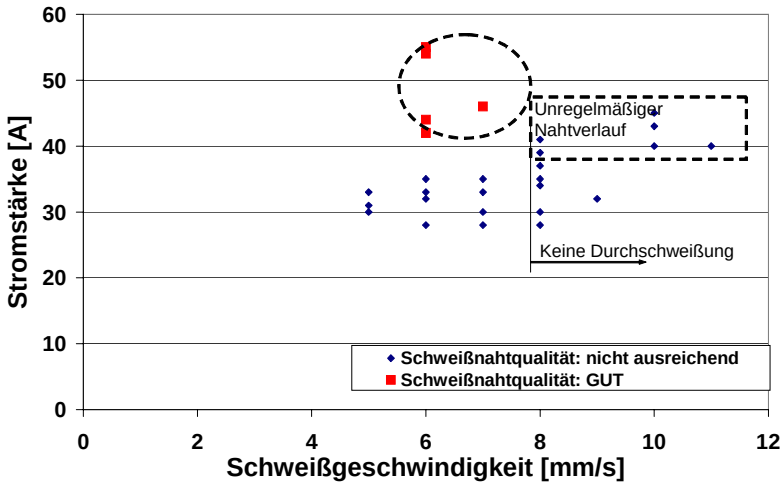
Abbildung 41: Flächenanalyse des Schweißnahtgefüges (F3) und des Grundwerkstoffs (F4).

So wurde im Gefüge der Schweißnaht ein Aluminiumanteil von 87,7 At.-% und ein Siliziumanteil von 11,4 At.-% nachgewiesen, im Grundwerkstoff (AlMgSi1-Legierung) dagegen eine Aluminiumanteil von 98,7 At.-% und ein Magnesiumanteil von 1,3 At.-

%. Da der Siliziumgehalt des AlMgSi1 Grundwerkstoffs mit < 1% mit der EDX-Analyse nur schwer aufzulösen ist, war ein Nachweis nicht möglich.

#### 5.2.2.2 Schweißen von AlMgSi1-Blech mit AlMgSi0,5 Pulverzusatzwerkstoff

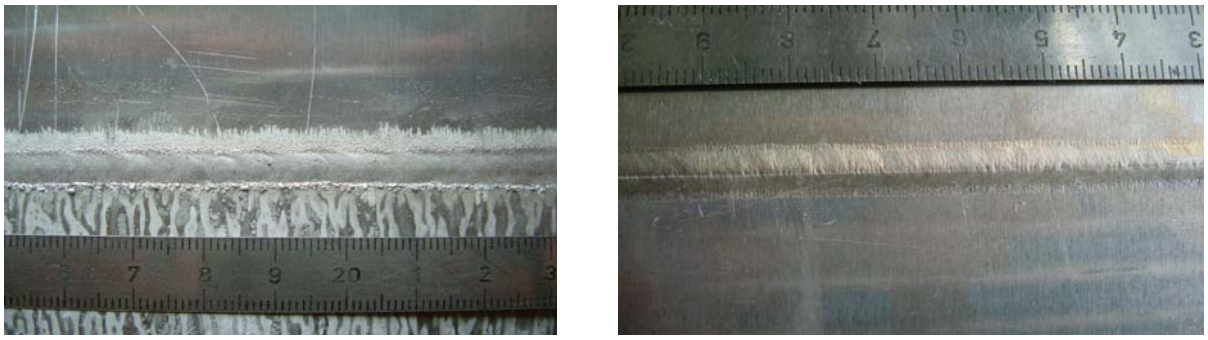
In Abbildung 42 ist der optimale Schweißbereich abgebildet. In Abhängigkeit der Prozesskenngrößen Volumendurchsatz des Plasma-, Träger- und Schutzgases, Pilotstrom, Balance und Pulverförderrate war es auch in diesem Fall möglich einen Bereich einzugrenzen, in dem reproduzierbare Schweißverbindungen hergestellt werden können.




| Zusatzwerkstoff | AlMgSi0,5 |
|---|---|
| Pulverförderrate: | 7 g/min |
| Schweißstrom | 54 A |
| Schweißgeschwindigkeit | 6 mm/s |
| Balance | -1,3 |
| Schutzgas: Ar/He (50/50) | 20 l/min |
| Plasmagas: Ar | 3,0 l/min |
| Pilotstrom | 10 A |
| Trägersmenge: Ar | 1,5 l/min |
| Frequenz | 85 Hz |
| Positive Halbwelle | Sinus |
| Negative Halbwelle | Rechteck |
| Elektrodendurchmesser | 3,2 mm |

Abbildung 42: Prozessfenster AlMgSi1/AlMgSi0,5.

Abbildung 43 gibt einen Hinweis über das äußerliche Erscheinungsbild der Schweißverbindung. Es sind neben der Naht unvollständig geschmolzene Pulverreste zu erkennen, die jedoch leicht entfernt werden können.



a) b)

Abbildung 43: Optische Bewertung der Schweißverbindung.

Die Ausbildung der Fügeverbindung zeigt einen sehr homogenen Übergang von der WEZ zum Schweißgut ohne Bindefehler. Vereinzelte Poren im Schweißgut sind jedoch ebenso zu erkennen (Abbildung 44).

Abbildung 44: Nahtverlauf und Gefügeausbildung.

Die Ermittlung des Festigkeitseigenschaftsprofils zeigt, dass das Versagen in der WEZ eingeleitet wird, wie bereits im Fall der AlMg3 Werkstoffe dargestellt, jedoch mit deutlich geringerer Trag- und Verformungsfähigkeit (Abbildung 45). Dieses Verhalten ist darin begründet, dass gerade am Übergang Schweißgut/WEZ nach dem Schweißen eine Härteabnahme vorliegt (Abbildung 46).

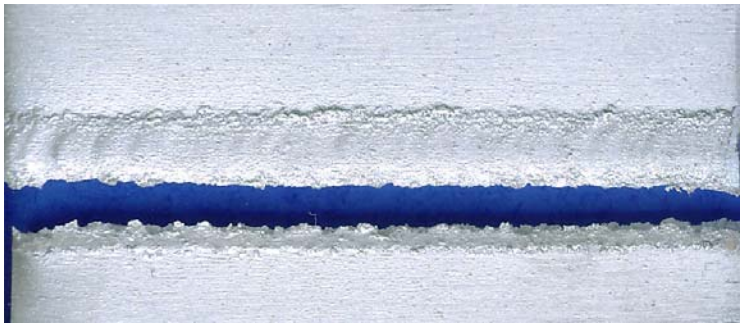


Abbildung 45: Versagensverhalten im Zugversuch.

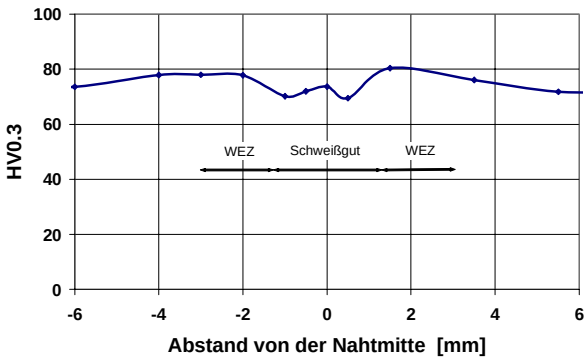



Abbildung 46: Härteprofil über die Schweißnaht.

Die optische Bewertung der Farbechtheit nach dem Eloxieren ist zusammenfassend in Abbildung 47 dargestellt und weist in allen Fällen eine hervorragende Farbannährung zum Grundwerkstoff auf.

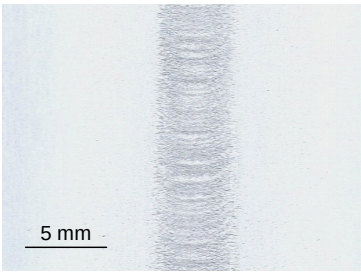
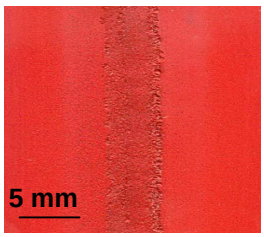
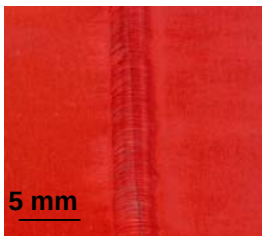
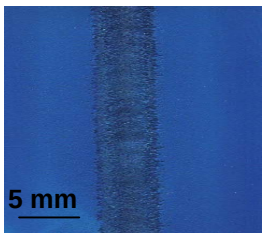
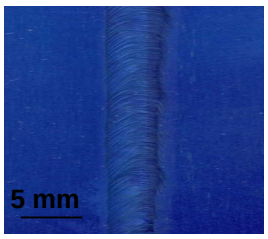
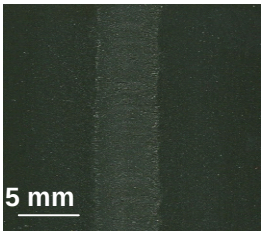
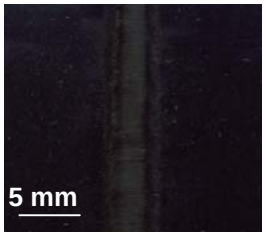
| | Decklage | Wurzelseite |
|---|---|---|
| Zustand: wie geschweißt<br>Ohne Farbmittel<br>Schichtdicke: 10 µm |  | |
| rot |  |  |
| blau |  |  |
| schwarz |  |  |

Abbildung 47: Untersuchungen zur Farbechtheit nach dem Eloxieren mit unterschiedlichen Einfärbungen. Schweißbedingungen: i=54 A, v=40 cm/min.

Leichte Änderungen treten in der WEZ neben der Naht auf, wo sich bei einer genaueren Betrachtung der Mikrostruktur der Verbindung zeigt, dass in der WEZ eine unterschiedliche Verteilung der Ausscheidungen vorliegt, die für ein unterschiedliches elektro-chemisches Potenzial sorgt (vgl. Abbildung 48).

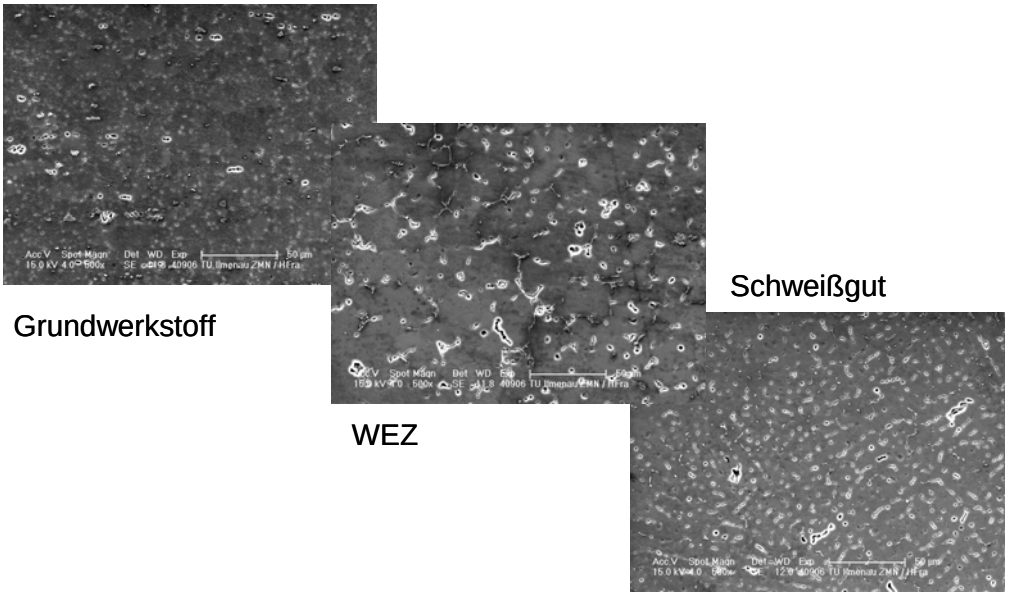



Abbildung 48: REM-Untersuchung der Schweißverbindung

Untersuchungen mittels RBS belegen, dass die Zusammensetzung in der Schweißnaht/WEZ und Grundwerkstoff vergleichbar sind (Abbildung 49), so dass an dieser Stelle festgehalten werden kann, dass im Fall von AlMgSi-Werkstoffen die chemische Zusammensetzung einen deutlichen höheren Einfluss auf die Farbechtheit als das Gefüge hat. Somit kann hier empfohlen werden, dass für praxisrelevante Aufgaben ein artgleicher Zusatzwerkstoff ausgewählt wird.

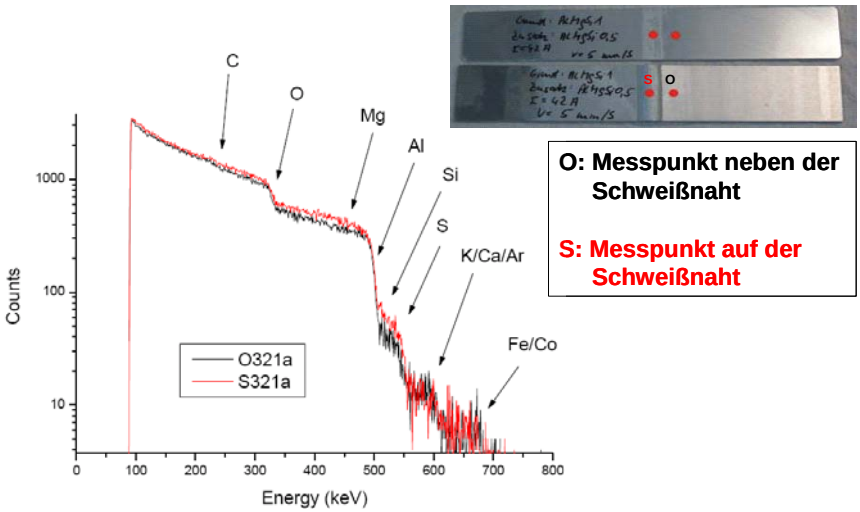



Abbildung 49: RBS Untersuchungen an geschweißten Proben

### 5.2.2.3 Schweißen von AlMgSi-Blechwerkstoffen mit AlMg5-Zusatzwerkstoffen

Die Prozessbedingungen für das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen sind mit denen des AlMgSi0,5 vergleichbar. Auch in diesem Fall zeichnet sich ein optimaler

Schweißbereich aus, der sich zwischen 45-60 A und 30 bis 40 cm/min befindet. Das optische Erscheinungsbild der Verbindung ist in Abbildung 50 dargestellt.

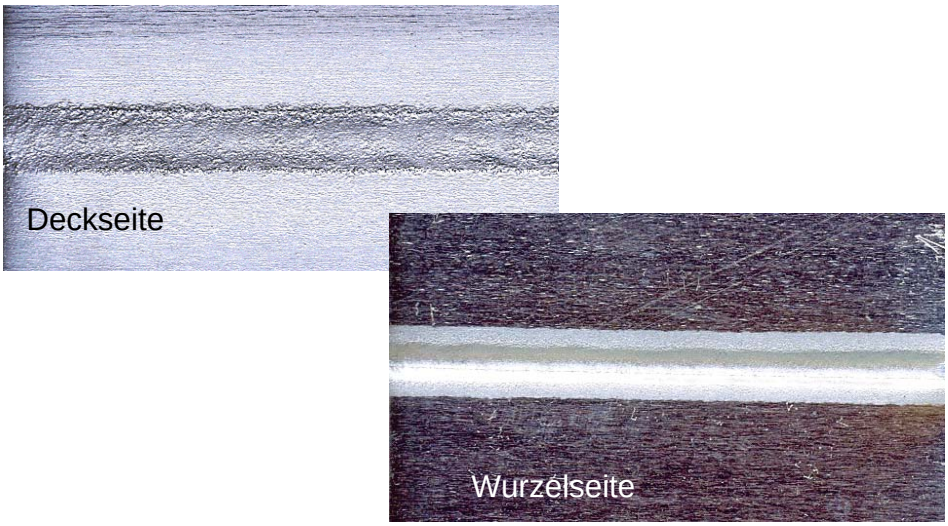



Abbildung 50: Aufnahme der Schweißverbindung

Abbildung 51 zeigt jedoch, dass eine Vielzahl an Poren in der Schweißverbindung vorhanden ist.

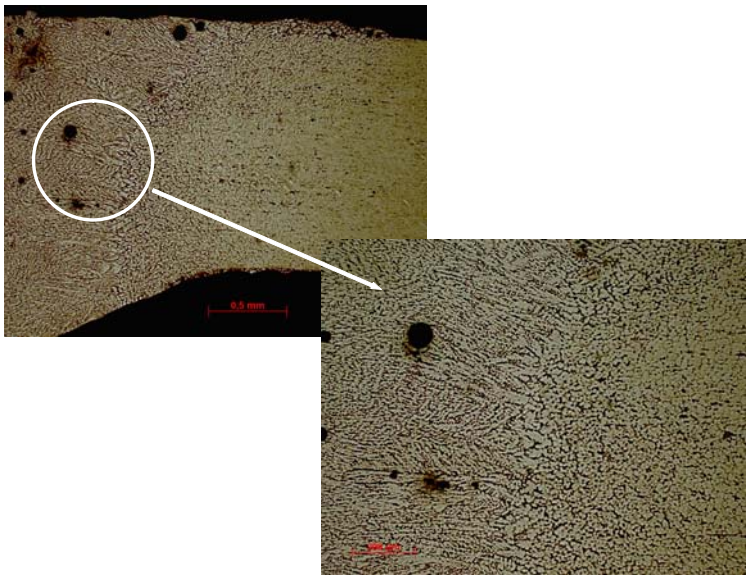


Abbildung 51: Aufbau der Schweißverbindung.

Die Aufnahme des Härteverlaufes (vgl. Abbildung 52) belegt eine deutliche Abnahme der Härte (ca. 25 HV0,3) im Schweißgut, die zu einer geringen mechanischen Festigkeit der Verbindung führt.

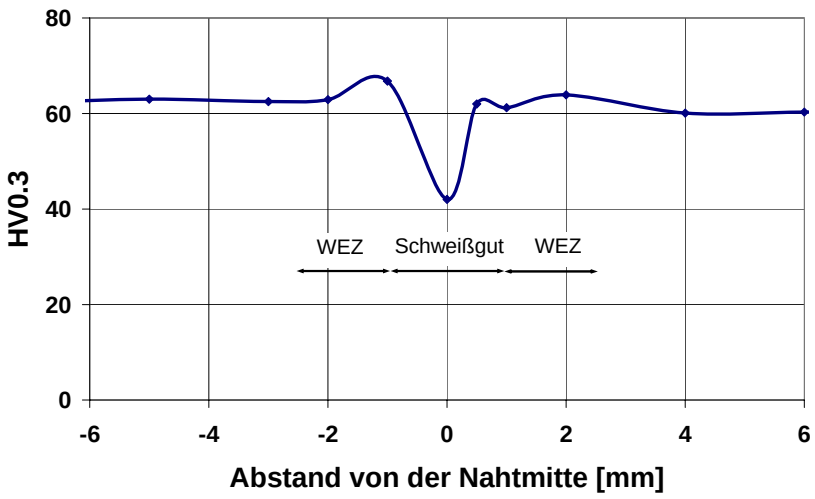



Abbildung 52: Härteverlauf.

Ein deutlich unterschiedliches Verhalten hinsichtlich Farbechtheit kann jedoch erkannt werden (vgl. Abbildung 53). Insbesondere ist ein Farbunterschied zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut zu erkennen.

RBS Untersuchungen zeigen, dass deutliche Abweichungen im Mg- und Al-Gehalt auf Grund des artfremden Zusatzwerkstoffes zu erkennen sind. Insbesondere ist aufgrund der begrenzten Durchmischung zu erkennen, dass sich im Schweißgut eine chemische Zusammensetzung ähnlich dem Zusatzwerkstoff einstellt. Der Übergangsbereich Schweißgut/WEZ deutet auf eine unterschiedliche Zusammensetzung hin, die für die Farbunterschiede verantwortlich ist (Abbildung 55).

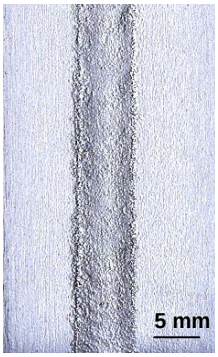
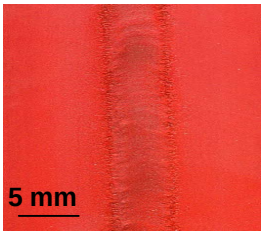
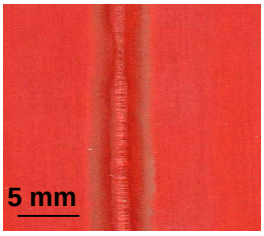
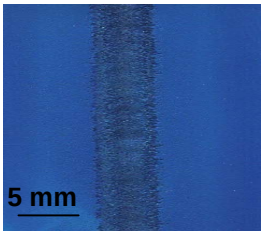
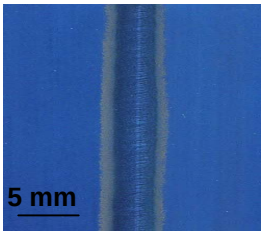
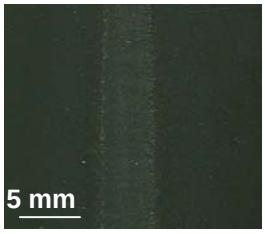
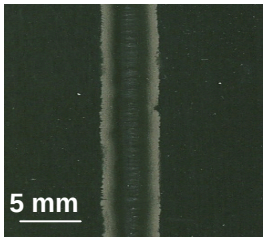
| | Deckseite | Wurzelseite |
|---|---|---|
| Zustand: wie geschweißt<br>Ohne Farbmittel<br>Schichtdicke: 10 µm |  | |
| rot |  |  |
| blau |  |  |
| schwarz |  |  |

Abbildung 53: Untersuchungen zur Farbechtheit nach dem Eloxieren mit unterschiedlichen Einfärbungen. Schweißbedingungen: i=54 A, v=40 cm/min.

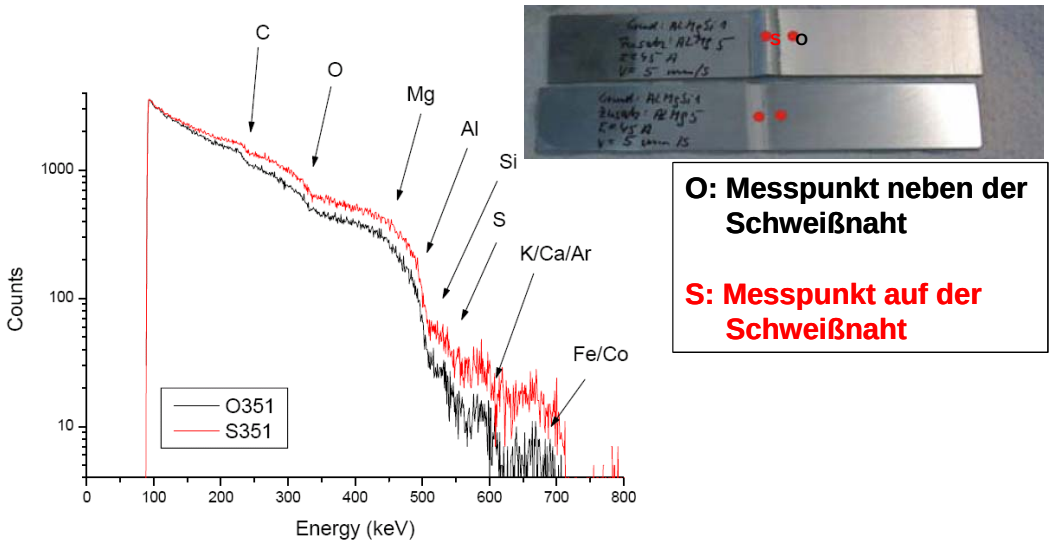



Abbildung 54: Verlauf der RBS Untersuchungen.

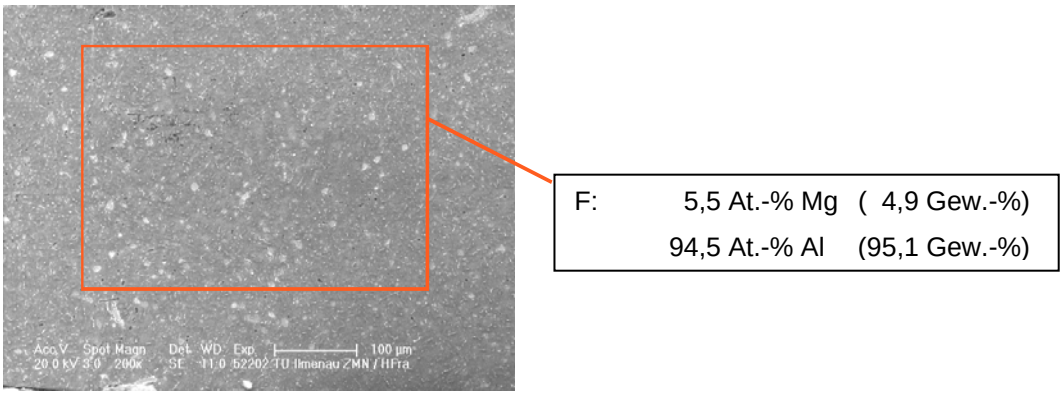



Abbildung 55: Flächenanalyse des Schweißnahtgefüges der AlMgSi1/AlMg5 Verbindung

# 6 Zusammenfassung

Der zunehmende Einsatz von Aluminiumwerkstoffen fordert innovative Strategien für dessen Bearbeitung. Der Schweißtechnik wird unter diesem Gesichtspunkt besonders Rechnung getragen. Aluminiumwerkstoffe gelten im Allgemeinen als schweißgeeignet, wobei die hohe Wärmeleitfähigkeit und die hochschmelzende Oxidschicht die Prozessführung stark beeinflussen.
Hochleistungsverfahren, wie zum Beispiel das Laserstrahlschweißen und das Elektronenstrahlschweißen bieten den Vorteil einer örtlich begrenzten Wärmezufuhr, so dass diese Verfahren sich in der Serienfertigung etabliert haben.
KmU stellen in der Regel ein dynamisches System dar, das auf turbulente Einflüsse des Marktes schnell reagieren muss. Dabei müssen kmU sehr flexible agieren, d.h. gegebenenfalls kleine Stückzahlen aber hohe Typenvielfalt. Unter diesem Gesichtspunkt sind die bereits genannten Verfahren mit einem hohen Investitionsaufwand verknüpft.
Das WIG-Schweißen und das MIG-Schweißen bieten an dieser Stelle den Vorteil der geringen Investitionskosten, haben jedoch aus technologischer Sicht den Nachteil einerseits der hohen Wärmeeinbringung in das Bauteil und des damit verbundenen Verzuges und andererseits der Spritzerbildung, die die optischen Eigenschaften negativ beeinflussen.

Die Plasmatechnik stellt eine kostengünstige Alternative zum Stichlochschweißen dar und kann für Aluminiumlegierungen bis zu Dicken von 5 mm eingesetzt werden. Der Einsatz von drahtförmigen Zusatzwerkstoffen begrenzt jedoch die 3-D Tauglichkeit des Verfahrens, so dass die Entwicklung und die Anwendung des Plasma-Pulver-Verbindungsschweißens vorzuziehen ist. Die Übertragung und die Durchführung von Schweißarbeiten auf dünne Aluminiumbleche mit einer Dicke < 2 mm mit AlSi-Legierungen wurde in vorherigen Untersuchungen als mäßig bezeichnet. Pulverpartikel besitzen eine eigen Oxidhaut, die eine hohe Wärmeeinbringung zum Zerstören erfordert. Dieser Eintrag führt bereits zum Aufschmelzen des Blechwerkstoffes noch vor dem Abschmelzen des Pulverwerkstoffes.
Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen belegen, dass eine direkte Übertragung der

Erkenntnisse zur Prozessführung auf Dünnbleche nicht möglich ist. Im Rahmen des Vorhabens konnten jedoch Prozessfenster für die Bearbeitung von 2 mm und 1,5 mm Blechen erarbeitet werden. Die Reproduzierbarkeit ist grundsätzlich gegeben, auch wenn leichte Abweichungen vom optimalen Bereich bereits zu Unregelmäßigkeiten führen können. Die Untersuchungen zeigen, dass als Prozesskenngrößen die Balance, die Schweißgeschwindigkeit, die Plasmagasmenge und der Schweißstrom im Zusammenspiel mit der verwendeten Werkstoffkombination das Nahtprofil und die Schweißnahtgüte bestimmen.
Für das Plasma Wechselstromschweißen ist es empfehlenswert ein Verhältnis der Plus/Minushalbwelle um 30/70 % einzustellen, um eine Durchschweißung des Aluminiums bei gleichzeitigem Abschmelzen des Pulverwerkstoffes zu erreichen. Für Bleche der Stärke 1,5 mm gilt ein Stromstärkenbereich von 40-50 A bei einer Schweißgeschwindigkeit um 40 cm/min. Der Einsatz weiterer Zusatzwerkstoffe wie AlSi12, AlMg5 oder AlMgSi0,5 ändert das Verhalten nicht wesentlich. Rissbildung konnte in diesem Zusammenhang nicht festgestellt werden.
Einen ausgeprägten Einfluss der Pulveroxidbelegung konnte nicht nachgewiesen werden. Vielmehr spielt eine regelmäßige Förderung des Pulvers eine wichtige Rolle. Diese ist bei der geringe geförderten Menge und bei der geringen Dichte des Aluminiums mit den heutigen Pulverförderern für das PPAW nicht immer gewährleistet.

Aluminiumbauteile werden nach der Bearbeitung einer Eloxalbehandlung unterzogen, mit dem Ziel, die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen. Dabei handelt sich um einen eletrochemischen Vorgang. Unter konventionellen Bedingungen, d.h. bei dem Einsatz von Al-Si-Legierungen weist das Schweißgut ein völlig anderes Verhalten als der Grundwerkstoff auf, da das elektrochemische Potenzial auf Grund der chemischen Zusammensetzung verändert wird. Aus diesem Grund sind im Rahmen der Untersuchungen andere Zusatzwerkstoffe auf Basis AlMg und AlMgSi ausgewählt worden mit dem Ziel, eine Annährung des Verhaltens des Schweißgutes zum Grundwerkstoff zu erzielen und somit die Farbechtheit zu gewährleisten.
Im Wesentlich haben alle untersuchte Kombinationen eine bessere Farbechtheit als AlSi-Legierungen ausgewiesen.

Im Fall der naturharten Legierungen konnte durch den Einsatz eines artgleichen Zusatzwerkstoffes eine hohe Güte erreicht werden. Die Verbindung, die auch mit unterschiedlichen Farben (rot, blau und schwarz) bewertet worden sind, zeigen eine eindeutige Farbechtheit zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass in diesem Fall die chemische Zusammensetzung eine wichtigere Rolle als der Gefügezustand spielt. Nur im Bereich der WEZ konnte eine messerförmige Zone erkannt werden, bei dem der Aufbau der Oxidschicht abweicht, wobei dieses Merkmal mit den geometrischen Eigenschaften der Schweißnaht verknüpft werden kann. Die Schweißnaht weist in der Regel im Decklagenbereich eine geringe Oberflächenrauheit auf, die durch die ungeschmolzenen Partikel hervorgerufen wird. Ein Abtragen der Nahtüberhöhung führt bereits zu wesentlich besseren Ergebnissen. Poren wirken sich grundsätzlich negativ aus, da diese als bevorzugte Angriffstelle wirken.
Der Einsatz eines artgleichen Werkstoffes führt nicht zu einer Abnahme des mechanisch-technologischen Eigenschaftsprofils der Verbindung. Festigkeit und Verformbarkeit bleiben unverändert, während das Versagen am Übergang WEZ/Schweißgut auftritt.

Die Ergebnisse an den aushärtbaren Legierungen zeigen, dass auch in diesem Fall bei artgleichen Verbindungen, d.h. bei ähnlicher Zusammensetzung, eine gute Farbannährung zu erkennen ist. Auch wenn die Ausscheidungsverteilung in der WEZ/GW/Schweißgut sehr unterschiedlich ist, kann für den praxisrelevanten Einsatz davon ausgegangen werden, dass nur geringfügige Farbunterschiede auftreten. Der Einsatz artfremder Zusatzwerkstoffe verschlechtert zwar das Ergebnis, jedoch ist die Farbabweichung sehr begrenzt. In diesem Fall ist jedoch mit einer Abnahme der Zugfestigkeit zu rechnen, die mit der Härteabnahme neben der Schweißnaht verknüpft ist.

Zusammenfassend lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse feststellen, dass:

- das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen auch für dünnere Bleche prozesssicher und wirtschaftlich (0,4 m/min) durchgeführt werden kann.
- für den praxisrelevanten Einsatz ist der chemischen Zusammensetzung in Bezug auf die Farbechtheit besonders Rechnung zu tragen. Der

Gefügezustand spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle für die Farbausbildung beim Eloxieren.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht

# 7 Literaturverzeichnis


/Chruszez98/ Chruszez, M. et al.: Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen-Ein Verfahren mit besonderen Einsatzbereichen, DVS Berichte 194, Schweißen und Schneiden, (1998)

/Baumann98/ Baumann, B.: Hochleistungsschweißverfahren für aluminiumgerechte Konstruktionen, Dissertation, RWTH Aachen, 1998

/Dilthey95/ Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren Band 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. VDI Verlag, (1995)

/Dilthey01/ Dilthey, U.; Behr, W.: Non-Vacuum-Elektronenstrahlschweißen an Al- und Mg-Feinblechen. In: 5. Konferenz Strahltechnik, (2001), Halle

/DIN EN 895/ Deutsches Institut für Normung e.V.: Norm DIN EN 895: Zerstörende Prüfung von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen: Querzugversuch. Berlin, Beuth Verlag, August 1995.

/DIN EN 30042/ Deutsches Institut für Normung e.V.: Norm DIN EN 30042: Bewerten von Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen. Berlin, Beuth Verlag.

/Drube05/ Drube, Chr.: http://www.atmpage.de/eloxieren/index.php, 25.9.2005

/Dzelnitzki04/ Dzelnitzki, D.: Plasmaschweißen von Aluminiumwerkstoffen – Gleich- oder Wechselstrom? www.munk-online.de, 10.4.2004

/GDA04/ N.N.: Jahresbericht 2004 des Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.

/Goecke04/ Goecke, S.-F.: Auswirkungen von Aktivgasmischungen im vpm-Bereich zu Argon auf das MIG-Impulsschweißen von Aluminium.. Diss., TU Berlin, (2004).

/Gomes97/ Gomes-Buco, J.; Ludwig, B.; Schulze, K.; Singh, S.: Nonvacuum-Elektronenstrahlschweißen von Aluminiumträgern in der Großserie des Automobilbaus. DVS Bericht 186, (1997), 59-62

/Gra97/ Grave, M.: Beitrag zum MIG- und WIG-Schweißen von Aluminiumlegierungen.
Dissertation, RWTH Aachen, (1997)

/Hilbinger00/ Hilbinger, R. M.: Heißrissbildung beim Schweißen von Aluminium in Blechrandlage. UtzVerlag, München, (2001).

/NN/ N.N.: Anwendung und Optimierung des Plasmaschweißens mit

Pulverzusatz bei der Herstellung von Verbindungen an X6CrNiMoTi 17-12-2. Mitteilung der Westfalen AG.

/NN98/ Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen. Zeitschriftenaufsatz, Blech, Rohre, Profile, Band 45, Heft 5, 1998

/Rapp96/ Rapp, J.: Laserschweißeignung von Aluminiumwerkstoffen. Diss., Univ. Stuttgart, (1996).

/AiF12.751_03/ N.N.: Untersuchungen zur Qualifizierung des Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen von Aluminium für den industriellen Einsatz. AiF-Schlussbericht 12.751, (2003).

/Schoer98/ Schoer H.: Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik 137, DVS Verlag, Düsseldorf, (1998).

/Waldmann00/ Waldmann, H.: Werkstofftechnische Aspekte des Laserstrahlschweißens von Aluminiumlegierungen für den fahrzeugbau. Utz Verlag, München, (2000).

/Waldmann02/ Waldmann, H.: Vergleich der Kennwerte des MIG- und Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen. Aluminium, Jahrgang 78, (2002), 476-483.

/Wellner01/ Wellner, C.: Aluminium – Schrittmacher für innovative Anwendungen. Vortrag im Rahmen des Werkstoff-Forums anlässlich der Hannover Messe 2001.

/Wesling03/ Wesling, V.; Schram, A.; Bock, A.; Wocilka, D.: Untersuchungen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen von Aluminiumblechen. Aluminium, 79, (2003), 1050-1058

/www05/ N.N.: http://www.deraktionaer.de/xist4c/web/Aluminium--Leicht-verdientes-Geld-_id_454__dId_5096209_.htm. 15.9.2005

Aus den Untersuchungen des Vorhabens sind bis zum jetzigen Zeitpunkt folgende Veröffentlichungen entstanden:

Wilden, J.; Bergmann, J.P.: Fertigungs- und werkstofftechnische Aspekte des Plasma-Pulver-Verbindungsschweißens zum Fügen von Aluminiumwerkstoffen. Tagungsband zum 12th Workshop Plasmatechnik (Hrsg.: Nutsch, G.), 23.-24. September 2004, Ilmenau
ISBN 3-00-014314-9

Wilden J.; Bergmann, J.P.: Mechanised Plasma-Powder-Arc-Welding (PPAW) of aluminium sheets. Advanced Material Research 6-8, (2005)

Abbildung 1: Preisentwicklung des Werkstoffes Aluminium (/www05/) im Zeitraum 2003-2005. ..... 2
Abbildung 2: Schematische Einteilung der Aluminiumwerkstoffe (/Dilthey95/) ..... 4
Abbildung 3: Aufbau einer auf Reinaluminium in feuchter Luft gebildeten Oxidschicht. Al: Grundwerkstoff; Sp: Sperrschicht; D: Deckschicht; P: Poren; H: Heterogenitäten im Grundwerkstoff; M: Mischoxid (/Gra97/). ..... 5
Abbildung 4: Temperaturabhängiger Verlauf der Wasserstofflöslichkeit in Aluminium (/Goecke04/). ..... 6
Abbildung 5: Abhilfemaßnahmen zur Vermeidung von Heißrissen beim Fügen von Aluminiumwerkstoffen (/Dilthey95/) ..... 7
Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau des Plasma-Lichtbogenschweißen (/Dilthey95/). ... 9
Abbildung 7: Ausbildung der Lichtbogensäule (/Dilthey95/). ..... 9
Abbildung 8: Prinzipieller Funktionsweise des Plasma-Pulver-Auftragschweißen (a) und Vergleich der Brennerauslegung (b, /Dilthey95/) ..... 13
Abbildung 9: Aufbau der Eloxalschicht (/Drube05/). ..... 16
Abbildung 10: Aussehen der Schweißverbindung nach dem Eloxieren..... 17
Abbildung 11: a) Stromquelle GAP3000 AC/DC und b) Pulverförderer. ..... 22
Abbildung 12: Robotersystem und Ankopplung Plasma-Roboter. ..... 24
Abbildung 13: Darstellung ausgewählter Spannmittel für das Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen. ..... 24
Abbildung 14: Elementenprofil in ausgewählten Pulverwerkstoffen..... 28
Abbildung 15: Darstellung des Eloxalbades. ..... 29
Abbildung 16: Kombinierter Einfluss der Prozessgrößen auf die Nahtgüte für AlMgSi1/AlMgSi0,5. ..... 31
Abbildung 17: Kombinierter Einfluss der Prozessgrößen auf die Nahtgüte für AlMgSi1/AlMg3. ..... 31
Abbildung 18: Einfluss einer erhöhten Plasmagasmenge auf die Güte der Schweißverbindung. ..... 32
Abbildung 19: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Schweißnahtausbildung für AlMgSi1/AlMgSi0,5..... 32
Abbildung 20: I-Naht am Stumpfstoß, Stromstärke 100 A, Plasmagasdurchfluss 1 l/min, Schweißgeschwindigkeit 0,66 m/min ..... 33
Abbildung 21: I-Naht am Stumpfstoß, Stromstärke 100 A, Plasmagasdurchfluss 1 l/min, Schweißgeschwindigkeit 0,8 m/min ..... 34

Abbildung 22: Einfluss der Stromstärke beim Fügen von AlMg3 ..... 34
Abbildung 23: AlMgSi1-Verbindungen nach Eloxalbehandlung (Schichtdicke ca. 10µm) ..... 35
Abbildung 24: AlMg3-Verbindungen nach Eloxalbehandlung (Schichtdicke ca. 10µm) ..... 35
Abbildung 25: Elementenverteilung am Beispiel der Paarung AlMgSi1/AlMgSi0,5. . 36
Abbildung 26: Schweißnahtausbildung beim Fügen von 2 mm Dicke Aluminiumblechen mit i=90 A, v=90 cm/min, Plasmagasmenge=1,3 l/min. ..... 37
Abbildung 27: Makroaufnahme eloxierter Ecknähte an AlMgSi1 (a) und AlMg3 Blechen (b) (Schichtdicke ca. 10 µm) ..... 37
Abbildung 28: Exemplarischer Beispiel des Bilanzeffektes am Beispiel der Kombination AlMg0,4Si1,2/AlMgSi0,5.. ..... 39
Abbildung 29: Optimierte Bearbeitungsbedingungen für AlMg3/AlMg3 Paarung..... 40
Abbildung 30: Optisches Erscheinungsbild der Schweißverbindung ..... 40
Abbildung 31: Detail des Überganges Schweißgut/Grundwerkstoff. ..... 41
Abbildung 32: Härteverlauf über die Schweißverbindung AlMg3-Blech, AlMg3-Pulver. ..... 41
Abbildung 33: Exemplarischer Verlauf aus mindestens 3 Proben. ..... 42
Abbildung 34: Versagensverhalten im Zugversuch ..... 42
Abbildung 35: Untersuchungen zur Farbechtheit nach dem Eloxieren mit unterschiedlichen Einfärbungen. Schweißbedingungen: i=46 A, v=46 cm/min..... 43
Abbildung 36: AlMg3 Verbindung mit abgetragenem Deckbereich..... 44
Abbildung 37: Optische Bewertung der Schweißgüte einer AlMgSi1 Verbindung mit AlSi12 als Pulverzusatzwerkstoff. Schweißbedingungen: i=42 A, v=24 cm/min. ..... 44
Abbildung 38: Metallographische Bewertung der Schweißverbindung. ..... 45
Abbildung 39: Schweißverbindung AlMgSi1/AlSi12, a) Schweißnahtdecklage, b) Wurzeldurchhang. ..... 45
Abbildung 40: Eloxierergebnis für AlSi12 Pulverwerkstoffe. ..... 46
Abbildung 41: Flächenanalyse des Schweißnahtgefüges (F3) und des Grundwerkstoffs (F4). ..... 46
Abbildung 42: Prozessfenster AlMgSi1/AlMgSi0,5. ..... 47
Abbildung 43: Optische Bewertung der Schweißverbindung. ..... 47
Abbildung 44: Nahtverlauf und Gefügeausbildung. ..... 48
Abbildung 45: Versagensverhalten im Zugversuch. ..... 48

Abbildung 46: Härteprofil über die Schweißnaht..... 49
Abbildung 47: Untersuchungen zur Farbechtheit nach dem Eloxieren mit unterschiedlichen Einfärbungen. Schweißbedingungen: i=54 A, v=40 cm/min..... 50
Abbildung 48: REM-Untersuchung der Schweißverbindung..... 51
Abbildung 49: RBS Untersuchungen an geschweißten Proben..... 51
Abbildung 50: Aufnahme der Schweißverbindung..... 52
Abbildung 51: Aufbau der Schweißverbindung..... 52
Abbildung 52: Härteverlauf. ..... 53
Abbildung 53: Untersuchungen zur Farbechtheit nach dem Eloxieren mit unterschiedlichen Einfärbungen. Schweißbedingungen: i=54 A, v=40 cm/min..... 54
Abbildung 54: Verlauf der RBS Untersuchungen..... 55
Abbildung 55: Flächenanalyse des Schweißnahtgefüges der AlMgSi1/AlMg5 Verbindung ..... 55