

Diplomarbeit

von

Malik Lemeš

Fügen von Magnesium im Karosseriebau

erstellt am:

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

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

in Zusammenarbeit mit:

Magna Steyr Fahrzeugtechnik, Graz

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Vallant, IWE

Dipl.-Ing. Dr.techn. Milan Pudar, IWE

Graz, April 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch sowie dem Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik TU Graz und Fa. Magna Steyr Fahrzeugtechnik bedanken, die mir diese Arbeit genehmigt und ermöglicht haben.

Ich möchte mich besonders bei den Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Milan Pudar und Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant für die Entstehung, Durchführung und exzellente Betreuung dieser Diplomarbeit bedanken.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern der Abteilungen Werkstofftechnik und Prototypenbau Magna Steyr Fahrzeugtechnik für ihre Hilfe bei der Durchführung der notwendigen experimentellen Untersuchungen, insbesondere Herrn E. Rossenberger und W. Vidovic für die Durchführung der Zugversuche, sowie bei Herrn F. Knotz für die Querschleifpräparation.

Herzliche bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des IWS Institutes, die mir viel bei der Ausführung der Schweißversuche und den weiteren Untersuchungen geholfen haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Hikmet und Jasmina für Ihren bedingungslosen Glauben in meine Arbeit bedanken. Ich danke euch von ganzem Herzen, denn ohne euch hätte ich es nie geschafft.

Ich möchte meine Diplomarbeit meiner Großmutter, Frau Nura Lemeš widmen.

Malik Lemeš

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit umfasst das artgleiche Fügen von Magnesiumblechen AZ31 (2mm dick) in der Überlappverbindung, sowie das artfremde Fügen derselben mit Aluminiumblechen DBL4951.60 (2mm dick). Dabei wurden die Fügeverfahren MIG-Schweißen (CMT und CMT-PulsMix), Rührreibschweißen (FSW), Kleben und Halbhohlstanznieten ohne/mit Klebstoff (Stanznieten mit Klebstoff) untersucht. Von den Verbindungen wurden die statische Zugscherfestigkeit und die Ermüdungsfestigkeit ermittelt. Zur Charakterisierung wurden die Schweißverbindungen im Querschliff mittels Lichtmikroskopie und Härtemessung untersucht. An der dissimilaren Al-Mg-Schweißverbindung wurden Mikrosondenanalysen (EPMA) der intermetallischen Phasen durchgeführt.

Es zeigte sich, dass artgleiches Fügen der Mg-Bleche mit MIG, FSW, Halbhohlstanznieten und Kleben sicher durchführbar ist. Für das artfremde Fügen mit Al-Blechen können das Kleben und das Halbhohlstanznieten mit Kleben angewendet werden.

Abstract

This thesis includes the similar joining of magnesium sheets AZ31 (2 mm thick) in the lap joint, as well as the dissimilar joining of them with aluminium sheets DBL4951.60 (2 mm thick). Thereby were joining processes MIG welding (CMT and CMT-Puls-mix), friction stir welding (FSW), bonding and semi-hollow punch riveting with as well as without adhesive examined. The static shear strength and fatigue strength of the compounds were determined. For the characterization of welds in cross-section was examination by light microscopy and hardness-measurement carried out. At the dissimilar Al-Mg-welds were performed micro-tube analyses (EPMA) of the intermetallic phases.

It was found that the similar joining of magnesium sheets using MIG, semi-hollow punch riveting can be carried out safely. For the dissimilar joining of Al-sheet can be used bonding und half-hollow punch riveting.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	I
Kurzfassung	III
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einführung.....	1
2 Literatur	2
2.1 Magnesium.....	2
2.1.1 Gewinnung von Magnesium	2
2.1.2 Physikalische Eigenschaften von Magnesium	3
2.1.3 Mg-Legierungen –Wirkung der Legierungselemente	4
2.1.4 Anwendungen von Mg-Legierungen im Automobilbau.....	6
2.1.5 Herstellung von Mg-Knetlegierungen.....	9
2.1.6 Herstellung von Mg-Druckguss.....	13
2.2 Porenbildung in Gusswerkstoffen	15
2.2.1 Thixomoulding.....	16
2.3 Korrosionseigenschaften von Mg-Legierungen.....	17
2.3.1 Galvanische Korrosion	17
2.3.2 Korrosion an Atmosphäre und in Salzlösungen	18
2.3.3 Korrosionsschutz.....	20
2.4 Fügen.....	21
2.4.1 MIG-Schweißverfahren.....	21
2.4.2 FSW-Schweißverfahren	26
2.4.3 Halbhohlstanznieten.....	27
2.4.4 Kleben.....	30
2.4.5 Hybridfügen.....	31
3 Experimentelles.....	33
3.1 Verwendete Grundwerkstoffe	33
3.2 Verwendete Schweißzusatzwerkstoffe für MIG (CMT) –Schweißen	34
3.3 MIG-Schweißversuche	35
3.4 FSW-Schweißversuche	36
3.5 Halbhohlstanznieten.....	37
3.6 Mechanische Prüfungen und Metallographie - Probenherstellung	39
3.7 Prüfverfahren	43
3.8 Gestaltung der Schweißverbindungen.....	44
4 Ergebnisse	47

4.1	Artgleiches Fügen	47
4.1.1	MIG (CMT) - Schweißverfahren.....	47
4.1.2	FSW-Schweißverfahren	59
4.1.3	Halbhohlstanznieten.....	61
4.2	Gegenüberstellung der Ergebnisse - Fügen Mg-Mg	64
4.2.1	Zugversuche	64
4.2.2	Dauerschwingversuche CMT Mg-Mg im Vergleich zu Al-Al	66
4.3	Artfremdes Fügen (Mg-Al)	66
4.3.1	MIG (CMT) – Schweißverfahren.....	66
4.3.2	FSW Schweißverfahren.....	73
4.3.3	Halbhohlstanznieten.....	78
5	Zusammenfassung.....	82
6	Literaturverzeichnis	84
7	Verzeichnisse	86
7.1	Abbildungsverzeichnis.....	86
7.2	Tabellenverzeichnis.....	89
7.3	Diagrammverzeichnis.....	90

1 Einführung

In den vergangenen Jahren wurden durch den Einsatz von Aluminium und Kunststoffen erhebliche Fortschritte im Leichtbau erreicht. Um einen zusätzlichen Beitrag zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs zu leisten, müssen allerdings neue Karosseriebauweisen angewendet werden. Aus diesem Grund wird bei der Entwicklung von neuen Lösungskonzepten der Ansatz verwendet, dass bei jeder einzelnen Komponente der Karosserie derjenige Werkstoff ausgewählt wird, der die Anforderungen bei minimalem Gewicht erfüllt. Da die Gesamtgewichte von modernen Fahrzeugen nach wie vor zunehmen, bleibt die Anwendung von noch leichteren Werkstoffen als die einzige Möglichkeit zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs, Abbildung 1.

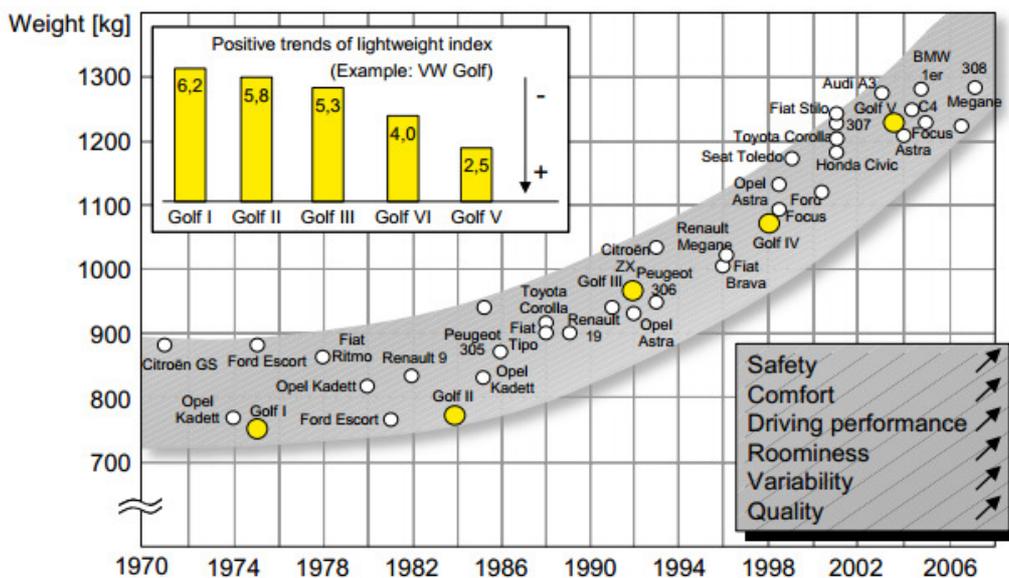


Abbildung 1: Entwicklung von Fahrzeuggewichten [1]

Die Herstellung einer Karosserie in Multi-Material-Bauweise haben sich im Jahr 2005 37 Partner aus der europäischen Automobilindustrie als Ziel gestellt. Als Referenzmodell diente der VW Golf V. Die Gewichts- und Materialverteilung des fertigen Konzepts sind in Abbildung 2 dargestellt. Den größten Anteil haben Aluminium (53%) und Stahl (36%). Der Werkstoff Magnesium ist mit 7% beteiligt. Dabei kommen neben Magnesiumblechen auch gegossene Bauteile zum Einsatz [1].

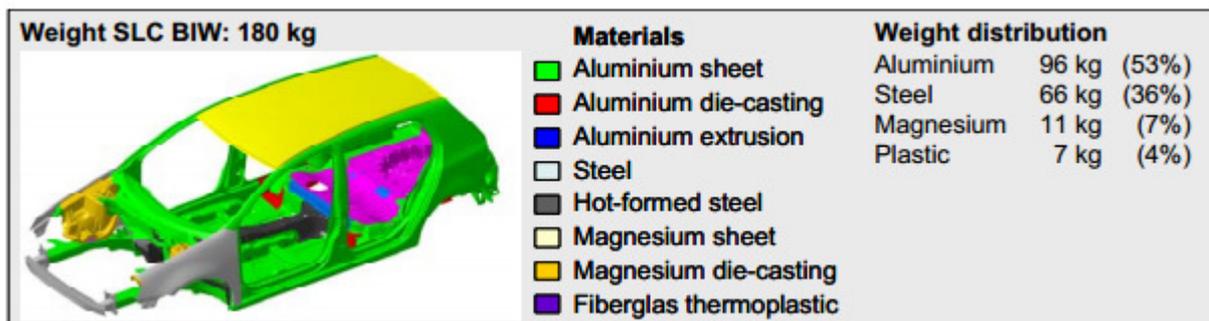


Abbildung 2: Gewichts- und Materialverteilung [1]

2 Literatur

2.1 Magnesium

Magnesium wurde 1774 entdeckt und ist in der Erdkruste mit ca. 2% enthalten. Dieses Element gehört zu der Gruppe der Erdalkalimetalle und ist in der Natur nicht in der elementaren Form zu finden. Die wichtigsten Rohstoffe zur Gewinnung von Magnesium sind die Mineralien Magnesit MgCO_3 (27% Mg), Dolomit $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ (13% Mg), Carnallit $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (8% Mg) und Meereswasser, das ca. 0,13% Mg enthält [2].

2.1.1 Gewinnung von Magnesium

Die Gewinnung des reinen Magnesiums erfolgt auf zwei Arten. Durch die Elektrolyse des schmelzflüssigen Magnesiumchlorids (MgCl_2), oder durch die thermische Reduktion des Magnesiumoxids (MgO) [3]. In Abbildung 3 ist der Prozessablauf bei der Magnesiumherstellung durch Schmelzflusselektrolyse dargestellt.

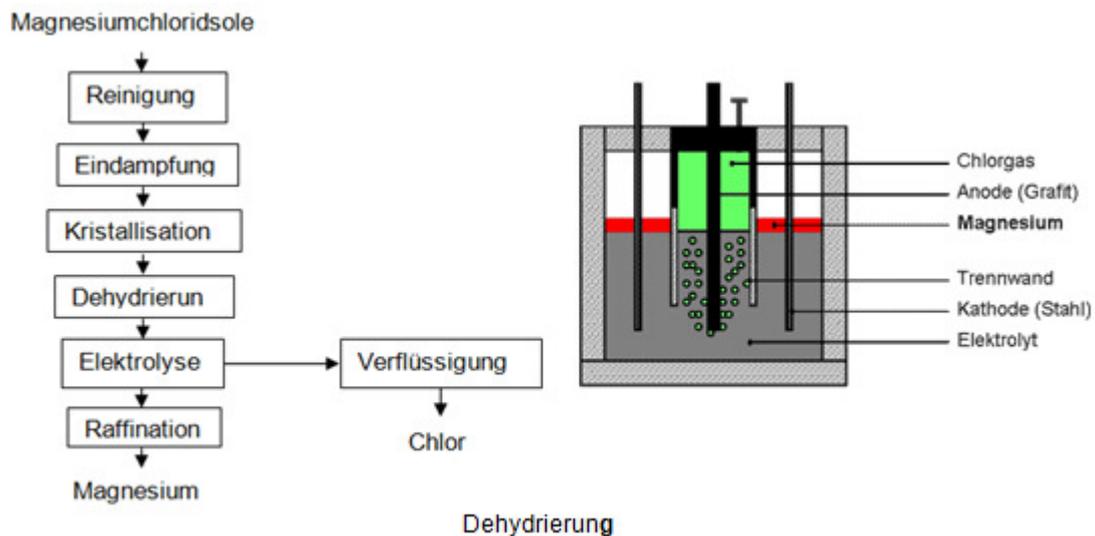


Abbildung 3: Vereinfachtes Fließbild der Magnesiumherstellung durch Schmelzflusselektrolyse [3]

2.1.2 Physikalische Eigenschaften von Magnesium

In Tabelle 1 sind die physikalischen Eigenschaften von Magnesium angegeben. Ein großer Vorteil von Magnesium ist seine geringe Dichte, wodurch sein Potenzial für den Einsatz als Konstruktionswerkstoff hoch ist. Aluminium und Stahl liegen mit ihrer Dichte von $2,7\text{g/cm}^3$ bzw. $7,8\text{g/cm}^3$ (Stahl) deutlich über der von Magnesium. Im Vergleich zu den anderen Konstruktionswerkstoffen ist der Wärmeausdehnungskoeffizient von Magnesium relativ groß.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von reinem Magnesium [4]

Eigenschaft		Einheit
Chemisches Symbol	Mg	
Hauptgruppe	II, Erdalkalimetalle	
Ordnungszahl	12	
Relative Atommasse	24,305	
Molare Masse	24,305	g/mol
Dichte	1,74	g/cm^3
Gitterstruktur	hcp	
E-Modul	44,8	GPa
Schubmodul	16,6	GPa
Schmelzpunkt	650	°C
Siedepunkt	1090	°C
Spezifische Wärmekapazität bei RT	1,025	kJ/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit	156	W/(m·K)
Wärmeausdehnungskoeffizient	$24,8 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
Viskosität der Schmelze	1,25	mPa·s
Elektrische Leitfähigkeit	22,6	$1/(\Omega \cdot \text{m})$

In Tabelle 2 werden die thermophysikalischen Kennwerte von Aluminium und Magnesium verglichen. Magnesium hat im Vergleich zu Aluminium ein wesentlich kleineres Intervall zwischen Schmelz- und Siedetemperatur. Dies beeinflusst den Schweißvorgang deutlich. Auf Grund ihrer dünnflüssigen Schmelzen haben Mg wie auch Al ein gutes Formfüllungsvermögen. Die geringe Viskosität des Magnesiums kann jedoch beim Schweißen zum Nahtdurchfall führen. Beim Aluminium ist dies auf Grund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit nicht so stark ausgeprägt [4].

Tabelle 2: Eigenschaftsvergleich Mg-Al [5]

Eigenschaften	Einheit	Mg	Al
Dichte	g / cm^3	1,74	2,7
Schmelztemperatur	°C	649	660
Elastizitätsmodul	MPa	45 000	66 600
Ausdehnungskoeffizient	$10^{-6}/\text{K}$	25	25
Zugfestigkeit ¹⁾	MPa	80 bis 180	40 bis 180
Bruchdehnung ¹⁾	%	1 bis 12	4 bis 50
¹⁾ abhängig vom Behandlungszustand			

2.1.3 Mg-Legierungen –Wirkung der Legierungselemente

Mg-Legierungen sind als Konstruktionswerkstoffe deutlich attraktiver als reines Magnesium, da Letzteres nur geringe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit hat. Die Tabelle 3 beschreibt die Bezeichnungen von Magnesiumlegierungen.

Tabelle 3: Legierungs- und Zustandsbezeichnungen von Mg-Legierungen [3]

Legierungselemente:	K -Zirkon	Zustand:
A -Aluminium	L -Lithium	F - Herstellungszustand
C -Kupfer	N -Nickel	O - weichgeglüht, rekristallisiert
E -Seltene Erden	M -Mangan	Hxx - kaltverfestigt (nur für Knetprodukte, das „H“ folgen stets weitere Ziffern zur genauen Kennzeichnung des Werkstoffzustandes
F -Eisen	S -Silizium	W - lösungsgeglüht
H -Thorium	Z -Zink	Txx - Wärmebehandelt
Beispiel: AZ 91 ↓ Aluminium ca. 9 % Zink ca. 1 %		
analog bedeuten AM60 – 6 % Al + < 1 % Mn AM50 – 5 % Al + < 1 % Mn AM20 – 2 % Al + < 1 % Mn AS41 – 4 % Al + > 1 % Si		

Die wichtigsten Legierungselemente für Magnesium sind Aluminium, Zink und Mangan. Durch das Zulegieren anderer Elemente sind unterschiedliche Eigenschaften erzielbar. Tabelle 4 zeigt die grobe Einteilung der Legierungselemente sowie ihre Auswirkung auf die Eigenschaften von Magnesiumlegierungen.

Tabelle 4: Legierungselemente zur Verbesserung der Eigenschaften von Mg-Legierungen [6]

zu verbessernde Eigenschaft	Legierungselemente
Festigkeit	Al, Li, Mn, Se, Si, Th, Zn
Härte	Al, Si
Warmfestigkeit	Ag(+Se), Ce
Dehnung, Duktilität, Verformbarkeit	Li, Zr, In
Kriechfestigkeit	Ag (zus. mit SE), Ca, SE, Se, Th
Schweißbeignung	Mn
Gießbarkeit	Al, Zn
Korrosionsbeständigkeit, -Oberflächenpassivierung -Volumen	Al, Be, Si, Ca, Y, Ge, Ga, P, Th Mn, Ca, Zn, Ce, V, Ti, Zr

Nachfolgend wird die Auswirkung der Hauptlegierungselemente der im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchten Magnesiumbleche AZ31, sowie der Schweißzusatzwerkstoffe AZ31X und AM50A beschrieben, Tabelle 5.

Tabelle 5: Wirkung der Hauptlegierungselemente in Magnesium [3]

Element	Wirkung
Aluminium	<p><i>Vorteilhaft:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - steigert die Festigkeit (Zugfestigkeit und Härte) durch Mischkristallbildung - Festigkeitssteigerung durch Ausscheidungen wirksam bis max. 120 °C - verbessert die Gießbarkeit infolge der Bildung eines Eutektikums bei $T_e=437\text{ °C}$ - begünstigt die Feinkornbildung - Oberflächenpassivierung - Verringert die hohe Kerbempfindlichkeit und die schlechte Zähigkeit von Reinformagium <p><i>Nachteilig:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bewirkt erhöhte Neigung zur Mikroporosität - Geringe Diffusionsgeschwindigkeiten
Zink	<p><i>Vorteilhaft:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Verbessert (wie Aluminium) die Gießbarkeit - Steigerung der Festigkeit (Schwing- und Zugfestigkeit), insbesondere ab 3% - Aushärtungseffekt - begünstigt die Feinkornbildung - steigert die Fluidität der Schmelze - unterstützt Bildung einer Deckschicht auf Mg-Schmelze <p><i>Nachteilig:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - erhöht Neigung zur Mikroporosität - ab 1,5-2,0% Zusatz verstärkte Tendenz zur Heißrissbildung - Korngröße nimmt zu
Mangan	<p><i>Vorteilhaft:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - gewisse Erhöhung der Zugfestigkeit ab 1,5% Mangan - Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch Kontrolle des Eisengehaltes - Kontrolle des Eisengehaltes durch Herabsetzung der Löslichkeit - Kornfeinungseffekt - Verbesserung der Tiefziehfähigkeit - Verbesserung der Kerbschlagzähigkeit - Verbesserung der Schweißneigung - Verbesserung der Kriechfestigkeit

Aus dem binären Phasenzustandsdiagramm Al-Mg in Abbildung 4 ist ersichtlich, dass ca. 3% Aluminium im Mg-Kristall vollständig gelöst werden können. Ein steigender Al-Anteil ist gekennzeichnet durch die Bildung der intermetallischen Phase $Mg_{17}Al_{12}$, die sich verfestigend auswirkt. Diese hat einen Schmelzpunkt von 462 °C. Bei 10 Gew.-% Al-Anteil kommt es zur Versprödung. Als mögliche Abhilfe ist die Zugabe von Lithium (4%) zu nennen. Dadurch wird die Bildung der intermetallischen Phase bis zum 10% Al vermieden [5].

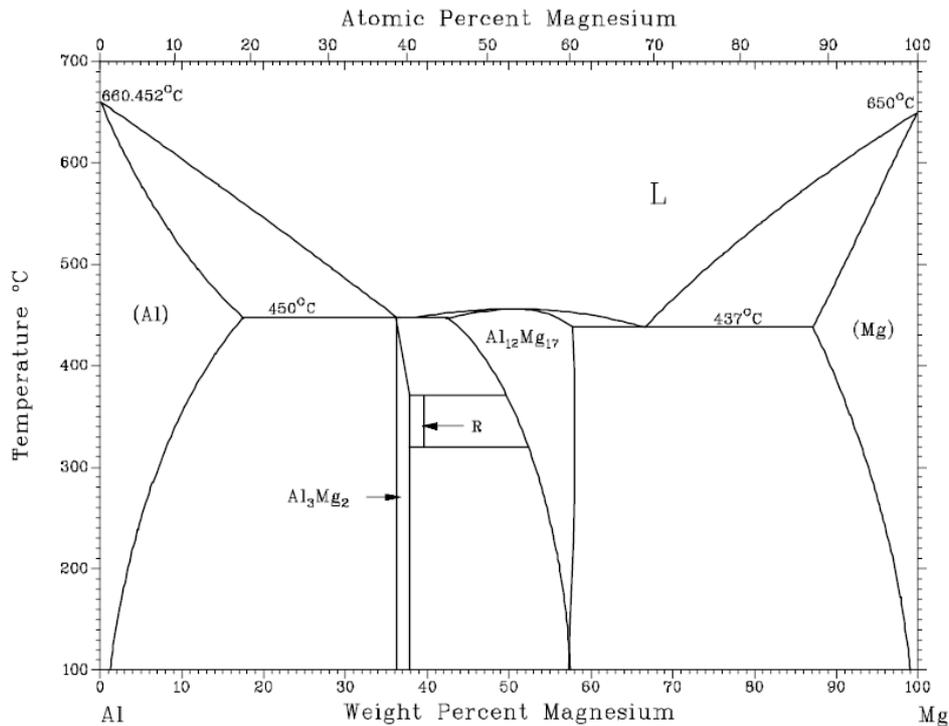


Abbildung 4: Binäres Phasenzustandsdiagramm Al-Mg [6]

2.1.4 Anwendungen von Mg-Legierungen im Automobilbau

Mg-Gussteile fanden ihren Einsatz in der Automobilindustrie schon in den 30er Jahren. Ein gutes Beispiel ist der VW Käfer, der seit 1939 produziert wird. Seit 1962 sind über 17kg Mg-Legierungen in Kurbelgehäusen, Lichtmaschinenarmen, Nockenwellenrädern, Getriebegehäusen und verschiedenen Deckeln im VW Käfer verbaut. In der Automobilindustrie finden aktuell Mg-Bauteile ihren Einsatz bei z.B.:

- Getriebegehäuse VW Passat, Audi A4
- Zylinderkopfhauben als Kaltkammer-Druckgußteil aus AZ91 HP
- Instrumententafeln Audi A8
- Sitzschalen und -rahmen
- Lenkräder Toyota Lexus, Celica, Carina und Corolla
- Autofelgen Porsche Carrera RS (AM70 HP)

Die oben angeführten Beispiele sind nur ein kleiner Teil der heutigen Anwendungen von Mg-Bauteilen und die Liste wird immer länger [2]. Abbildung 5 zeigt einige weitere Anwendungsbeispiele.

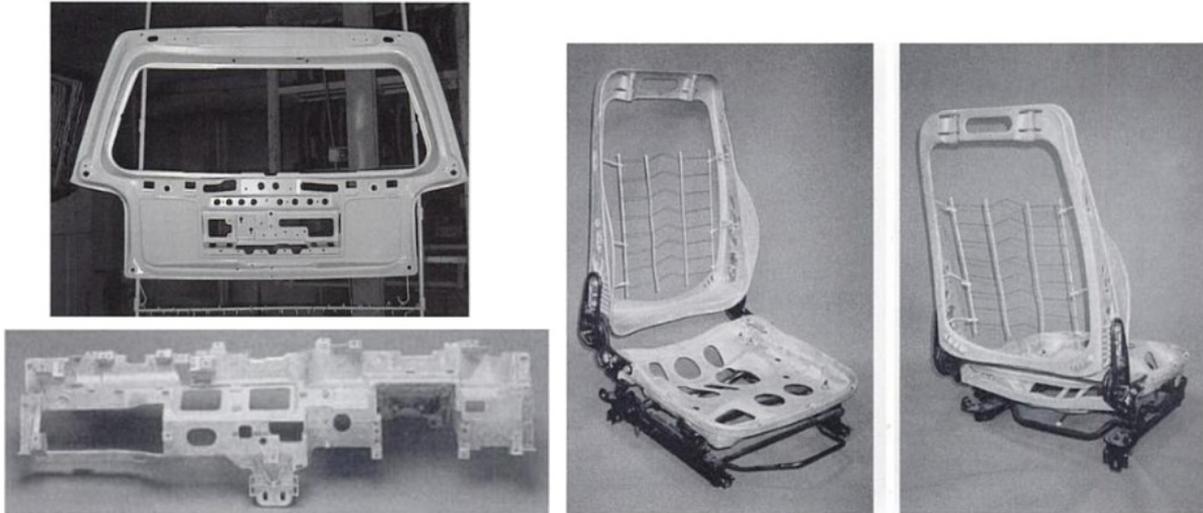


Abbildung 5: Einsatzbeispiele - Mg-Druckgußteile [2]

Magnesium wird aktuell in der Automobilindustrie z.B. für Antriebsstrang, das Getriebegehäuse, Teile im Lenkungssystem, das Fahrgestell, die Bremsen und für Innenstrukturen eingesetzt, aber nur in Form von Gussteilen.

Mögliche Vorteile des Einsatzes von Magnesium in Form von Flachprodukten wären:

- bessere und gleichmäßigere Eigenschaften im Vergleich zum Guss
- Herstellbarkeit von großflächigen und dünnen Teilen/ Gewichts- und Preisvorteile
- verbesserte Prüfbarkeit und Korrosionsschutz durch Vorbeschichtung des Band- oder Blechproduktes

Jedoch stellt sich die Frage, ob Mg-Bleche in der Automobilindustrie prinzipiell einsetzbar sind und ob sie die Anforderungen, wie z.B. hohe Steifigkeit, gute Korrosionsbeständigkeit, artgleiche sowie artfremde Fügbarkeit usw. erfüllen. In Tabelle 6 sind die dichtebezogenen, mechanischen Eigenschaften von Stahl, Aluminium und Magnesium gegenübergestellt [7].

Tabelle 6: Dichtebezogene Leichtgewichts-Werte (bezogen auf Stahl) [9]

Eigenschaft	Kriterium	Stahl	Al (höherfest)	Mg
Plattenbiegefestigkeit	$\sqrt[3]{E/\rho}$	1	2	2,7
Beulsteifigkeit	$\sqrt{E/\rho}$	1	1,7	2,1
Zug-/ Drucksteifigkeit	E/ρ	1	1	1
Torsions-Steifigkeit	G/ρ ¹⁾	1	1	1
	$\sqrt[3]{G/\rho}$ ²⁾	1	2	2,7
Zug-/Druckfestigkeit	Rp/ρ	1	1,1	1,1
Beulfestigkeit	$\sqrt{Rp/\rho}$	1	1,8	2,3
Crash (Biegung)	Rm/ρ	1	1,2	1,1
Crash (Faltenbeulen)	$\sqrt[5]{E^3/Rp/\rho}$	1	1,7	2,1

¹⁾geschlossenes Profil

²⁾offenes Profil

Die wichtigsten Vorteile bei Einsatz von Mg-Legierungen sind also die hohe dichtebezogene Biege-, Beul- und Torsionssteifigkeit, die Beulfestigkeit sowie das Crash-Verhalten (Faltenbeulen, Biegung). Der Einsatz von Mg-Legierungen für die Außenhaut stellt noch eine große Herausforderung dar. Zusätzliche Gewichtsreduzierung im Automobilbau könnte erzielt werden, wenn Mg-Legierungen für Türen, Hauben und Heckklappen eingesetzt werden. Dies könnte durch die vergleichsweise schlechte Kaltumformbarkeit und die geringe Korrosionsbeständigkeit begrenzt werden. Erstere kann etwa durch den Einsatz temperierter

Werkzeuge deutlich gesteigert werden, womit sich relativ komplexe Modelle herstellen lassen, Abbildung 6.



Abbildung 6: Pressteil aus MgF DDQ(Deep-Draw Quality) [7]

Die hergestellten Teile aus MgF DDQ 130 weisen ähnliche mechanische Eigenschaften wie das Ausgangshalbzeug auf. Die Abbildung 7 zeigt eine Türinnenverstärkung, die mit einem Innenhochdruckverfahren bei einer Umformtemperatur 400 °C hergestellt wurde [7].

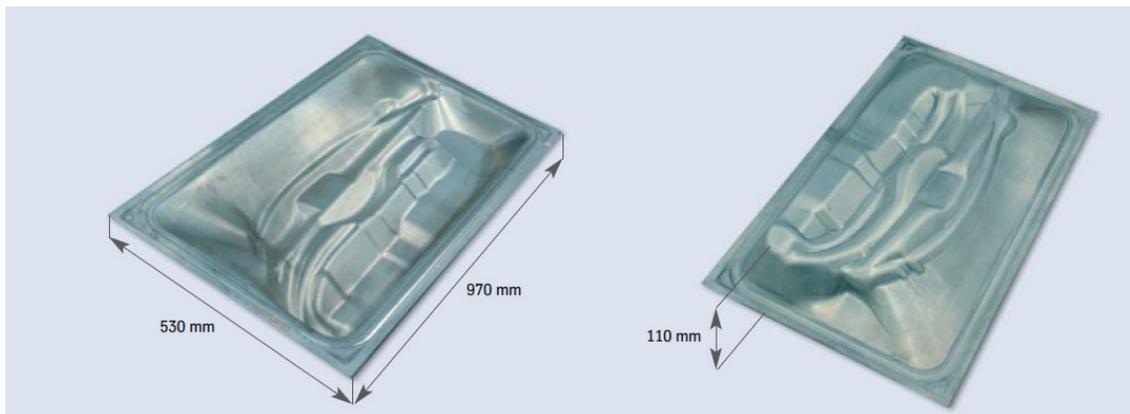


Abbildung 7: Türinnenverstärkung aus MgF DDQ, Blechdicke 3mm [7]

2.1.5 Herstellung von Mg-Knetlegierungen

Die Umformung von Mg-Legierungen ist im starken Maß von der Umformtemperatur abhängig. Magnesium besitzt eine hexagonale Gitterstruktur und eignet sich daher schlecht zur Kaltumformung. Die Formänderungsfähigkeit wird aber oberhalb von 225°C wesentlich erhöht. Im Vergleich zu Gusslegierungen weisen die Knetlegierungen bessere Verformbarkeit auf. Derzeit werden durch Walzen Bleche aus Mg-Legierungen in den USA, Großbritannien, Russland, Kanada und in der Schweiz hergestellt. Die am häufigsten hergestellte Legierung ist AZ31B-O. Dies ist eine „high purity“ Legierung, deren Eisen-, Kupfer- und Nickelgehalt auf Grund der Korrosionsbeständigkeit begrenzt ist.

2.1.5.1 Kaltwalzverfahren

Magnesium ist wegen seiner Kristallstruktur schlecht kaltverformbar und deswegen auch schlecht zum Kaltwalzen geeignet. In Abbildung 8 ist die Oberfläche eines kaltgewalzten AZ31 Mg-Blech dargestellt. Obwohl die Walzung mit einer Dickenabnahme je Walzstich von nur 10% erfolgte ist die Rissbildung an der Oberfläche ganz deutlich.

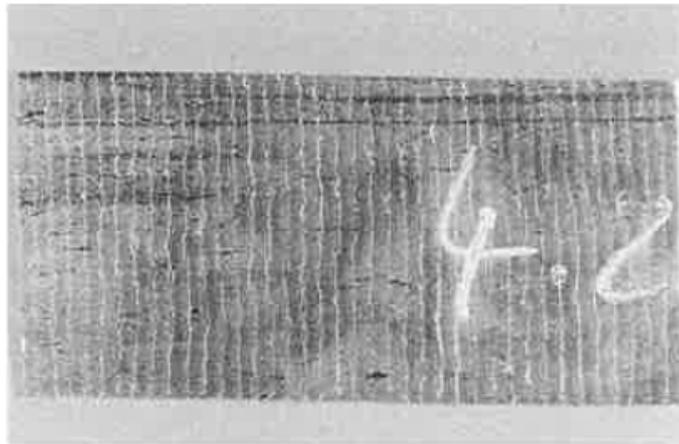


Abbildung 8: Rissbildung beim Kaltwalzen von AZ31 ohne Vorwärmung [3]

Das empfohlene Verhältnis Walzendurchmesser D zu Ausgangsdicke h liegt bei ca. 50 und die Stichabnahmen bei etwa 2%. Das Walzen mit größeren Stichabnahmen und ohne Zwischenglühung kann als Kaltwalzen bei Temperaturen bis 225°C durchgeführt werden. Die Erwärmung der Walzen durch Infrarotstrahler, Plattenheizkörper, Brennern oder mit Dampf ist erforderlich, um die Oberflächenunterkühlung zu vermeiden. Schmierung erfolgt in der Wirkfüge des Walzspaltes durch kolloidalen Graphit oder Ölemulsionen [3].

2.1.5.2 Warmwalzverfahren

Die Reversierwalzwerke in Duo- oder Quattroausführung mit einem Walzendurchmesser von 600-900mm eignen sich gut für das Warmwalzen. Die Walzen müssen auf ca. 100°C vorgewärmt werden. Um die Temperatur der Walzen konstant zu halten, ist die Ausführung mit einer elektrischen Innenbeheizung noch besser. Da Mg-Legierungen leicht ankleben, werden die Walzen mit Petroleum gespült. Alternativ dazu wäre die Schmierung mit Mittel, die kollidale Graphit oder Molybdänsulfid enthalten anzuwenden. Bestimmend für ein erfolgreiches Walzen von Blechen ist die Temperaturführung [3].

2.1.5.3 Herstellung von Magnesiumblechen - Gießwalzkonzept

Die neuen Konzepte für die Produktion der Magnesiumbleche haben als Ziel, die Anwendung von Magnesium technologisch und wirtschaftlich zu optimieren. Die Gießwalztechnologie für Magnesiumband und -blech ermöglicht ein endabmessungsnahes Gießen (Abbildung 9) und bringt folgende metallurgische Vorteile:

- rasche Erstarrung,
- reduzierte Seigerungen,
- In-Line-Bandbehandlung und
- kurzes Anlagenlayout.

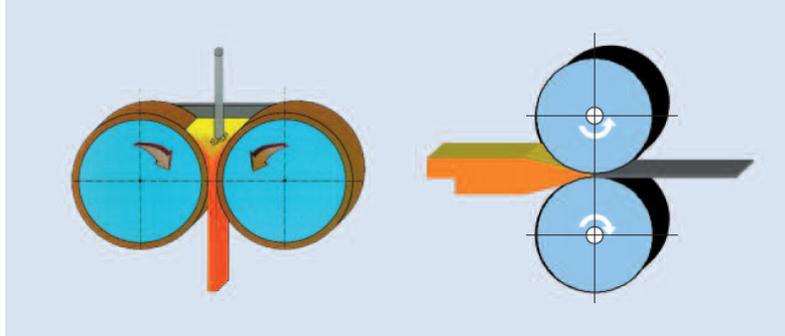


Abbildung 9: Endabmessungsnahes Gießwalzen [7]

Leichtmetalle wie Aluminium und Magnesium weisen in der horizontalen Gießtechnik gegenüber vertikalem Gießen folgende Vorteile auf:

- Schmelzsumpf und Wärmehaushalt sind horizontal leichter zu kontrollieren
- das Gleichgewicht zwischen dem Ausfließen der Schmelze aus der Düse und der Walzkraftbeschränkung ist besser zu halten
- Seitenabdichtung und Breitenvariation sind einfacher zu gestalten
- die Bandumlenkung ist leichter zu bewerkstelligen

Vertikales Gießen wird als die geeignete Methode zur Herstellung von Bändern angeboten. Bei diesem Verfahren wird für die Produktion Rohmaterial in Form von Masseln anstelle von Stranggussmaterial verwendet. Dadurch können Fertigungsschritte eingespart und die Wirtschaftlichkeit erhöht werden, Abbildung 10.

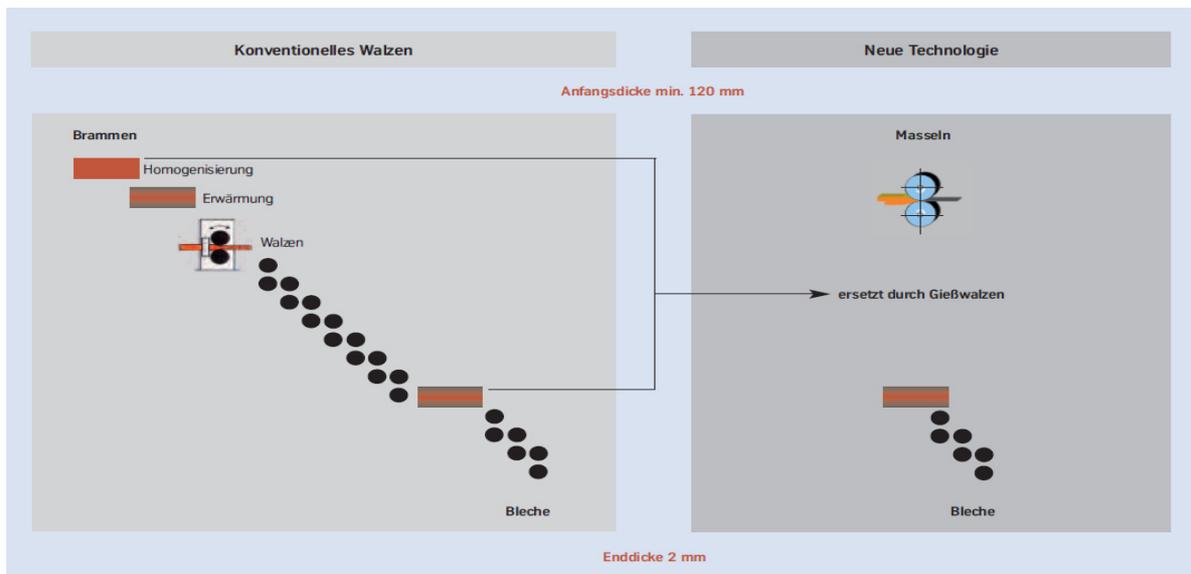


Abbildung 10: Vergleich konventionelles Walzen und Gießwalzen von Mg-Blechen [7]

Weiters bringt die Herstellung von Bändern bzw. Coils wirtschaftliche und qualitative Vorteile im Vergleich zur Einzelfertigung. Eine Pilotgießwalzanlage, mit allen für das Gießen und Schmelzen nötigen Anlagenteilen wurde von der Firma MgF (ThyssenKrupp) GmbH entwickelt.

Die Pilotgießwalzanlage besteht aus zwei Komplexen. Der erste ermöglicht die Herstellung von Vorbändern mit einer Dicke von 3,5 bis 7mm und einer Breite von maximal 780mm. Im zweiten Komplex werden die Gießvorbänder in einem Quarto-Walzgerüst auf Enddicken bis minimal 0,5mm fertiggewalzt. Aktuell können Magnesiumbänder mit einem Gewicht bis 1500kg und Dicken bis minimal 2,0mm mit gleichmäßiger Oberfläche und hervorragenden Werkstoffeigenschaften hergestellt werden [8].

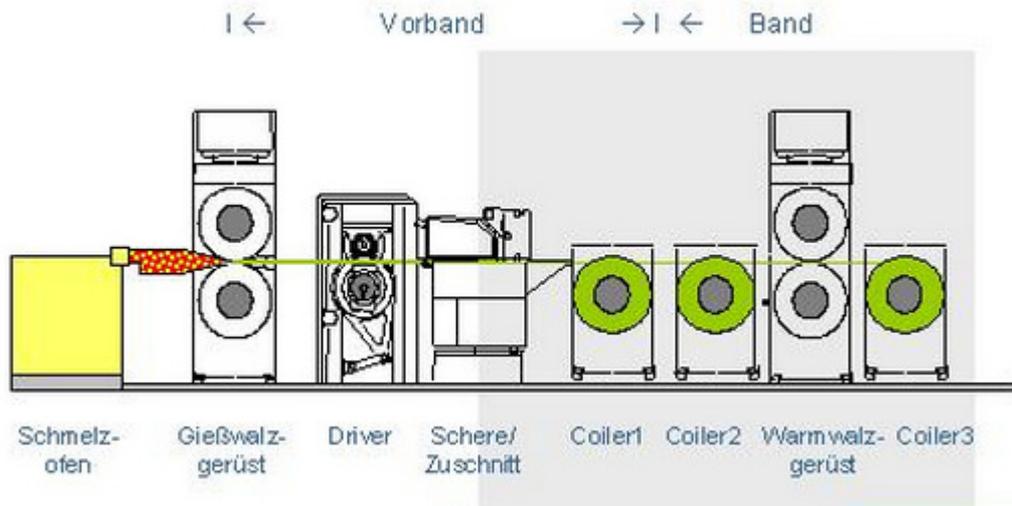


Abbildung 11: Gießwalzanlage (schematisch) [8]

Durch die Gießwalz-Technologie, die auch verschiedene Wärme- und Oberflächenbehandlungen einschließen kann, ergeben sich die folgenden wirtschaftlichen und technischen Vorteile:

Wirtschaftliche Vorteile

Technische Vorteile

Einsparung von Fertigungsschritten	verbesserte Eigenschaften durch schnelle Erstarrung
Reduzierung der Herstellungskosten	bessere Homogenität
Verkürzung der Prozessdauer	feinere Mikrostruktur
Band-/Coil-Herstellung ist möglich	Verringerung von Seigerungen
Einsparung von Investitionskosten	Verfeinerung von Ausscheidungen

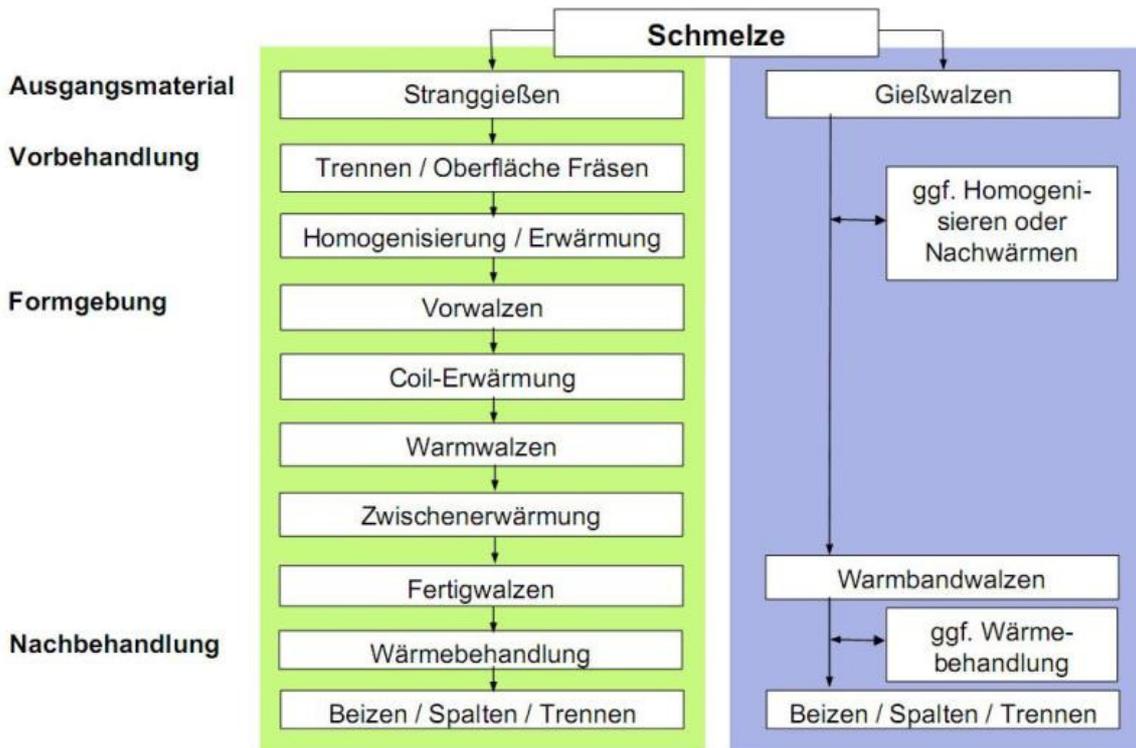


Abbildung 12: Vergleich Gießwalztechnologie mit konventioneller Bandherstellung [8]

Im Vergleich zu den herkömmlichen Fertigungsverfahren weisen die mit Gießwalzen hergestellten Bleche eine geringere Korngröße auf. Durch die Optimierung von Prozessparametern lässt sich die Fertigung weiter verbessern. Durch die gezielte Abkühlung im Rollenspalt kann man die Gefügeausbildung beeinflussen. Bei Zugversuchen am gießgewalzten Blechen wurde gezeigt, dass eine Verfestigung von bis zu 20% auftritt, Tabelle 7. Bei den Crash-relevanten Komponenten ist diese Eigenschaft von Bedeutung [7].

Tabelle 7: Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die Eigenschaften von MgF DDQ-Blech [9]

Dehngeschwindigkeit (1/s)	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (%)	E_{\max} (J)
1	271	16	15
10	272	18	16
100	311	16	18
500	326	17	22

2.1.6 Herstellung von Mg-Druckguss

Durch die Entwicklung von high-purity-Legierungen - zeichnen sich durch strenge Gehaltslimits für Eisen, Nickel und Kupfer ($Fe < 0.005\%$, $Ni < 0.001\%$, $Cu < 0.015\%$) aus - hat sich der Einsatz von Mg in der Automobilindustrie stark erhöht. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind AM20 HP, AM50 HP und AM60 HP mit verbesserter Bruchdehnung. Im Vergleich zu Aluminium und Zink weist Mg ein gutes Fließverhalten auf. Aus diesem Grund ergibt sich die Möglichkeit dünnwandige Teile herzustellen. Druckgussteile werden mit dem Kalt- oder Warmkammer-Verfahren hergestellt. Die Warmkammer-Druckgussmaschine besteht aus Warmhalteofen, Gießkammer und Saugrohr, Abbildung 13. Mit diesem Verfahren sind nur wenige Zn- und Mg-Legierungen vergießbar (etwa sind Sn- und Pb-Legierungen gut vergießbar).

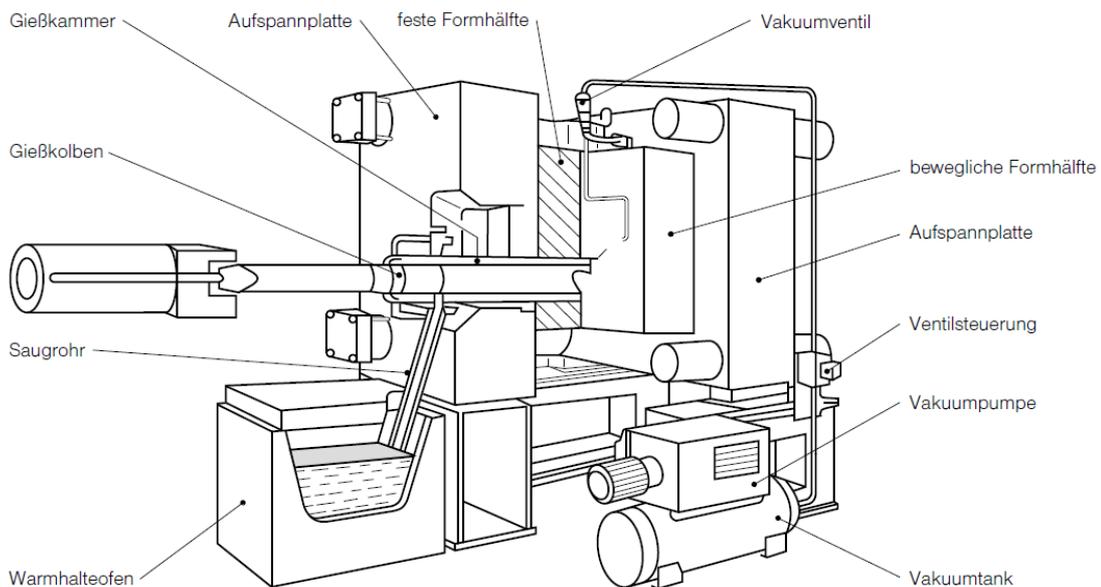


Abbildung 13: Warmkammer - Druckgussmaschine [9]

Kaltkammerverfahren sind zum Vergießen von Al- und Mg-Legierungen besonders geeignet. Gründe dafür sind die kurzen Verweilzeiten und die dadurch geringe Eisenaufnahme. Dabei wird der erste Teil der Schmelze, der mit der Luft schon reagiert hat (Oxidbildung), in eine Überlaufbohle hinausgedrückt und dort aufgefangen. Nach der Abkühlung wird der dort erstarrte Teil vom Gussstück entfernt, sodass nur noch der Gießgrat durch Oberflächenverarbeitung entfernt werden muss. Die Eisenaufnahme wirkt sich schädlich bzw. qualitätsmindernd aus. Die Druckmaschine und der Warmhalteofen mit dem Schöpftiegel sind stets voneinander getrennt, Abbildung 14. Die auf die Schmelze ausgeübten Drücke liegen zwischen 70 und 1000bar. Beim Gießen von Leichtmetallen ist eine Vorwärmung von 200-260°C erforderlich und die Form sollte bei möglichst hohen Temperaturen, aber kleinen Temperaturintervallen bzw. möglichst konstanter Temperatur gehalten werden. Dies erfolgt durch geeignete Kühlsysteme.

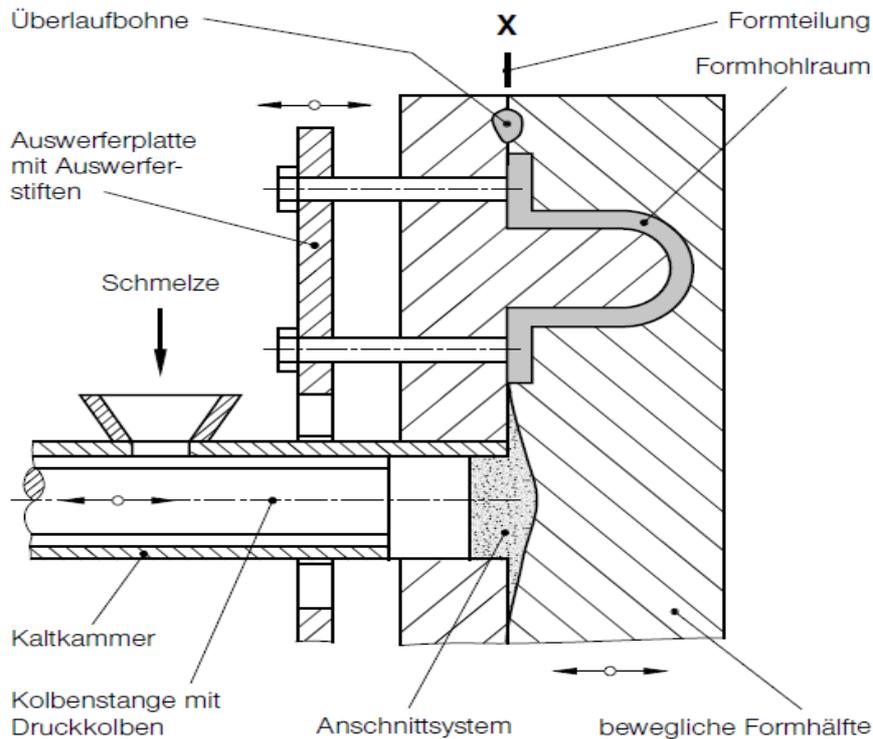


Abbildung 14: Waagrechte Kaltkammer - Druckgussmaschine [9]

Mg-Gusslegierungen AZ91, AZ81 und AM60 haben die größte Bedeutung und werden am häufigsten in der Automobilindustrie eingesetzt. Die Vorteile dieser Legierungen sind das gute Fließvermögen, gute Abbildungsgenauigkeit und Oberflächengüte sowie ein geringer Kokillenverschleiß. Diesen Vorteilen stehen jedoch einige Nachteile gegenüber. Bei AZ-Legierungen ist es die Neigung zur Mikroporosität, die beim Druckguss unter der Oberfläche entsteht. Diese Legierungen sind für die Anwendung bei Temperaturen über 200°C wegen der geringen Kriechbeständigkeit nicht geeignet. Das Kriechen wird durch das Erweichen der intermetallischen Phase $Mg_{17}Al_{12}$ hervorgerufen. Durch die Zugabe von Mangan wird die Korrosionsbeständigkeit von Mg-Legierungen verbessert. Jedoch hat Mangan auch nachteilige Auswirkung auf Grund Bildung der intermetallischen Phase $MnAl$, wodurch die Zerspanbarkeit der Legierung sinkt. Die wichtigsten Vertreter der AM-Legierungen sind AM50 und AM60, die gut gießbar sind und eine hohe Duktilität aufweisen [10].

Das Druckgussverfahren ist das wichtigste Formguss-Verfahren. Dabei wird flüssiges Material unter hohem Druck und hoher Geschwindigkeit in Dauerformen gepresst. Bedingt durch den hohen Druck ist eine sehr hohe Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität erzielbar. Die hohe Wirtschaftlichkeit ergibt aus den kurzen Gießzyklen. Durch hohe Stückzahlen in der Serienproduktion werden die hohen Maschinen- und Werkzeugkosten ausgeglichen. Zunächst werden die Trennstoffe eingesetzt, um das Ankleben des Materials an der Formwand zu verhindern. Bei der Berührung mit Schmelze kommt es zur Zersetzung der Trennstoffe. Dabei wird Wasserstoff, der in flüssigem Magnesium hohe Löslichkeit hat, aufgenommen, was sich später beim Schweißen bzw. Wärmebehandeln durch Porenbildung negativ auswirken kann. Es sollten genügend Entlüftungskanäle vorgesehen werden, um den Gasen das Entweichen zu ermöglichen.

Beim Vakuum-Druckguss-Verfahren wird die Schmelze über ein Saugrohr in die Gießkammer transportiert und damit die Herstellung poren- und oxidarmer Werkstoffe ermöglicht. Da der Prozess in Vakuum abläuft, kann der Gießdruck gesenkt und die Strömungsgeschwindigkeit erhöht werden.

Beim Gießen von Magnesium müssen die Schutzgase dem Gießofen zugeführt werden, weil das Material leicht oxidiert und entflammbar ist. Dazu wird ein Gasgemisch aus trockener Luft mit 0,1-0,5% Schwefelhexafluorid SF_6 verwendet. Da SF_6 jedoch ein starkes Treibhausgas ist, wird dessen Verwendung möglichst beschränkt. Eine Alternative dazu ist Schwefeldioxid SO_2 [4].

2.2 Porenbildung in Gusswerkstoffen

Es gibt zwei mögliche Ursachen für die Porenbildung in Gusswerkstoffen:

1. Bei dem turbulenten Gießvorgang kann Luft ins Material eingewirbelt werden.
2. Einige Gase sind im flüssigen Gusszustand gelöst und setzen sich frei, wenn sich die Löslichkeit der Schmelze bei der Erstarrung sprunghaft verringert.

Bei Temperaturen von ca. 800°C kann Magnesium Wasserstoff bis zu 60ppm lösen. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand (650°C) sinkt die Löslichkeit von 40 auf 24ppm, Abbildung 15.

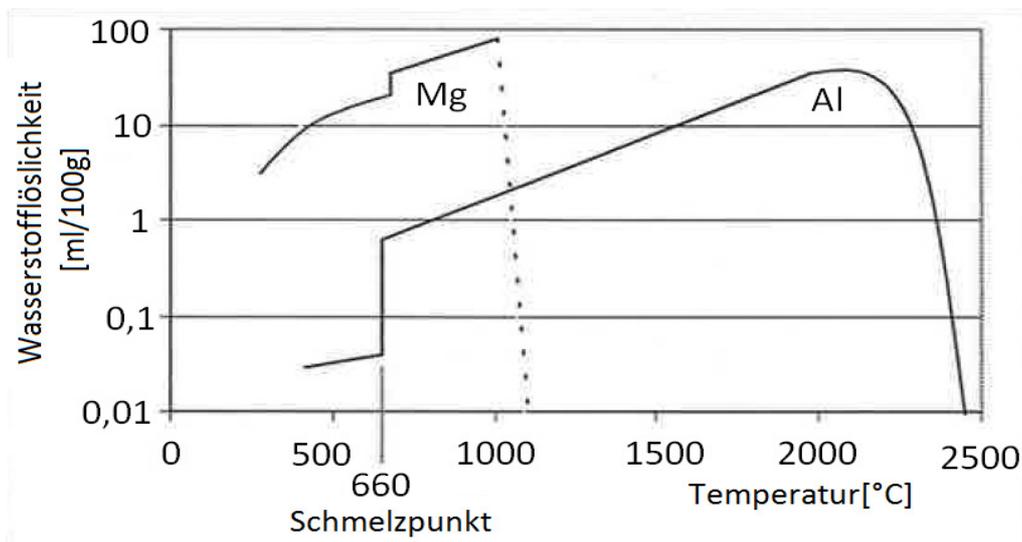


Abbildung 15: Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium und Magnesium [4]

Bei Raumtemperatur unterscheidet sich die Wasserstofflöslichkeit beim Magnesium- und Aluminiumdruckguss wesentlich. Der hohe Wasserstoffgehalt bleibt im Aluminium zwangsgelöst. Magnesium hingegen besitzt die Fähigkeit bis 7,7 Gew.-% Wasserstoff, durch die Entstehung von Magnesium-Hydrid, zu lösen.

Da der typische Wasserstoffgehalt in Mg-Gussteilen ca. 20ppm beträgt und damit unterhalb der Löslichkeit im Erstarrungspunkt liegt, ist es prinzipiell möglich porenfreien Mg-Druckguss herzustellen. Damit wäre auch porenfreies Schweißen möglich. In Wirklichkeit ist dies aber nicht der Fall. Durch die Wärmeleitung von der Schweißwärmequelle auf umgebendes Material ist ein hoher Temperaturgradient vorhanden. Da die Wasserstofflöslichkeit stark von der Temperatur abhängt, bleibt der Wasserstoff nicht fein verteilt, sondern in Bereichen mit höheren Temperaturen konzentriert. Daher erstarren während der Abkühlung zuerst die wasserstoffarmen („kalten“) Schmelzbereiche. Die „heißen“ Schmelzbereiche können dem erstarrten Material, wegen seiner geringeren Diffusionsgeschwindigkeit, den vorher gesammelten Wasserstoff nicht zurückgeben. Sollte der Wasserstoffgehalt durch diesen Mechanismus höher als die Löslichkeit des erstarrenden Materials sein, entstehen Poren in diesen Bereichen. Aluminium weist eine sprunghafte Änderung der Wasserstofflöslichkeit am Übergang Schmelze-Kristall auf, was bei Magnesium nicht der Fall ist, siehe Abbildung 4 (S. 6). Falls die Schmelze beim Schweißen von Aluminium schneller erstarrt als der Wasserstoff entweichen kann, kommt es zur Porenbildung.

Der Effekt der Volumenkontraktion und der Luftturbulenzen kann durch konstruktive Maßnahmen beim Druckgussprozess herabgesetzt werden. Das Hauptproblem ist der Gasgehalt in der Schmelze, der während des Gießvorganges, bedingt durch die Zersetzung des Trennungsmittels, hineinkommt.

2.2.1 Thixomoulding

Bei diesem Verfahren wird Mg-Granulat in die Schnecke eingebracht, wo bis in den Schneckenorraum weiter gefördert wird. Gleichzeitig wird das Granulat auch erwärmt. Danach wird die teigige Masse mit hoher Geschwindigkeit mit Hilfe einer Hydraulikanlage in die Kavität eingepresst, Abbildung 16.

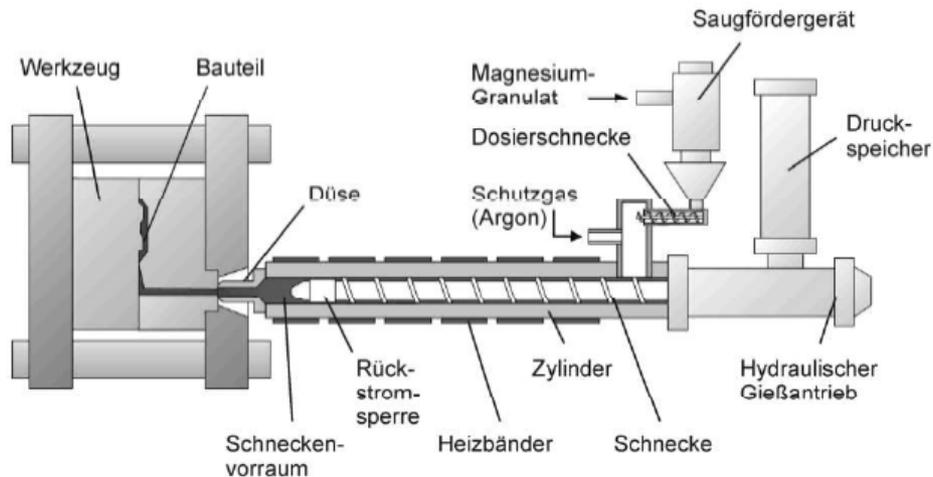


Abbildung 16: Schematischer Aufbau einer Thixospritzgießanlage (Thixomoulding) [11]

Die Verarbeitungstemperatur liegt um bis zu 100°C niedriger als beim Druckgießen, Abbildung 17. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist auch die geringere Werkzeugbelastung. Durch die ständige Scherung nimmt die Viskosität des teilflüssigen Materials ab. Dieser Effekt wird Thixotropie genannt [11].

Bei dem Verfahren ist es natürlich erforderlich, dass das Material ein thixotropes Verhalten (wie z.B. AZ91) aufweist: Die Körner werden nicht dendritisch, sondern rund und kompakt ausgebildet. Erreicht wird dies durch das Rühren des erstarrten oder aufgeschmolzenen Gussmaterials [4].

Das Thixomolding (Thixospritzgießen) hat demnach das Potenzial eines der wichtigsten Fertigungsverfahren für Mg-Legierungen zu werden.

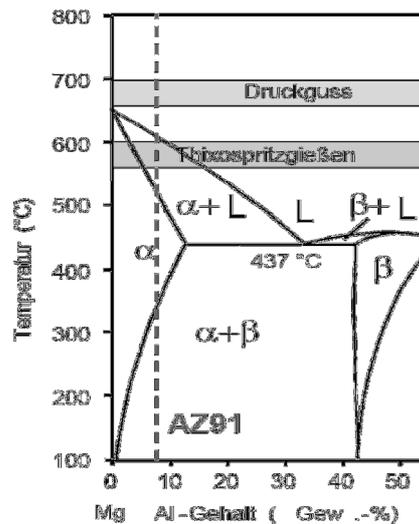


Abbildung 17: Zustandsdiagramm des Systems Mg-Al [11]

2.3 Korrosionseigenschaften von Mg-Legierungen

Die Korrosionsbeständigkeit wird von vielen Faktoren beeinflusst. So können sich Legierungselemente oder Verunreinigungen sowohl positiv als auch negativ auswirken. Eisen-, Kupfer- oder Nickel- Ausscheidungen bilden die Ablagerungen, die gegenüber dem Grundwerkstoff kathodisch sind und erhöhen damit die Korrosionsgeschwindigkeit. Fe-Ausscheidungen können durch den Zusatz von Mn neutralisiert werden. Das Verhältnis Fe/Mn soll dabei kleiner als 0,033 sein. Aluminium verringert die Korrosionsgeschwindigkeit durch die Bildung der intermetallischen Phase $Mg_{17}Al_{12}$ und die Beständigkeit nimmt mit steigendem Al-Gehalt zu. Die Druckgusstechnik kann ebenso die Korrosionseigenschaften beeinflussen [12].

2.3.1 Galvanische Korrosion

Das Standardpotenzial von -2,37V zeigt, dass Magnesium ein sehr unedles Metall ist, Abbildung 18.

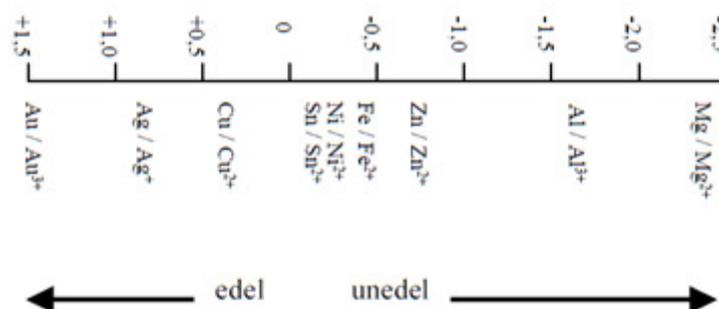


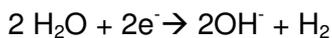
Abbildung 18: Standardpotenziale in (V) einiger reiner Metalle [5]

Daher sind Mg-Legierungen beim Kontakt mit anderen Metallen für galvanische Korrosion extrem anfällig. Die Werkstoffkombinationen (korrosionsbeständiger) Stahl/Magnesium oder Aluminium/Magnesium sind daher in stark korrodierender Atmosphäre nicht zulässig, wenn beide Fügepartner unbeschichtet sind [12].

2.3.2 Korrosion an Atmosphäre und in Salzlösungen

Die atmosphärische Korrosionsbeständigkeit ist stark von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig. Bei Luftfeuchtigkeiten unter 90% zeigen Mg-Legierungen geringe Korrosionsneigung - ein dünner, schützender Film aus amorphem $Mg(OH)_2$ wird gebildet. In wässrigen Lösungen, bei pH über 10,5 ist Magnesium, dank dem stabilen $Mg(OH)_2$ -Film sehr korrosionsbeständig. In neutraler wässriger Lösung kann die Anwesenheit von Chloridionen zum lokalen Durchbrechen der schützenden Oberfläche und zu Lochfraßkorrosion führen.

In Wasser und an Luft kommt es zur Bildung einer passivierenden $Mg(OH)_2$ Schicht an der Oberfläche, nach den folgenden chemischen Reaktionen.



Das Pourbaix-Diagramm in Abbildung 19 zeigt, dass die Passivität (engl. *passivation*) in wässrigen Lösungen im basischen Bereich erhalten bleibt.

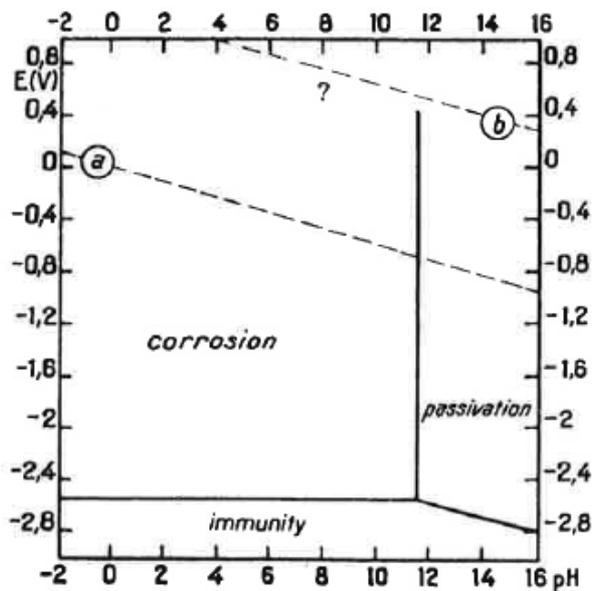


Abbildung 19: Pourbaix-Diagramm Magnesium (Korrosions-, Immunitäts- und Passivitätsbereich) [13]

In salzhaltigen wässrigen Lösungen kommt es zur Auflösung der Passivschicht $Mg(OH)_2$ nach folgender chemischer Reaktion:



In einem am IWS TU Graz durchgeführten Salzsprühnebeltest mit 5% NaCl-Lösung mit AZ31 Blechen wurden starke Lochfraßkorrosion und sehr hohe Korrosionsabtragsraten an ungeschliffenen AZ31 Blechen festgestellt. Geschliffene AZ31 Bleche zeigten hingegen deutlich geringere Abtragsraten (ca. 3mm/Jahr).

Das wirkliche Korrosionspotenzial von Magnesium unterscheidet sich vom theoretischen auf Grund der Bildung der Passivierschicht $Mg(OH)_2$. Obwohl diese nicht so dicht wie jene von Aluminium oder korrosionsbeständigen Stahl ist, bietet sie einen guten Schutz an Luft. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, liegt das Korrosionspotenzial von Mg in einer 3-6% NaCl-Lösung bei -1,73V.

Tabelle 8: Freies Korrosionspotenzial in 3-6%-iger NaCl-Lösung [7]

Metall	Potenzial (V_{SCE})
Mg	-1,73
verzinkter Stahl	-1,14
Al (99,99%)	-0,85
AlSi12	-0,83
Gußeisen	-0,73
rostfreier Chromstahl, aktiv	-0,43
rostfreier Chromstahl, passiv	-0,13

Um die Korrosion von Mg-Legierungen zu vermeiden bzw. zu minimieren werden derzeit folgende Maßnahmen vorgenommen:

- Verbesserung der Reinheit,
- Zusatz ausgewählter Legierungselemente (z.B. Mn) und
- Oberflächenbehandlung (schleifen und beschichten).

Weiters kann bei Mg und Mg-Legierungen je nach Bedingungen und einwirkenden Medien auch noch Spannungsrisskorrosion auftreten.

2.3.3 Korrosionsschutz

Die Korrosionsneigung von Mg-Legierungen wird stark vom Gehalt an Verunreinigungen beeinflusst. Die Seltenen Erden haben ähnliches Standardpotenzial wie Mg. Durch deren Zugabe wird daher dessen Korrosionsverhalten verbessert. Der Ablauf des Gießprozesses muss sorgfältig erfolgen, sonst gelangen die Verunreinigungen an die Werkstoffoberfläche und die Korrosionsbeständigkeit sinkt. Eine weitere Maßnahme um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern ist die Oberflächenbehandlung [13]. Beispielsweise kann die Oberfläche anodisiert oder die chemische Schichten aufgebracht werden. Weitere Möglichkeiten sind: Ionenimplantation, Laserbearbeitung, Lackieren und Plattieren [5].

Am Markt hat sich auch das Magoxid-Coat-Verfahren, ein anodisches Verfahren im Elektrolyten weit verbreitet, Abbildung 20.

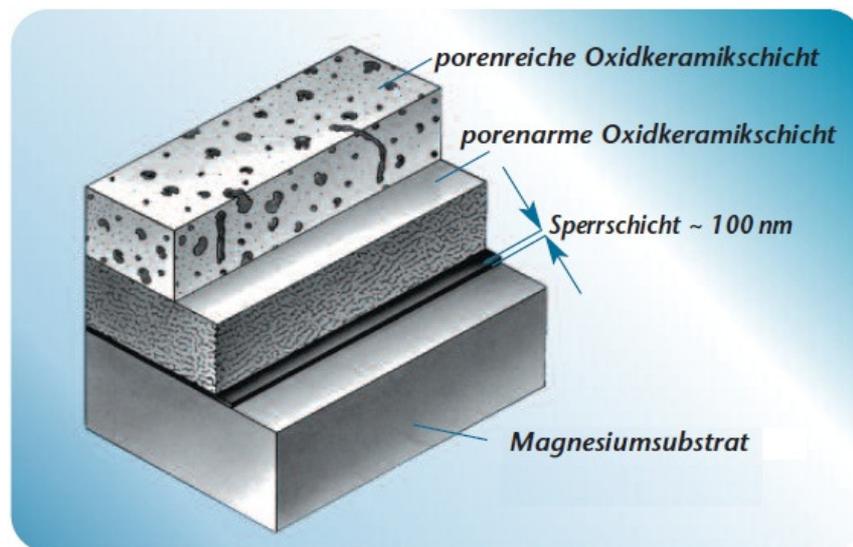


Abbildung 20: Aufbau der Magoxid-Coat-Schicht [14]

Hierbei wird die Oxidschicht durch Ladungsträger zerstört und anschließend kommt es zum Ladungsaustausch und Diffusion von Metallionen. Die Wärme, die dabei freigesetzt wird führt zur Gasentladungen auf der Mg-Oberfläche im Elektrolyten. Die Oxidschicht wird aus 2 Teilschichten gebildet. Die erste, porenarme Schicht durch die Korrosion verhindert wird und die zweite, porenreiche Schicht, die als Haftgrund dienen kann. Dadurch werden auch die Isolationswirkung und die Verschleißbeständigkeit verbessert [3].

2.4 Fügen

Dieses Kapitel beschreibt die angewendete Fügeverfahren und die Mg- und Al-Legierungen, die in der vorliegenden Diplomarbeit untersucht wurden.

Das Schweißen von Magnesium wird erstmals 1924 erwähnt. Damals konnte man Mg nur mit Gasschmelz- und Widerstandspunktschweißen thermisch fügen. Heute sind Mg-Werkstoffe mit allen herkömmlichen Prozessen ffügbar.

2.4.1 MIG-Schweißverfahren

Bei diesem Schweißverfahren brennt der Lichtbogen zwischen einer abschmelzende Drahtelektrode (i.A. positiv gepolt, Anode) und dem Werkstück (Kathode). Der Lichtbogen wird durch das Schutzgas – beim MIG-Schweißen durch inerte Gase wie Argon, Helium oder deren Gemische - geschützt, wobei die glockenförmige Schutzgashülle die Schweißstelle abschirmt, Abbildung 21.

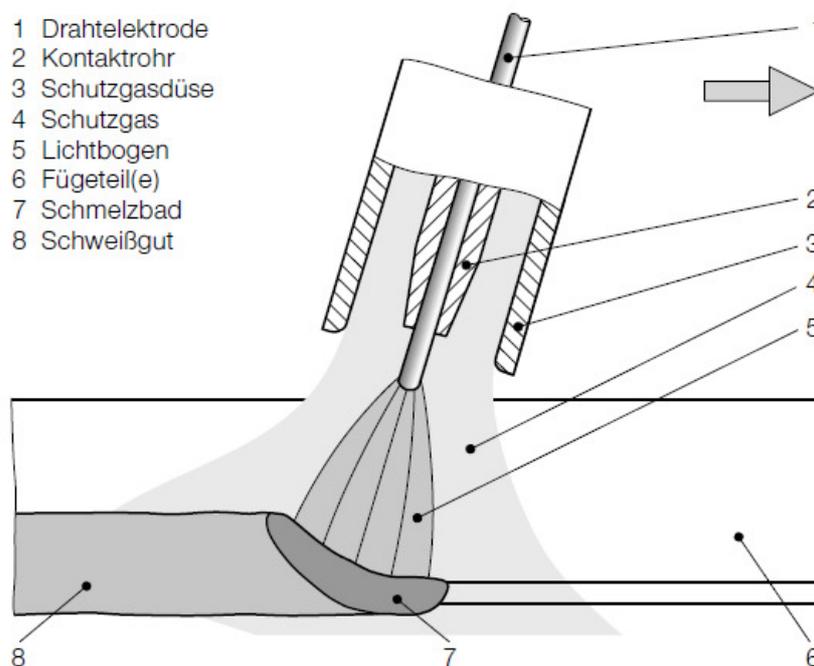


Abbildung 21: Verfahrensprinzip MIG-Schweißen [9]

Die Abbildung 22 zeigt schematisch den Aufbau einer MIG-/MAG-Schweißanlage, die aus der Stromquelle, dem Schweißbrenner mit Schlauchpaket, der Drahtvorschubeinrichtung und der Gasflasche mit dem Druckminderer besteht. Es werden nur Stromquellen mit Konstantspannungscharakteristik verwendet, wobei ein störungsfreier und gleichmäßiger Drahtvorschub durch die Drahtvorschubeinrichtung erfolgen soll. Die Qualität der Schweißnahtverbindung wird vor allem von der Art des Werkstoffüberganges und der Zusammensetzung des Schutzgases bestimmt. Es können unterschiedliche Formen des Lichtbogens (z.B. Kurz-, Sprühlichtbogen) durch die Art des verwendeten Schutzgases und die Höhe des Schweißstromes (Stromdichte) erreicht werden [9].

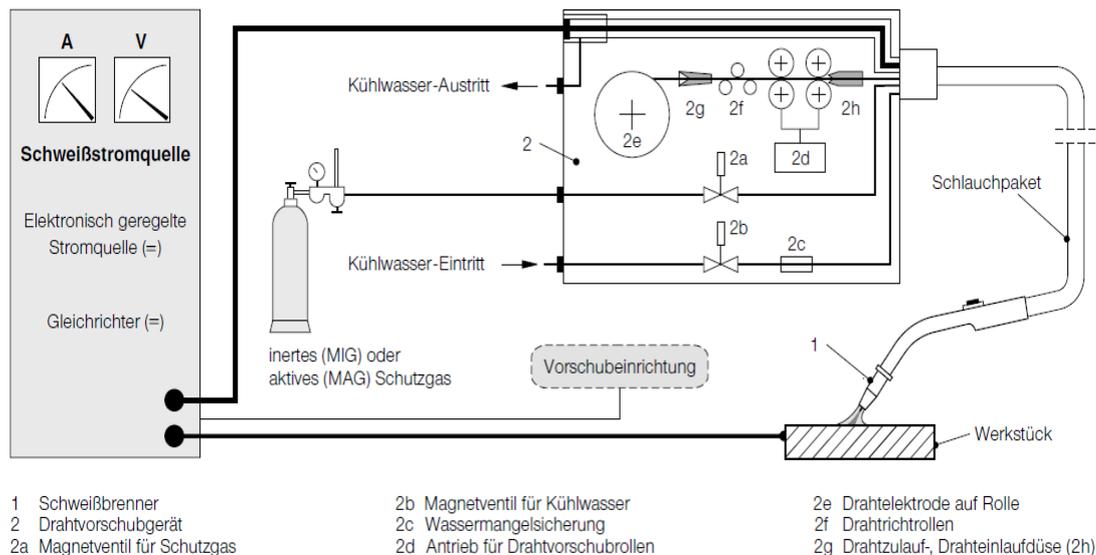


Abbildung 22: Wassergekühlte MIG-/MAG-Schweißanlage [9]

Im Vergleich zum WIG-Schweißverfahren ist MIG wegen seiner höheren Abschmelzleistung auch für die Automobilindustrie interessant. Beim Mg-Schweißen wird die Parameteroptimierung durch die Metaldampfbildung deutlich erschwert.

Durch artfremdes Fügen von Mg- und Al-Legierungen bzw. durch Ersatz von Al- durch Mg-Legierungen würde man eine Gewichtsreduzierung und erhöhte Leistungsfähigkeit in der Produktion einer Karosserie erzielen. Jedoch wird das Schweißgut durch die hartnäckige Oxidschicht von Magnesium und Aluminium beeinflusst. Außerdem kann es bei den herkömmlichen Schweißverfahren zur Heißriss- und zur Bildung von spröden Intermetallischen Phasen kommen. Daher ist das artfremde Schmelzschweißen von Mg- mit Al-Legierungen sehr schwierig [15].

2.4.1.1 CMT-Schweißverfahren

CMT (kurz für „Cold Metal Transfer“) ist ein Metallschutzgas-Schweißverfahren mit geringer Wärmeeinbringung – verglichen mit den üblichen Kurzlichtbogenprozessen.

Beim üblichen Kurzlichtbogenprozess erfolgt der Drahtvorschub kontinuierlich (abgesehen von einigen Sonderfällen wird mit Gleichstrom geschweißt). Dabei steigt der Strom während des Kurzschlusses stark an und bewirkt den Tropfenübergang sowie die Wiederezündung des Lichtbogens. Die Folge davon ist zumeist starke Spritzerbildung.

Beim CMT-Schweißverfahren wird das Aufbrechen des Kurzschlusses durch das Rückziehen des Drahtes kontrolliert, wobei der Kurzschlussstrom sehr gering ist und der Werkstoffübergang fast stromlos erfolgt.

Abbildung 23 zeigt den Vergleich der verschiedenen Schweißverfahren. Die obere Leistungsgrenze wird durch Beginn des Übergangslichtbogens bestimmt. Die erforderliche Nahtausbildung bestimmt die untere Leistungsgrenze [16].

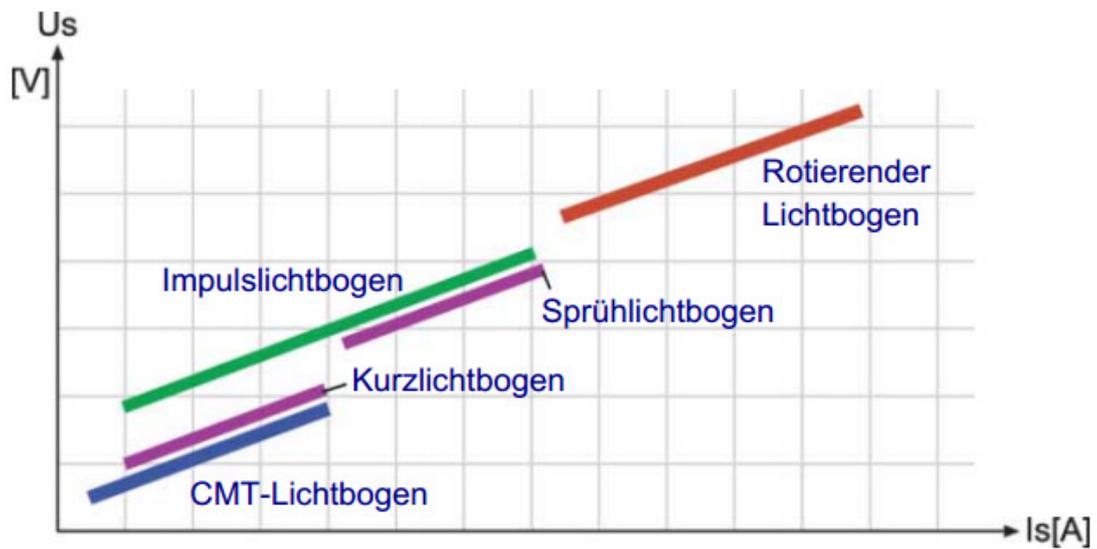


Abbildung 23: Vergleich der verschiedenen Schweißverfahren [16]

Die Drahtbewegung erfolgt beim CMT-Prozess oszillierend, zum Werkstück sowie in die entgegen gesetzter Richtung. Die maximale Frequenz der Drahtvor- und -rückbewegung beträgt ca. 70Hz, Abbildung 24 [17].



Abbildung 24: Prinzip des CMT-Prozesses mit oszillierender Drahtvorschubbewegung [17]

2.4.1.2 CMT – PulsMix – Schweißverfahren

„Hier handelt es sich um eine Prozessvariation, also um eine Kombination des CMT-Verfahrens mit dem Pulslichtbogen. Die Vorteile zweier Verfahren werden miteinander verbunden. Das Ergebnis ist ein leistungsstarker Puls-Prozess bis 350 Ampere, allerdings mit der Lichtbogen-Stabilität von CMT. Hierzu werden die zwei Arten von Werkstoffübergängen ideal und individuell abgestimmt – z.B. einmal Kurzschluss-Übergang via CMT, zweimal berührungsloser PulsÜbergang. Oder einmal CMT, dreimal Puls – je nach Anwendung. Die Regelung erfolgt stets über CMT. Charakteristisch für Puls-Mix ist das optimierte Einbrandverhalten bei gleichzeitig höchster Prozessstabilität und der CMT-typischen optimierten Wärmeeinbringung. Die Einsatzfelder liegen vor allem bei Edelstahl und Aluminium, sowohl automatisiert als auch manuell.“ [18]

2.4.1.3 Heißbrissanfälligkeit

Durch die Zugabe von Legierungselementen wird die Solidustemperatur herabgesetzt und das Schmelzintervall breiter. Die Legierungen mit Al-Gehalt bis zu 6% bzw. Zn-Gehalt bis zu 1% sind gut schweißgeeignet. Legierungen deren Al- bzw. Zn-Gehalt höher liegen neigen zu Heißbrissbildung. Die Schweißung von Al-freien Mg-Legierungen mit einem Zn-Gehalt über 3% wird nicht empfohlen.

Obwohl bei einphasig erstarrenden Legierungen eine gute Schweißbarkeit zu erwarten ist, treten bei Vorhandensein von niedrigschmelzenden Korngrenzsubstanzen Heißrisse, durch die Schweißschrumpfungen auf. Die Bildung der Primärkristalle erfolgt in der Kristallisationsphase, wobei diese mit Restschmelze umgeben sind. Der Ausgleich der Volumskontraktion des erstarrenden Materials bzw. Schrumpfungen geschieht durch nachfließende Restschmelze. Wenn dieses Nachfließen nicht möglich ist, entstehen Werkstofftrennungen (Heißrisse).

Geschweißte Mg-Werkstoffe sind wegen des (gegenüber Al-Werkstoffen) breiteren Schmelzintervalls (ca. 200K) anfällig gegenüber Heißbrissbildung [19].

Die Bildung von Wiederaufschmelzungsrissen erfolgt ähnlich. Zuerst wird die niedrigschmelzende Korngrenzenphase durch die Schweißwärme geschmolzen und anschließend entstehen durch die Volumskontraktion bei der Abkühlung die Trennungen [4].

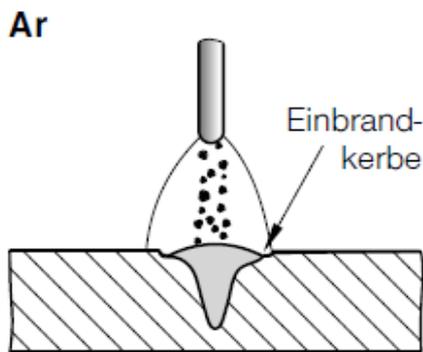
2.4.1.4 Porenproblematik

Die Schweißbeignung von Mg-Gussteilen wird in starkem Maß durch die unterschiedlichen Gießprozesse beeinflusst. Die Porenbildung im Schmelzbad ist das größte Problem beim Schweißen von Druckgusslegierungen. Das zwangsgelöste Prozessgas wird nämlich während des Schweißens frei und es kommt zur Porenbildung. Dadurch wird der tragende Querschnitt der Schweißnaht geschwächt, was sich negativ auf die mechanische Eigenschaften auswirken kann. Abhilfe in diesem Fall wäre z.B. die Wahl eines Festfügeverfahrens (z.B. Reibschweißen) oder den Druckgießprozess so zu beeinflussen, dass der Porenanteil reduziert wird [3].

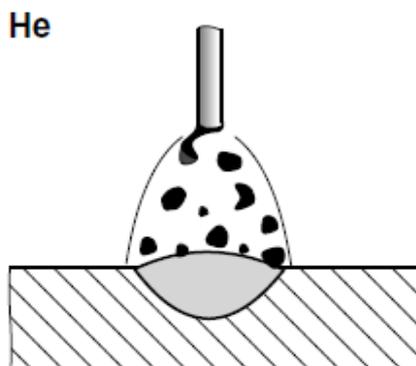
Im Gegensatz zu Gusslegierungen ist bei den Knetlegierungen der Herstellungsprozess *nicht* von Bedeutung. Bei den Knetwerkstoffen wird das Grundwerkstoffgefüge durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen beeinflusst. Durch die geeignete Wahl des Schweißverfahrens und des Zusatzwerkstoffes werden die mechanischen Eigenschaften nur geringfügig verschlechtert. Mit optimierten Schweißprozessbedingungen wird die Herstellung von Verbindungen ermöglicht, die 60-100% der Grundwerkstoffeigenschaften erreichen [3].

2.4.1.5 Wirkung der Schutzgase

Beim MIG-Schweißen von Mg-Legierungen verwendet man am häufigsten Argon; daneben kommen noch Helium und Argon-Helium-Gemische zum Einsatz. Der im Schutzgas evtl. vorliegende Wasserstoff (in Material enthalten) wirkt sich stark auf die Nahtporosität aus [3].



Argon: „Stark gerichteter Tropfenstrom, kurzschlussfreier, feintropfiger Werkstoffübergang, typischer fingerförmiger Einbrand. Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten Neigung zu Einbrandkerben, da die Bereiche am Decklagenauslauf nicht mehr mit Schmelze aufgefüllt werden können.“ [24]



Helium: „Schwach gerichteter Tropfenstrom, heißer Lichtbogen, Einbrand breiter und flacher als bei Ar. Einbrandkerben entstehen erst bei ca. 40% höherer Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zu Ar. Geeignet für mechanische Schweißverfahren und große Werkstückdicken. Trotz der geringen Masse der He-Atome gute Reinigungswirkung, weil die relativ große Lichtbogenspannung die übergehenden Werkstofftröpfchen stark beschleunigt“ [24]

Abbildung 25: Werkstoffübergang bei inerten Schutzgasen - Verdampfung beim Schweißen [9]

Die Schmelztemperaturen von Aluminium und Magnesium liegen nahe beieinander (siehe Tabelle 2, S. 3). Im Vergleich zu Al wird beim Mg-Schweißen um 40% weniger Energie zum Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes benötigt. Infolge einer geringeren Wärmeleitfähigkeit ist die erforderliche Energieeinbringung kleiner. Wegen der deutlich geringeren Verdampfungstemperatur (Mg: 1090°C, Al: 2476°C) ist die zum Verdampfen nötige Energie geringer, Tabelle 9 und Abbildung 26.

Tabelle 9: Vergleich Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Verdampfungsenthalpie von Mg und Al [22]

	Wärmeleitfähigkeit (W/mK) bei 27°C	spez. Verdampfungsenthalpie bei 1,013bar (kJ/kg)
Mg	156	5.651
Al	237	11.721

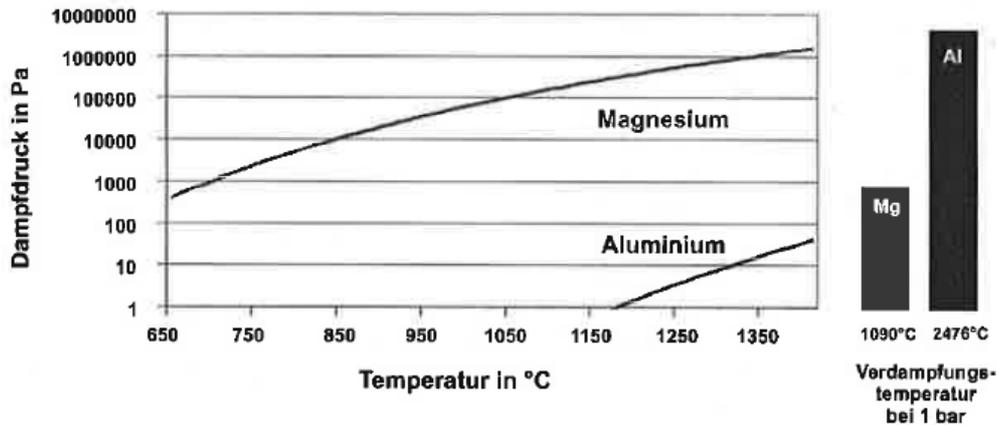


Abbildung 26: Vergleich der Dampfdruckkurven von Magnesium und Aluminium [19]

Die Wärmeeinbringung beim Schweißen sollte also ziemlich genau abgestimmt werden, da Mg nicht über 800°C erwärmt werden soll. Ist erstere zu hoch, führt die Mg-Verdampfung zu stärkerer Spritzerbildung [19].

2.4.2 FSW-Schweißverfahren

Mit diesem Verfahren lassen sich viele Nichteisen-Metalle fügen, vor allem Al-Legierungen, wobei hierbei kein Schutzgas erforderlich ist [20].

Mit dem Rührreißschweißen (FSW) werden vorwiegend Stumpf- und Überlappverbindungen hergestellt, Abbildung 27.

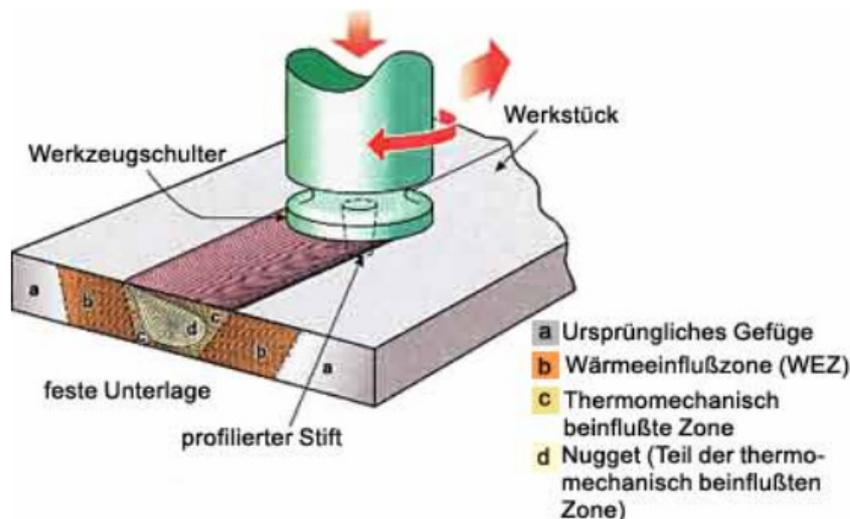


Abbildung 27: Prinzip des Rührreißschweißens [21]

Durch die Reibung zwischen dem rotierenden Werkzeug und den zu verbindenden Materialien entsteht Wärme, die das Material „teigig“ macht, ohne es aber aufzuschmelzen; dabei werden ca. 80% der Schmelztemperatur erreicht. Das Werkzeug besteht aus einem Stift und einer Schulter, die je nach Ausführung konkav oder konvex ausgeführt ist. Während des Schweißvorgangs fährt man mit dem Werkzeug so tief hinein, dass die Schulter einen ständigen Kontakt mit der Oberfläche hat, um das Austreten des teigigen Materials zu verhindern und um genügend Reibungswärme zu erzeugen. Werkzeuge werden aus einem harten, wärmefesten Werkstoff hergestellt, wobei für das Al- und Mg-FSW Schweißen Standard-Werkzeugstähle (etwa W300 Warmarbeitsstahl) verwendet werden können.

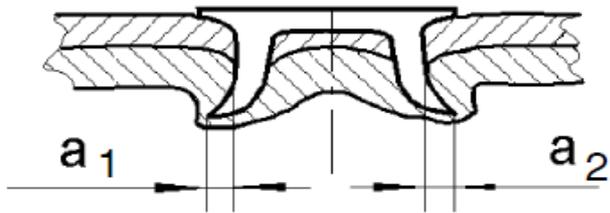
Um eine einwandfreie Schweißverbindung ohne Poren, Risse und sonstigen Fehlern zu bekommen, müssen Schweißparameter (Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft) und Werkzeuggeometrie richtig gewählt werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, dass sich deutlich weniger Metaldämpfe als beim Schmelzschweißverfahren bilden (vgl. 1.8.2.4). Weiters sind keine Oberflächenvorbehandlungen, Schutzgase und Zusatzwerkstoffe notwendig. Im Vergleich zu Al hat Mg eine um etwa 25% geringere Wärmeleitfähigkeit und etwa 25% höhere spezifische Wärmekapazität. Aus diesem Grund ist es notwendig die Wärmeeinbringung beim Schweißen genau zu bestimmen. Durch die Aktivierung von neuen Gleitebenen bei Temperaturen über 225°C wird das Verformungsvermögen von Mg verbessert. Da diese Temperatur während des Schweißvorgangs in der Rührzone (Nugget) über- und in der WEZ unterschritten wird, sind sowohl gut als auch schlecht verformbare Werkstoffbereiche vorhanden wodurch die Prozessführung zusätzlich erschwert wird [10].

Beim FSW-Schweißen ist die eingebrachte Wärme deutlich niedriger als beim Schmelzschweißen. Daher sind die maximalen Temperaturen im Schweißgut und in der WEZ ebenso niedriger, was in der Regel vorteilhaft im Hinblick auf Verzug und dem Spannungszustand der Verbindung ist. Da beim FSW die Fügeteile nicht aufgeschmolzen werden, hat dieses Fügeverfahren großes Potenzial zum artfremden Verbinden verschiedener Werkstoffe. Beim artfremden Mg-Al-FSW-Schweißen wird die Herstellung einer guten Schweißverbindung, durch vergleichsweise geringe Bildung von intermetallischen Phasen ermöglicht. Dies wird durch die im Vergleich zum Schmelzschweißen niedrigere Diffusionsrate und geringeren Anzahl der chemischen Reaktionen verursacht [22].

2.4.3 Halbhohlstanznieten

Beim Stanznieten mit Halbhohlstanzniet entsteht die Verbindung durch die Kombination von Stanz- und Umformvorgang. Der hohle Nieterschaft wird durch das ausgestanzte Material des oberen Bleches ausgefüllt. Das Qualitätsmerkmal für die mechanischen Eigenschaften der Verbindung ist das Maß der Verspreizung. Die Merkmale einer Stanznietverbindung sind in der Abbildung 28 dargestellt.

Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 29 gezeigt [23]. Der Werkzeugsatz besteht aus dem bewegten Stempel, dem Niederhalter und der Matrize. Zuerst werden Matrize und Niederhalter an die Fügestelle gefahren und der Niet zugeführt. Danach wird der Stanzniet mit der Presskraft beaufschlagt und das auf der Stempelseite liegende Blech geschnitten. Anschließend dringt der Niet weiter ein und auf der Matrizenseite wird im Blech ein Schließkopf geformt. Dabei wird das matrizenseitige Blech nicht durchgeschnitten [24].

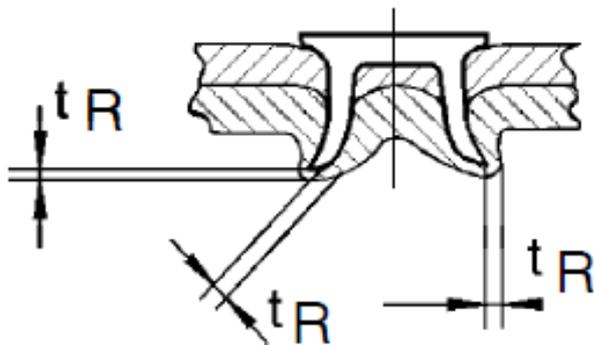
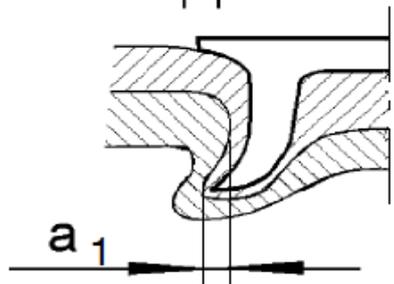
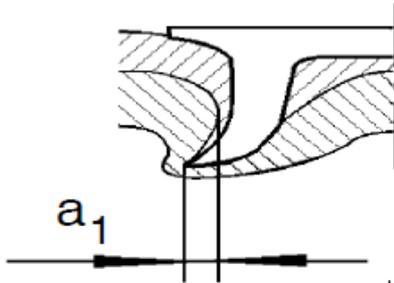


$a_{1,2}$: Hinterschnitt im schließkopfseitigen Material

$a_{1,2}$: Undercut in button-side material

Die Hinterschneidung im schließkopfseitigen Werkstoff stellt den formschlüssigen Anteil der Verbindung dar.

Mittelwert a aus a_1 und a_2



Restdicke des Materials des schließkopfseitigen

Nietkopfunterstand

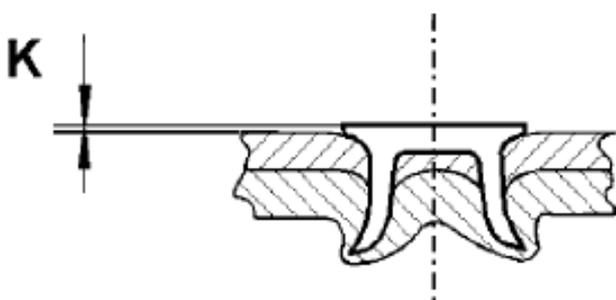


Abbildung 28: Halbhohlstanznietmerkmale [25]

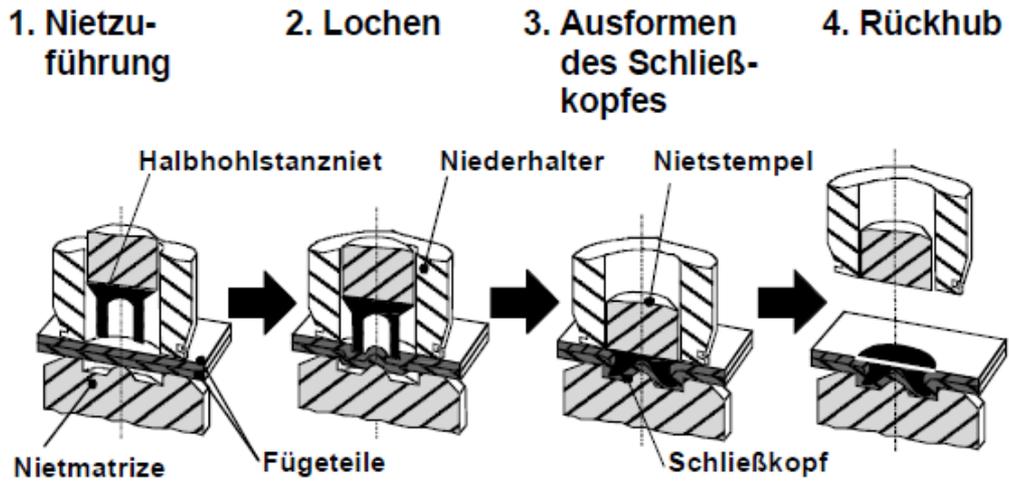


Abbildung 29: Prozessschritte beim Halbholzstanznieten [23]

Die Vorteile des Stanznietens im Vergleich mit anderen Fügeverfahren sind:

- keine Gefügeänderung, wie beim Schweißen
- bessere statische und dynamische Festigkeit im Vergleich zum Clinchen
- verschiedene Werkstoffkombinationen sind ffügbar, (Al-Mg, St-Al, St-Mg usw.)

Der größte Nachteil ist der, dass zu jeder Fügestelle ein Niet zugeführt werden muss. Die Wahl der geeigneten Matrize richtet sich nach dem Fügeteilwerkstoff, Abbildung 30.

Flachmatrize	Dornmatrize	Spezialmatrizen
Standardanwendungen	Einzelne Fügeaufgaben	z.B. bei rissanfälligen, spröden Materialien

Abbildung 30: Matrizenarten für das Halbholzstanznieten [24]

In Abbildung 31 sind die Ausführungsformen von Stanznieten aufgezeigt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Kopfform, Schaftform und Schneidegeometrie.

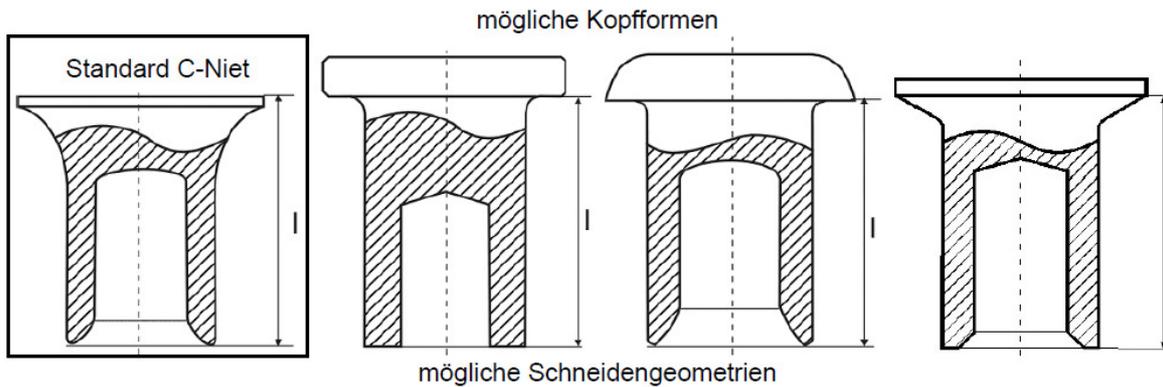


Abbildung 31: Unterschiedliche Ausführungen der Stanzniete [24]

2.4.4 Kleben

Die wichtigsten Voraussetzungen für eine gute Klebeverbindung sind:

- Wahl eines optimalen Klebstoffes
- Beachtung konstruktiver Gesichtspunkte
- Berücksichtigung von Einflussparameter (Materialpaarung, Oberflächenbeschaffenheit und Verarbeitungsbedingungen).

Die Auflistung der wichtigsten Vor- und Nachteile von Klebeverbindungen ist in der Tabelle 10 gezeigt.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile des Klebens [10]

Vorteile	Nachteile
große Werkstoffvielfalt	begrenzte Festigkeit
wärmearmes Fügen	geringe Warmfestigkeit
verzugsarmes Fügen	Schälempfindlichkeit
günstiger Kraftfluss	aufwendige Oberflächenvorbereitung
hohe Schwingfestigkeit	alterungsempfindlich
großer Dickenbereich	schwierige Dimensionierung
Dichtheit	ungünstige zerstörungsfreie Prüfbarkeit
glatte Oberfläche	
gute Schwingungsdämpfung	

Durch Adhäsion (Haftung Klebstoff am Werkstoff) und die Kohäsion (Festigkeit innerhalb des Klebstoffs) bestimmen die Festigkeit der Klebeverbindung. Um eine gute Adhäsion zu erreichen wird eine gründliche Reinigung und Oberflächenvorbehandlung gefordert [3]. Durch Strahlen, Schleifen oder Bürsten werden Schmutz, Rost, Zunder, Farben, Lacken usw. entfernt. Da Mg sehr unedel ist, muss eine stabile und alterungsbeständige Oberflächenvorbehandlung vorgesehen werden. Bei metallischen Werkstoffen wird die Festigkeit der Klebung durch die Fügeteilwerkstoffe, die Klebstoffschicht und die Grenzflächen bestimmt. Am meisten werden Überlappverbindungen angewendet, um den Einfluss der geringeren Festigkeit von Klebstoffen zu minimieren. Die Spannungsverteilung in einer Überlappverbindung ist in Abbildung 32 dargestellt [10].

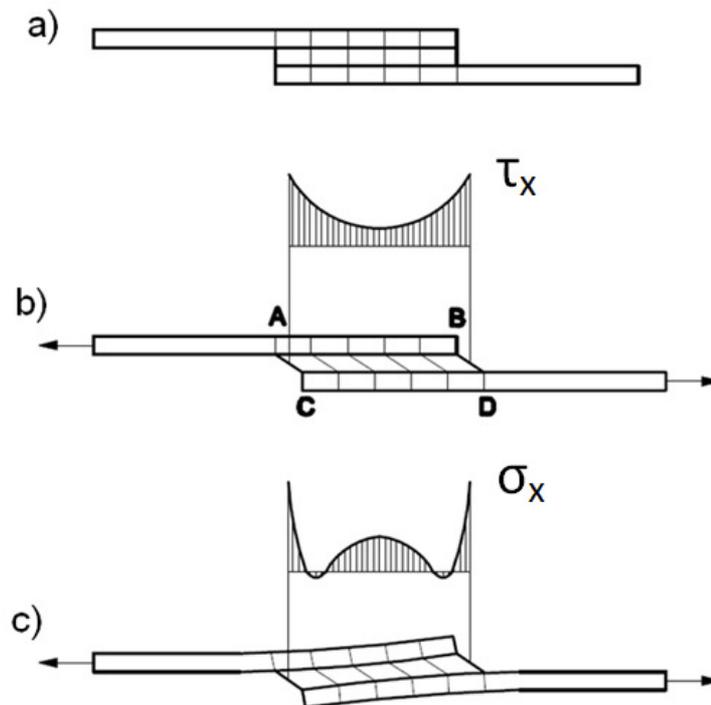


Abbildung 32: a) Überlappklebeverbindung unbelastete; b) Schubspannungsverteilung in belasteter biegesteifer Verbindung; c) Normalspannungsverteilung in belasteter biegearmer Verbindung [10]

2.4.5 Hybridfügen

Unter Hybridfügen versteht man die Kombination von mindestens zwei elementaren Fügeverfahren. Es gibt drei Methoden für die Anwendung des Hybridfügens:

- Kapillarmethode
- Fixiermethode
- Sequenzmethode

Bei der industriellen Blechverarbeitung spielt die Fixiermethode eine entscheidende Rolle. Dabei wird der Klebstoff auf die Fügeteile aufgetragen und danach die Bleche zueinander ausgerichtet. Anschließend werden diese durch ein mechanisches Fügeverfahren verbunden und der Klebstoff abschließend ausgehärtet. Dies ermöglicht die Härtung des Klebstoffs in einen nachfolgenden Arbeitsschritten, z.B. während des Einbrennens des Lacks [26].

Die verschiedene Methoden des Hybridfügens sind in der Abbildung 33 dargestellt. Bei der Fixiermethode wird der Klebstoff vor dem Punktschweißen bzw. mechanischen Fügen auf die Fügeteile aufgetragen und erst danach ausgehärtet. Die Fixierung der Fügeteile während der Klebstoffaushärtung erfolgt durch punktförmige Verbindungselemente die unmittelbar die weitere Handhabung des Bauteils ermöglichen. So ist das Kleben auch in Fertigungsprozesse mit kurzen Taktzeiten integrierbar. Bei der Injektions- bzw. Kapillarmethode wird der Klebstoff nach dem Setzen des punktförmigen Verbindungselements eingebracht. In diesem Fall sollte man einen niedrigviskosen Klebstoff anwenden, der unter Ausnutzung des Kapillareffekts in die Fügezone eindringen kann. Zu berücksichtigen ist, dass hierbei der Klebstoff den Fügebereich nicht vollständig ausfüllt und aufgrund der geringen Viskosität leicht wieder austreten kann. Dementsprechend ist bei der weiteren Handhabung auf die Lage des Bauteils zu achten [26].

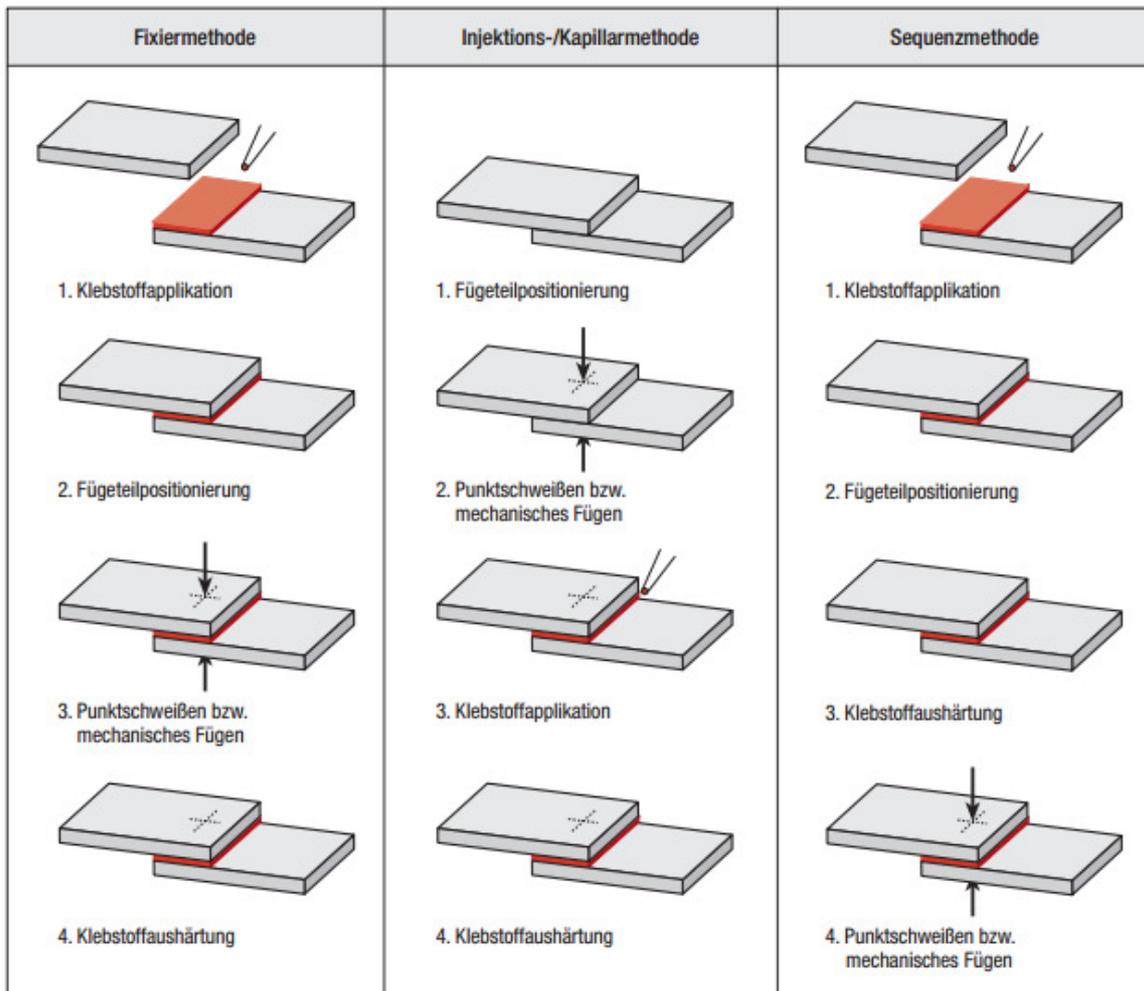


Abbildung 33: Verfahrensvarianten beim Hybridfügen [26]

3 Experimentelles

3.1 Verwendete Grundwerkstoffe

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden artgleiche (Mg-Mg), sowie artfremde (Al-Mg) Verbindungen erzeugt. Dabei spielen die thermophysikalische und mechanischen Kennwerte von Aluminium und Magnesium eine wichtige Rolle, Tabelle 11.

Tabelle 11: Eigenschaftsvergleich Magnesium / Aluminium

Eigenschaften:	Einheit	Mg	Al
Dichte	g/cm ³	1,74	2,7
Schmelztemperatur	°C	649	660
Elastizitätsmodul	MPa	45 000	66 600
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	25	25
Zugfestigkeit ¹⁾	MPa	80 bis 180	40 bis 180
Bruchdehnung ¹⁾	%	1 bis 12	4 bis 50

¹⁾abhängig vom Behandlungszustand

Die chemische Zusammensetzungen (IST- und SOLL-Analyse) der beiden in den Experimenten verwendeten Grundwerkstoffe AZ31 und +DBL4951.60 sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 angeführt.

Tabelle 12: Chemische Zusammensetzungen der Mg-Grundwerkstoffe

	Chemische Zusammensetzung (IST Analyse) in [Gew. %]									
Bez.	Al	Zn	Mn	Cu	Pb	Fe	Ni	Ce	Si	Mg
AZ31 IST	2,58	0,68	0,31	0,0018	0,0024	0,0053	0,0007	0,0034	0,0078	96,40
AZ31 soll	2,5- 3,0	0,6- 1,0	-	0,05max	-	0,005	0,005max	-	0,01	rest

Tabelle 13: Chemische Zusammensetzung der Al-Grundwerkstoff

	Chemische Zusammensetzung (IST Analyse) in [Gew. %]									
Bez.	Al	Zn	Mn	Cu	Pb	Fe	Ni	Ti	Si	Mg
+DBL4951.60 IST	97,96	0,015	0,087	0,168	0,0017	0,221	0,035	0,028	0,709	0,704
+DBL4951.60 SOLL		<0,25	<0,3	<0,3	-	<0,35	-	<0,15	<1,5	<0,9

Als Al-Grundwerkstoff wurde eine aushärtbare Aluminiumknetlegierung (DBL4951.60) mit der ALODINE 2040 Beschichtung verwendet. Magnesiumblechen wurden nicht beschichtet. Die Blechstärken für AZ31 wie auch für DBL4951.60 betragen 2mm.

3.2 Verwendete Schweißzusatzwerkstoffe für MIG (CMT) – Schweißen

Zum MIG-Schweißen der artgleichen und artfremden Verbindungen wurden zwei verschiedene Magnesiumzusatzwerkstoffe - AZ31X und AM50A - sowie ein Aluminiumzusatzwerkstoff - AlSi5 - angewendet. Hierbei handelt es sich um Massivdrähte mit jeweils 1,2mm Durchmesser (AlSi5 1mm). In Tabelle 14 und Tabelle 15 sind die IST-Analysen von AZ31X und AM50 (durchgeführt bei Firma Magna Steyr) und die Normanalyse von AlSi5 derselben angeführt.

Tabelle 14: Chemische Zusammensetzung Magnesium Massivdrähte AZ31X und AM50A, Ø1,2mm

Chemische Zusammensetzung (IST Analyse) in (Gew.%)										
Bez.	Al	Zn	Mn	Cu	Pb	Fe	Ni	Th	Si	Mg
AZ31X	2,93	1,09	0,392	0,0037	0,0022	0,033	0,0075	0,039	0,0017	95,49
AM50A	5,3	0,058	0,32	0,011	0,015	0,0073	0,0028	0,032	0,019	94,22

Tabelle 15: Chemische Zusammensetzung Aluminium Massivdraht AlSi5, Ø1mm nach DIN EN ISO 18273

Chemische Zusammensetzung (SOLL Analyse) in (Gew.%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V	Ti	Zr
AlSi5	4,5-6,0	0,8	0,3	0,05	0,05	-	0,10	-	0,20	-

Für artgleiches Schweißen Mg-Mg wurden Zusatzwerkstoffe (AZ31X und AM50A) verwendet und für artfremden Schweißungen Mg-Al den Al-Zusatzwerkstoff AlSi5.

Die chemischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften der Magnesium – Schweißzusatzwerkstoffe AZ31X, AM50A sowie AZ61A sind in Tabelle 16 angegeben.

Tabelle 16: Eigenschaften der Mg-Schweißzusatzwerkstoffe [29]

Werkstofftabelle		DE 80	DE 81	DE 82
		AZ31X	AZ61A	AM50A
Chemische Zusammensetzung	Al	2,5-3,6	5,8-7,2	4,4 – 5,4
	Zn	0,7-1,3	0,4-1,5	max. 0,22
	Mn	0,2-1,0	0,15-0,5	0,26 – 0,60
	Si	max 0,02	max 0,05	max. 0,10
	Cu	max 0,002	max 0,05	max. 0,01
	Ni	max 0,001	max 0,005	max. 0,002
	Fe	max 0,002	max 0,005	max. 0,008
	andere einzeln	max 0,05	max 0,05	max. 0,02
	andere zusammen	max 0,3	max 0,3	max. 0,20
	Mg	Rest	Rest	Rest
Thermische Eigenschaften	Liquidustemperatur	632 °C	610 °C	620 °C
	Solidustemperatur	560 °C	525 °C	565 °C
Typische mechanische Eigenschaften	Zustand	F	F	F
	Rp0.2 (MPa)	150	180	125
	Rm (MPa)	250	280	230
	A (%)	7	6	10
Sonstiges	E-Modul (GPa)	45	45	45
	Dichte bei 20 °C (g/cm ³)	1,77	1,8	1,77
	Wärmeleitfähigkeit (W/m · K)	77 (20 °C)	79 (20 °C)	65 (20 °C)
		87 (100 °C)	–	–
	Spez. elektr. Widerstand (mΩ · mm ² /m)	92 (20 °C)	125 (20 °C)	120 (20 °C)
		104 (100 °C)	–	–
Wärmeausdehnungskoeffizient (1/K)	26,8 · 10 ⁻⁶	27,2 · 10 ⁻⁶	26,0 · 10 ⁻⁶	

3.3 MIG-Schweißversuche

Die Schweißversuche wurden bei Firma Magna Steyr in Graz durchgeführt. Folgende Schweißverfahren wurden verwendet: CMT – konventionell und CMT – Puls-mix. Alle CMT (konventionell) Schweißungen wurden mit einem Roboter durchgeführt. Dabei wurde die Schweißanlage CMT 2700 verwendet.

Als Schutzgas ist Argon 4.6 (99,996 Vol.%) verwendet worden. Die Schutzgasmenge betrug 14-15l/min. Für einige Schweißungen wurde auch Ar-He-Mischgas (50% Ar - 50 % He, Schutzgasmenge 30l/min) verwendet. Die Blechabmessungen, sowie die Schliffentnahmepositionen sind in Abbildung 37 zu sehen. Vor dem Schweißen wurden die Bleche gebürstet und mit Isopropanol gereinigt. Die Bleche wurden im Überlappstoß mit der Überlappung von 20mm und schleppender Brennerposition verschweißt. Um die Verformung des Bleches zu verhindern, wurden die Bleche während dem Roboterschweißen mit Spannern fixiert.

3.4 FSW-Schweißversuche

Für diese Versuche wurde die Rührreißschweißanlage bzw. FSW-Anlage MTS ISTIR BR4 am IWS der TU Graz verwendet. Die wichtigsten Leistungsdaten sind: max. Drehzahl: 3200min^{-1} , max. Schweißgeschwindigkeit: $6,4\text{m/min}$, max. vertikale Kraft (Z-Force): $35,6\text{N}$; Die Anlage kann kraft- oder weggesteuert verwendet werden. Abbildung 34 zeigt den Schweißkopf mit FSW-Werkzeug und die pneumatische Blechspannvorrichtung, die bei FSW Schweißen verwendet wurde.

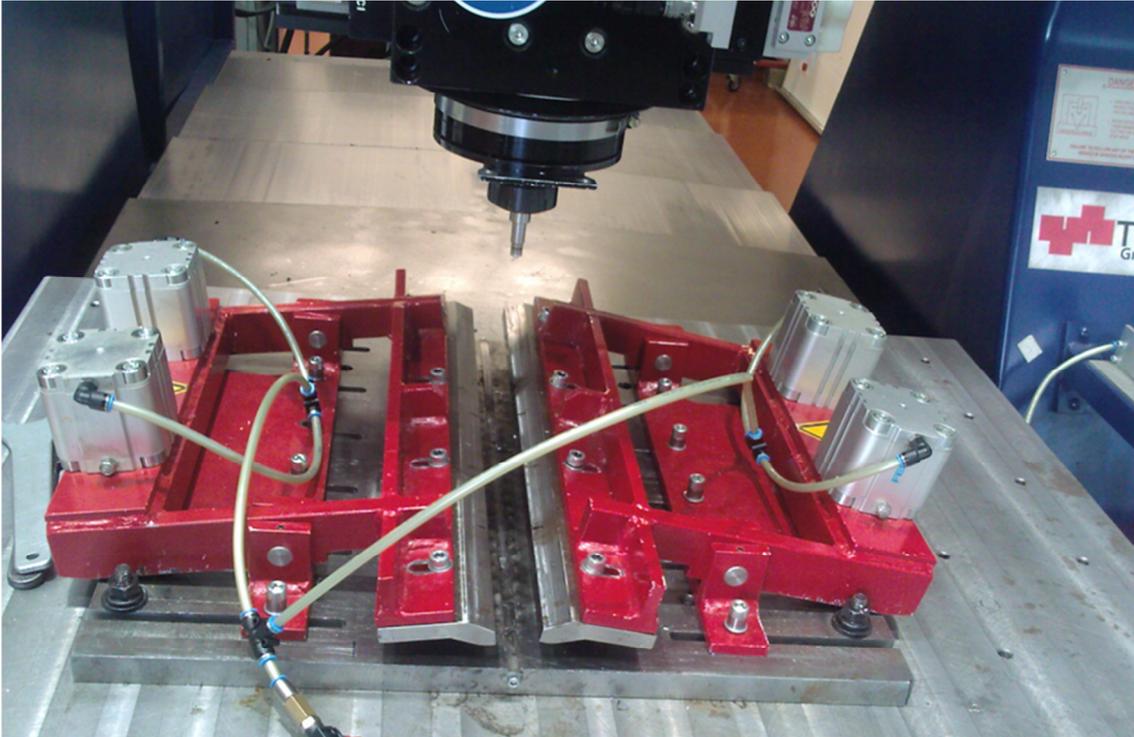


Abbildung 34: FSW-Anlage MTS ISTIR BR4 - Schweißkopf mit Werkzeug und Spannvorrichtung

Es wurden artgleiche (Mg-Mg) sowie artfremde (Mg-Al) Verbindungen hergestellt. Das verwendete Werkzeug H11, W300 (Werkzeugstahl) mit profiliertem Pin ($d = 4,5\text{mm}$) und einem Schulterdurchmesser von 11mm ist in der Abbildung 35 zu sehen.

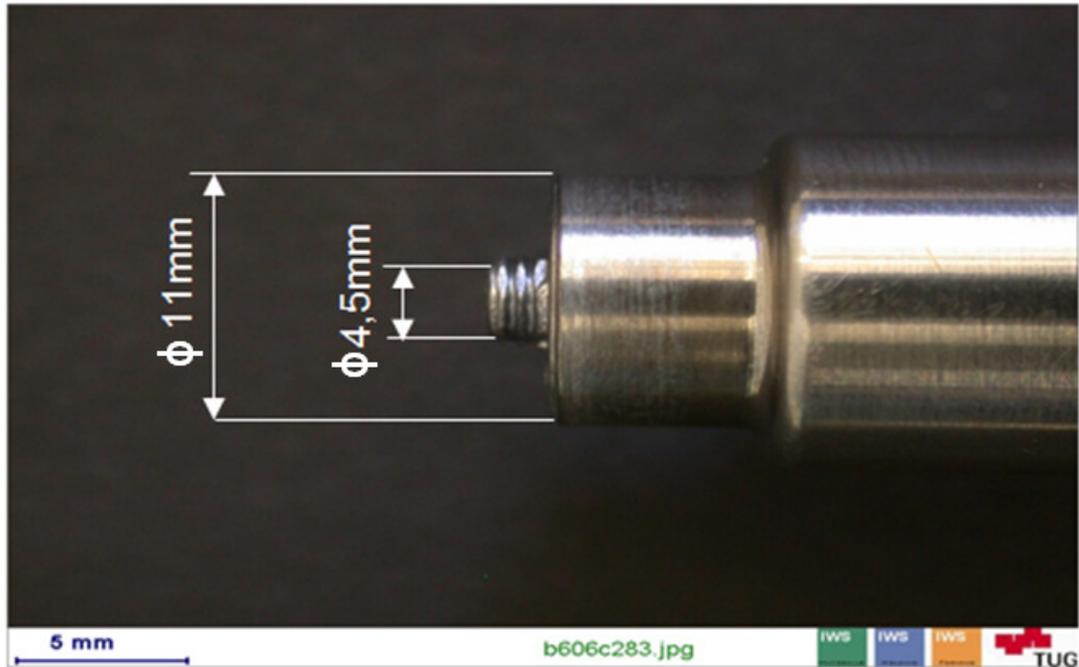


Abbildung 35: FSW Werkzeug W300

Die verwendeten FSW Schweißparameter waren:

- Eindringtiefe: 2,8mm
- Drehzahl: 1200U/min,
- Vorschubgeschwindigkeit: 400mm/min

3.5 Halbhohlstanznieten

Es wurden Halbhohlstanzniet-Verbindungen mit und ohne der Zugabe vom Klebstoff, hergestellt. Neben der Position des jeweiligen Werkstoffes, wurde die Matrizenform, die Nietlänge sowie der über den Stempel aufbrachte Druck (230 und 250bar) variiert.

Eingesetzt wurden die Niettypen C 5x6, P 5x6 und K 5x7 und die Matrizenformen DZ0902000, FM1002022 und SM0900084. Tabelle 17 zeigt ein Beispiel einer Niet-Matrizenkombination.

Tabelle 17: Halbhohlstanznieten - Beispiel Niet-/Matrizenkombination

Stanzniet	Matrize	Druck (bar)
P 5x6	FM1002022	230

Bei allen Experimenten wurde der einkomponentige warmaushärtende Klebstoff Betamate 1620 verwendet, Tabelle 18. Die Aushärtung erfolgte bei den Objekttemperaturen von 180 °C und 210 °C und mit unterschiedlichen Aushärtungszeiten (20 und 60min). Die wichtigsten technischen Daten des verwendeten Klebstoffes:

Tabelle 18: Eigenschaften Klebstoffs Betamate 1620 [30]

Technische Daten:

Basis	Epoxyharz (Epoxidharz)
Farbe	rot
Dichte (bei 23 °C)	1,21 g/ml
Anteil nichtflüchtiger Bestandteile	>99 %
Viskosität/Fließgrenze	35 Pas / 110 Pa
Flammpunkt (DIN 51758)	>150 °C
Aushärtebedingungen	>140 °C / 30 Minuten
Standardaushärtung	180 °C / 30 Minuten
Zugfestigkeit (DIN EN ISO 527-1)	35 MPa
Bruchdehnung (DIN EN ISO 527-1)	ca. 10%
E-Modul	1500 MPa
Zugscherfestigkeit (EN 1465)	29 MPa

Die Auswertung an den artgleichen (Mg-Mg) sowie artfremden (Mg-Al) Verbindungen erfolgte an Hand von Scherzugversuchen und metallographischen Schliffen.

3.6 Mechanische Prüfungen und Metallographie - Probenherstellung

Die Proben für den Scherzugversuch wurden nach dem Schweißen mit einer Trennschneidmaschine herausgeschnitten und entgratet. Die Abmessungen der Scherzugproben waren 40x180mm. Die Entnahmepositionen sind in der Abbildung 37 zu sehen. Es wurden von jeder Schweißung 3 Scherzugproben und 2 Proben für metallografische Untersuchungen entnommen. Die Zugprüfung wurde an der Zugprüfmaschine (Marke: Zwick Z250) durchgeführt, Abbildung 36.



Abbildung 36: Zugprüfmaschine (MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik)



Abbildung 39: Dauerschwingprüfmaschine (MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik)

Damit man die Proben der Halbhohlstanzniet- sowie der Rührreißschweißverbindungen den MIG (CMT) geschweißten Proben bei den Scherzugprüfungen gegenüberstellen kann, wurden bei den Probenherstellung gleiche Blechabmessungen verwendet. Die Bezeichnung der Proben, die dem Ermüdungsversuch unterworfen wurden, ist in Tabelle 19 angegeben.

Beispiels: **CP-M-10.2**

Tabelle 19: Probenbezeichnung Ermüdungsversuch

Schweißverfahren	CP - CMT Puls-mix	CK – CMT konventionell	
Prüfungsart:	s – statisch	d - dynamisch	M - metallografisch
Probennummer	10		
Probenposition	2		

Bei den Halbhohlstanznietversuchen wurden jeweils 2 Bleche mit den Abmessungen 40 x 100mm und einer Überlappung von 20mm durch einen mittig positionierten Stanzniet verbunden, Abbildung 39.

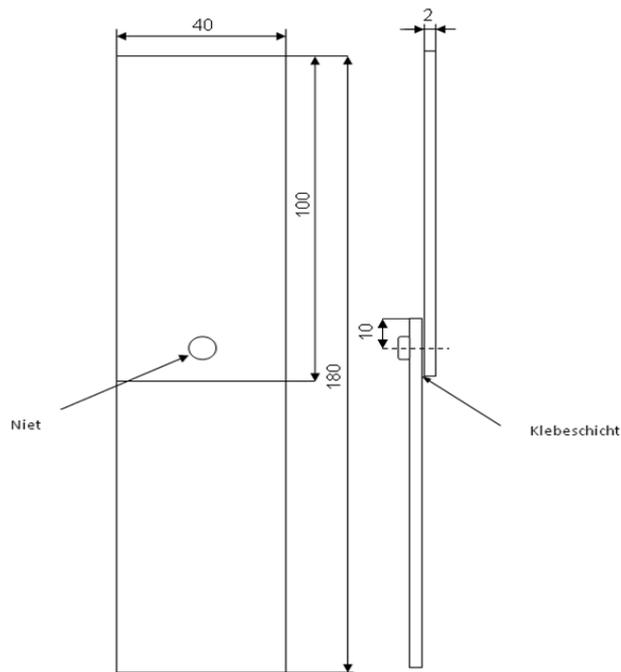


Abbildung 39: Probenform Halbhohlstanznieten für statische Zugscherversuche

Die Vorgehensweise für die Herstellung der metallografischen Querschliffe war wie folgt: Warmeinbetten, Schleifen, Polieren und Ätzen. Das Schleifen erfolgte in drei Stufen und zwar mit dem 300, 500 und 1000 SiC Schleifpapier. Danach wurden die Proben poliert, erst mit der 6 μ m, dann mit der 3 μ m Körnung und letztendlich mit der Zugabe vom Oxidpoliermittel. Anschließend wurden die Proben mit Flußsäure geätzt (90 ml dest. Wasser und 10 ml 40%-ige Flußsäure).

3.7 Prüfverfahren

Folgende Prüfverfahren wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt:

Zerstörende Prüfverfahren:

- Scherzugversuch
- Dauerschwingversuch
- Härteprüfung

Zerstörungsfreie Prüfverfahren:

- Lichtmikroskopische Untersuchung
- REM & EDX Analyse
- Mikrosonden Analyse

3.8 Gestaltung der Schweißverbindungen

In den Tabellen 20 - 23 sind die wichtigsten Parameter bei der Herstellung der Schweißverbindungen angeführt. Neben den verwendeten Schweißparametern, sind daraus auch die Schliffnummer, Schweißnahtnummer, Probenbezeichnung, Schweißzusatz, Schutzgasart und –menge zu entnehmen. Wie die unterstehende Abbildung 40 zeigt, wurden das unten positionierte Blech als Blech 1 und das oben positionierte Blech als Blech 2 bezeichnet.

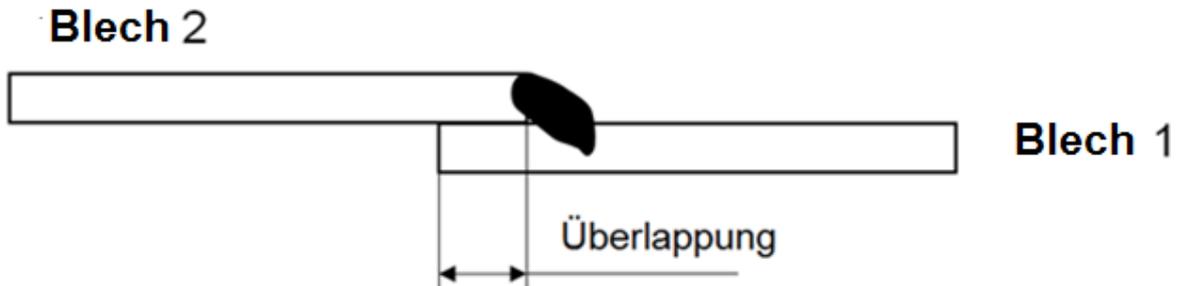


Abbildung 40: Blechbezeichnungen in der Überlappschweißverbindung

Abkürzungserklärung:

Beispiel: **CP-M-1**, wobei C für MIG (CMT) Schweißverfahren steht, P bedeutet, dass es sich um einen CMT Puls-mix Schweißverfahren handelt, M steht für metallographische Untersuchungen und die 1 ist die Probennummer. Analog dazu bedeutet **CK-x-x**, dass die Proben mit dem konventionellen MIG (CMT) Schweißverfahren hergestellt wurden usw. Bei den MIG (CMT) Schweißungen wurde die Kennlinie C-P 1068 und bei Puls-mix Schweißungen CMT1101 verwendet.

Erklärung der Abkürzungen, die in den Tabellen 20 bis 23 verwendet wurden:

GulPG - Gebürstet und mit Isopropanol gereinigt

OR - Ohne Vorbereitung (keine Reinigung)

G - Gebürstet

Tabelle 20: Versuchsplan – Rührreißschweißen (FSW)

Probenbezeichnung	Schweißnahtnummer	Schliffnummer	Zugprobennummer	Blech 1	Blech 2	Blechdicke [mm]	Blechkvorbereitung	Überlappung [mm]
FSW-1	50	50-1; 50-2	50-1; 50-2; 50-3	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	25
FSW-2	51	51-1; 51-2	51-1; 51-2; 51-3	+DBL4951.60	AZ31	2; 2 x 1,25	OR	25
FSW-3	52	52-1; 52-2		AZ31	AZ31	2	OR	25
FSW-4	53		53-1; 53-2; 53-3	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	25
FSW-5	54	54-1; 54-2	54-1; 54-2; 54-3	AZ31	AZ31	2	OR	25

Tabelle 21: Versuchsplan - MIG (CMT) Schweißen

Proben- bezeichnung	Schweiß- nahnummer	Schliffnummer	Zugprobennummer	Blech 1	Blech 2	Blechvorbereitung	Schweißspannung [V]	Schweißstrom [A]	Schweißzusatz	Schutzgas; l/min
CK-M-1	2	2-1; 2-2		+DBL4951.60	AZ31	GulPG	11,2	94	AlSi5	Ar 4.6
CK-M-2	4	4-1; 4-2		+DBL4951.60	AZ31	GulPG	9,2	82	AlSi5	Ar 4.6
CK-M-3	5	5-1; 5-2		+DBL4951.60	AZ31	GulPG	8,2	73	AlSi5	Ar 4.6
CK-M-4	8	8-1; 8-2		+DBL4951.60	AZ31	GulPG	10,6	85	AlSi5	Ar 4.6
CK-M-5	9	9-1; 9-2		AZ31	AZ31	GulPG		90	AlSi5	Ar 4.6
CK-M-6	14	14-1; 14-2		AZ31	AZ31	GulPG			AZ31	Ar 4.6
CK-M-7	15	15-1; 15-2		AZ31	AZ31	GulPG			AM50	Ar 4.6
CK-M-8	17	17-1; 17-2		AZ31	AZ31	GulPG	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 15
CK-M-9	18	18-1; 18-2		AZ31	AZ31	GulPG	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 15
CK-M-10	19	19-1; 19-2		AZ31	AZ31	GulPG	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 15
CK-M-11	20	20-1; 20-2		AZ31	AZ31	GulPG	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 15
CK-M-12	21	21-1; 21-2		AZ31	AZ31	GulPG	11	124	AZ31	Ar 4.6; 15
CK-M-13	22	22-1; 22-2		AZ31	AZ31	GulPG	11	124	AZ31	Ar 4.6; 15
CK-M-14	23	23-1; 23-2		AZ31	AZ31	GulPG	11	124	AZ31	Ar 4.6;15
CK-M-15	24	24-1; 24-2		AZ31	AZ31	GulPG	11	124	AZ31	Ar 4.6; 15
CK-M-16	26	26-1; 26-2 ;26-3		AZ31	AZ31	GulPG	11	105	AZ31	30%He 70%Ar; 17
CK-M-17	29	29-1; 29-2 ;29-3		AZ31	AZ31	GulPG	11,7	127	AM50	30%He 70%Ar; 17
CK-M-18	30	30-1; 30-2; 30-3		AZ31	AZ31	GulPG	11,8	127	AZ31	30%He 70%Ar; 17
CK-M-19	31	31-1; 31-2 ; 31-3		AZ31	AZ31	GulPG	11,3	120	AZ31	Ar 4.6; 15
CK-M-20	32	32-1; 32-2; 32-3		AZ31	AZ31	GulPG	11	124	AZ31	Ar 4.6; 15
CK-M-21	33	33-1; 33-2; 33-3		AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 15
CK-M-22	34	34-1; 34-2	34-1; 34-2; 34-3	AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 14
CK-M-23	35	35-1; 35-2	35-1; 35-2; 35-3	AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 14
CK-M-24	36	36-1; 36-2	36-1; 36-2; 36-3	AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AZ31	Ar 4.6; 14
CK-M-25	37	37-1; 37-2	37-1; 37-2; 37-3	AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AZ31	Ar 4.6; 14
CK-M-26	38			AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AM50	Ar 4.6; 14
CK-M-27	39			AZ31	AZ31	OR	11,7	124	AZ31	Ar 4.6; 14
CK-M-28	40	40-1; 40-2	40-1; 40-2; 40-3	AZ31	AZ31	GulPG	11,7	123	AZ31	50%He 50%Ar; 30
CK-M-29	41	41-1; 41-2	41-1; 41-2; 41-3	AZ31	AZ31	GulPG	11,7	123	AM50	50%He 50%Ar; 30
CK-M-30	42			AZ31	AZ31	G	10,8	98	AZ31	Ar 4.6; 14
CK-M-31	43	43-1; 43-2; 43-3; 43-4		AZ31	AZ31	G	10,5	101	AZ31	Ar 4.6; 14
CK-M-32	44			AZ31	AZ31	G	10,9	101	AM50	Ar 4.6; 14
CK-M-33	45	45-1		AZ31	AZ31	G	10,9	101	AM50	Ar 4.6; 14

Tabelle 22: Versuchsplan - Halbhohlstanzen

Probenbezeichnung	Schweißnahtnummer	Blech 1	Blech 2	Blehdicke [mm]	Blechvorbereitung	Überlappung [mm]	Matrize	Niет	Druck [bar]
N.Z.1	55	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.2	56	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.3	57	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.4	58	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.5	59	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.6	60	+DBL4951.60	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.7	61	AZ31	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.8	62	AZ31	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.9	63	AZ31	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.10	64	AZ31	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.11	65	AZ31	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230
N.Z.12	66	AZ31	AZ31	2	OR	20	SM0900084	C 5 x 6	230

Tabelle 23: Versuchsplan - CMT Puls-mix Schweißen

Probenbezeichnung	Schweißnahtnummer	Schliffnummern	Blech 1	Blech 2	Blehdicke [mm]	Überlappung [mm]	Schweißzusatz	Schutzgas: l/min
CP-M-1	1	1-1; 1-2	+DBL4951.60	AZ31	2	20	AlSi5	Ar 4.6
CP-M-2	3	3-1; 3-2	+DBL4951.60	AZ31	2	20	AlSi5	Ar 4.6
CP-M-3	6	6-1; 6-2	+DBL4951.60	AZ31	2	20	AlSi5	Ar 4.6
CP-M-4	7	7-1; 7-2	+DBL4951.60	AZ31	2	20	AlSi5	Ar 4.6
CP-M-5	10	10-1; 10-2	AZ31	AZ31	2	20	AlSi5	Ar 4.6
CP-M-6	11	11-1; 11-2; 11-3; 11-4	+DBL4951.60	AZ31	2	20	AlSi5	Ar 4.6
CP-M-8	13	13-1; 13-2	AZ31	AZ31	2	20	AM50	Ar 4.6
CP-M-9	16	16-1; 16-2	AZ31	AZ31	2	20	AZ31	Ar 4.6
CP-M-10	25	25-1; 25-2	AZ31	AZ31	2	20	AM50	30%He 70%Ar; 17
CP-M-11	27	27-1; 27-2; 27-3	AZ31	AZ31	2	20	AZ31	Ar 4.6;15
CP-M-12	28	28-1; 28-2; 28-3	AZ31	AZ31	2	20	AZ31	30%He 70%Ar; 17

4 Ergebnisse

4.1 Artgleiches Fügen

4.1.1 MIG (CMT) - Schweißverfahren

4.1.1.1 Scherzugversuche

Es wurden insgesamt 18 Scherzugversuche an nicht wärmebehandelten MIG(CMT) geschweißten Proben durchgeführt. Die Bruchkräfte lagen hierbei zwischen ca. 10,3 und 11,9kN, wobei die Bruchlage stets in der WEZ und dem Schweißgut gelegen ist, siehe Tabelle 24.

Tabelle 24: Ergebnisse der Scherzugversuche CMT Proben

Probenbezeichnung	F _{max} (kN)	Schweiß-zusatz	Bruchstelle	Schutzgas
34.1	11.94	AM50A	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
34.2	11.37	AM50A	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
34.3	11.56	AM50A	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
35.2	11.54	AM50A	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
35.3	11.19	AM50A	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
36.1	11.64	AZ31X	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
36.2	11.67	AZ31X	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
36.3	11.41	AZ31X	SG	100% Ar(Ar 4.6)
37.1	11.08	AZ31X	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
37.2	11.13	AZ31X	Anbindung WEZ zu SG	100% Ar(Ar 4.6)
40.1	10.96	AZ31X	SG	Ar 50% He 50%
40.2	10.7	AZ31X	SG	Ar 50% He 50%
41.1	10.38	AM50A	SG	Ar 50% He 50%
41.2	10.31	AM50A	SG	Ar 50% He 50%
41.3	10.66	AM50A	SG	Ar 50% He 50%

Die Bruchausgangsstelle war dabei jeweils an der geometrische Kerbe im Wurzelbereich der Schweißung, sodass die Zugproben vergleichbar zur Ermüdungsproben brechen, siehe Abbildung 43 und Abbildung 44.

Auch wurde der Einfluss der Vorwärmung auf die Zugfestigkeit der geschweißten Proben untersucht. Dazu wurden die Proben nach dem Schweißen geschnitten (s. Abbildung 37) und anschließend wärmebehandelt. Die Wärmebehandlung erfolgte in einem Ofen, bei unterschiedlichen Auslagerungstemperaturen und -zeiten. Die Erwärmungszeit ist jeweils in der Probenbezeichnung angegeben. Dabei wurde die Probenpaare auf 180°C bzw. 210°C erwärmt und nachfolgend 20 bzw. 60 Minuten bei diesen Temperaturen gehalten. Ein Probenpaar wurde dem Zugversuch auch ohne Wärmebehandlung unterzogen, um die Vergleiche ziehen zu können. Das Diagramm 1 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche. Die höchste maximale Zugkraft wurde bei der Probe S.8.1 (180°C, 20min) erzielt und betrug 12,2kN, siehe Tabelle 25 und Tabelle 26.

Tabelle 25: MIG (CMT) Schweißen / Ergebnisse Scherzugversuche - Einfluss der Wärmebehandlung (Schweißzusatz AM50A)

Probe	s.Z.1.1.	s.Z.1.2.	s.Z.1.3.	s.Z.2.1.	s.Z.2.2.	s.Z.2.3.	s.Z.4.1.	s.Z.4.2.	s.Z.4.3.	s.Z.3.1.	s.Z.3.2.	s.Z.3.3.
Probenserie	AM50A_180°C_60min			AM50A_210°C_20min			AM50A_180°C_20min			AM50A_Raumtemp.		
Ofentemperatur (°C)	180	180	180	210	210	210	180	180	180	-	-	-
WB-Zeit (min)	60	60	60	20	20	20	20	20	20	-	-	-
Probenbreite (mm)	40,30	40,20	40,10	40,30	39,80	40,25	40,50	40,15	40,11	40,00	40,25	40,10
Probendicke (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fmax (kN)	11,78	11,11	11,32	11,12	10,81	11,57	11,85	11,26	11,30	11,68	11,38	10,81
Bruchstelle	SG											
ε-Fmax (mm)	1,99	1,98	1,93	1,84	1,86	1,98	2,07	1,84	1,78	1,99	1,95	1,91
Bruchdicke (mm)	2,90	2,76	2,90	2,78	2,70	2,94	3,25	3,02	2,96	2,81	2,64	2,51
Bruchlänge (mm)	40,30	40,20	40,10	40,25	39,65	40,20	40,50	40,15	40,10	40,00	40,25	40,10
Bruchfläche (mm ²)	116,87	110,95	116,29	111,90	107,06	118,19	131,63	121,25	118,70	112,40	106,26	100,65
Bruchspannung (N/mm ²)	100,80	100,13	97,34	99,38	100,98	97,89	90,03	92,86	95,20	103,91	107,10	107,40
Schweißgeschw. (m/min)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Stromstärke (A)	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Spannung (V)	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Drahtvorschub (m/min)	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
Schutzgas	100 % Ar. 4.6.											
Schutzgasmenge (l/min)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Tabelle 26: MIG (CMT) Schweißen / Ergebnisse Scherzugversuche - Einfluss der Wärmebehandlung (Schweißzusatz AZ31X)

Probe	s.Z.5.1.	s.Z.5.2.	s.Z.5.3.	s.Z.7.1.	s.Z.7.2.	s.Z.7.3.	s.Z.8.1.	s.Z.8.2.	s.Z.8.3.	s.Z.6.1.	s.Z.6.2.	s.Z.6.3.
Probenserie	AZ31X_180°C_60min			AZ31X_210°C_20min			AZ31X_180°C_20min			AZ31X_Raumtemp.		
Ofentemperatur (°C)	180	180	180	210	210	210	180	180	180	-	-	-
WB-Zeit (min)	60	60	60	20	20	20	20	20	20	-	-	-
Probenbreite (mm)	40,10	40,14	40,20	40,15	40,15	40,20	40,35	40,20	40,15	40,10	39,70	39,30
Probendicke (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2,00	2,00
Fmax (kN)	11,69	11,19	11,44	11,73	11,43	11,79	12,20	11,59	10,96	11,71	11,15	10,79
Bruchstelle	GW	SG										
ε-Fmax (mm)	2,15	2,00	2,03	2,04	1,94	1,93	2,11	2,02	2,08	2,20	2,13	2,41
Bruchdicke (mm)	1,91	2,71	2,81	2,81	2,99	3,05	2,76	2,62	2,57	2,99	3,00	2,80
Bruchlänge (mm)	40,10	40,10	40,15	40,15	40,15	40,10	40,20	40,15	40,10	40,10	39,20	39,30
Bruchfläche (mm ²)	76,59	108,67	112,82	112,82	120,05	122,31	110,95	105,19	103,06	119,90	117,60	110,04
Bruchspannung (N/mm ²)	152,63	102,97	101,40	103,97	95,21	96,40	109,96	110,18	106,35	97,67	94,81	98,06
Schweißgeschw. (m/min)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Stromstärke (A)	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Spannung (V)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Drahtvorschub (m/min)	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Schutzgas	100 % Ar. 4.6.											
Schutzgasmenge (l/min)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

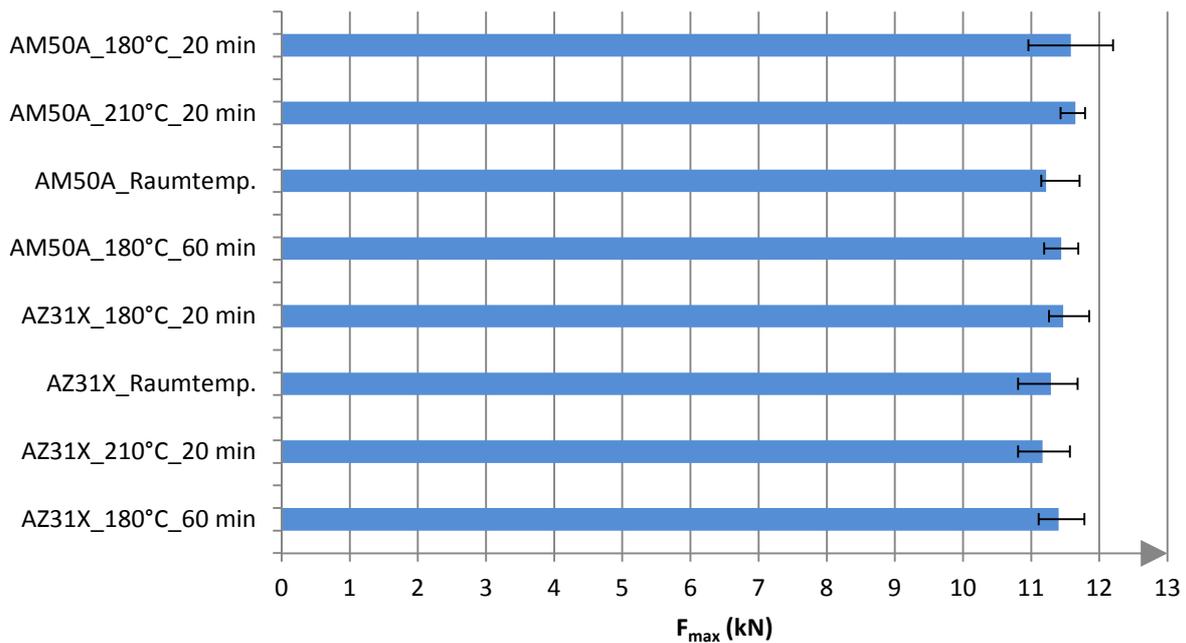


Diagramm 1: MIG (CMT) Schweißungen max. Zugkraft - bei unterschiedlichen Auslagerungszeiten- und -temperaturen

Es wurden Proben mit unterschiedlichen Schweißzusätzen - AM50A und AZ31X - verglichen. Der Einfluss des Schweißzusatzes auf F_{max} - liegt bei allen Proben etwas über 11kN - war nicht ausgeprägt. Es konnte also kein charakteristischer Einfluss der Erwärmung im Lackierprozess auf die max. Zugkraft im Zugscherversuch festgestellt werden. Die Balken in Diagramm 1 stellen den Mittelwert aus jeweils drei Proben pro Schweißung dar. Weiters wurden auch die positive und negative Streuung eingezeichnet.

4.1.1.2 Ermüdungsversuche

Die Belastung der Proben erfolgte im Zugschwellbereich, wobei das Spannungsverhältnis R (Unter-/Oberspannung) 0,1 betrug. Die Versuche wurden mit der Resonanzprüfmaschine RUMUL Testronic 150 durchgeführt. Die Probenform ist in Abbildung 38 dargestellt. Abbildung 41 zeigt die Einspannung der Proben für die Dauerschwingversuche. Dabei wurden Blechplättchen beigelegt, sodass die Probe rein auf Scherzug beansprucht werden, Abbildung 41.

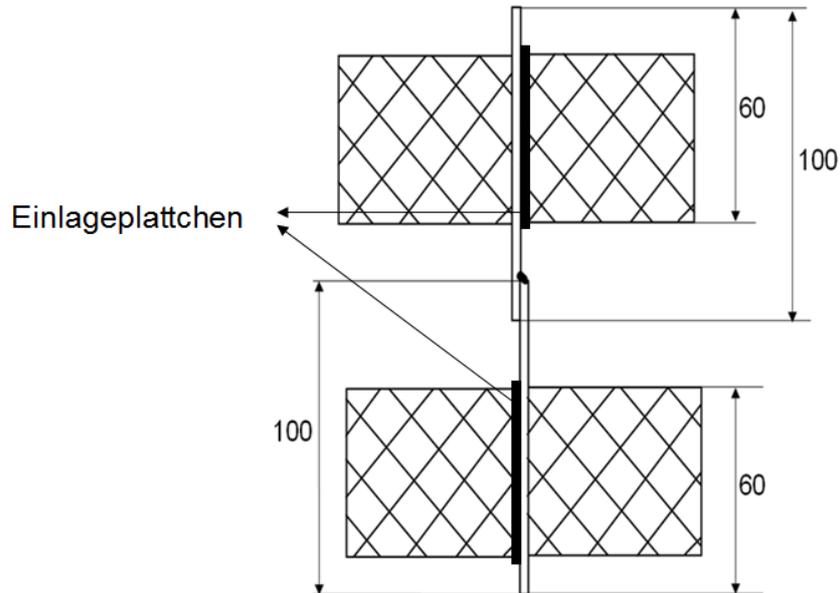


Abbildung 41: Einspannung der Proben bei den durchgeführten Dauerschwingversuchen

Es wurden insgesamt 28 Dauerschwingversuche am MIG(CMT) geschweißten Proben durchgeführt, s. Tabelle 27 und 28.

Tabelle 27: Ergebnisse der Dauerschwingversuche Schweißzusatz AM50A

Probe	F_m (kN)	F_a (kN)	F_{sum} (kN)	N
C.d.1.2.AM	0.92	0.75	1.67	333869
C.d.3.2.AM	0.92	0.75	1.67	228219
C.d.3.3.AM	0.92	0.75	1.67	362412
C.d.1.1.AM	1.2	0.98	2.18	221133
C.d.4.1.AM	1.2	0.98	2.18	132424
C.d.1.3.AM	1.5	1.23	2.73	95901
C.d.3.1.AM	1.5	1.23	2.73	72513
C.d.4.2.AM	1.5	1.23	2.73	99429
C.d.2.1.AM	1.7	1.39	3.09	33224
C.d.2.3.AM	1.7	1.39	3.09	20031
C.d.4.3.AM	1.7	1.39	3.09	45930
C.d.5.1.AM	1.7	1.39	3.09	59045
C.d.2.2.AM	1.8	1.47	3.27	15134
C.d.5.2.AM	1.8	1.47	3.27	27965
C.d.5.3.AM	1.8	1.47	3.27	37930

$$F_{sum} = F_m + F_a$$

F_m – Mittelkraft

F_a – Kraftausschlag

N – Lastspielzahl bis zum Bruch

Tabelle 28: Ergebnisse der Dauerschwingversuche - Schweißzusatz AZ31X

Probe	F_m	F_a	F_{sum}	N
C.d.6.2.AZ	0.92	0.75	1.67	598484
C.d.8.2.AZ	0.92	0.75	1.67	246266
C.d.8.3.AZ	0.92	0.75	1.67	241710
C.d.6.1.AZ	1.2	0.98	2.18	173600
C.d.6.3.AZ	1.5	1.23	2.73	64855
C.d.8.1.AZ	1.5	1.23	2.73	94870
C.d.9.2.AZ	1.5	1.23	2.73	91662
C.d.7.1.AZ	1.7	1.39	3.09	51720
C.d.7.3.AZ	1.7	1.39	3.09	36981
C.d.9.3.AZ	1.7	1.39	3.09	75834
C.d.10.1.AZ	1.7	1.39	3.09	66307
C.d.7.2.AZ	1.8	1.47	3.27	36549
C.d.10.2.AZ	1.8	1.47	3.27	61379
C.d.10.3.AZ	1.8	1.47	3.27	61828

Die mit AZ31X geschweißten Proben weisen etwas höhere Schwingfestigkeit im Bereich höherer Belastung auf als die mit AM50A geschweißten, Diagramm 2. Bei geringeren Belastungen (niedrigeres F_{sum}) sind die erreichten Lastspielzahlen bis zum Bruch auf vergleichbarem Niveau.

Die Wöhlerlinien wurden als Ausgleichsgeraden konstruiert. Der Verhältnis der Unter-/Oberspannung betrug 0,1.

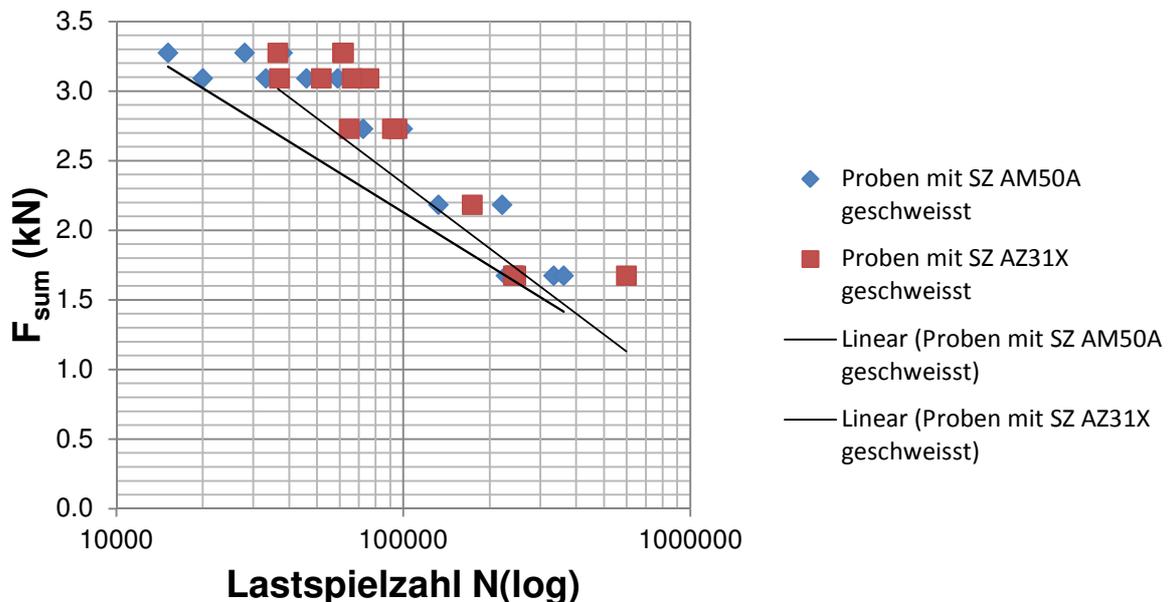


Diagramm 2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche AZ31 Proben geschweißt mit Schweißzusätzen AM50A und AZ31X

Nach den Ermüdungsversuchen wurden von jeder Probe 2 Schliffe hergestellt. Die Probenform und die Schliffentnahme sind in der Abbildung 42 dargestellt.

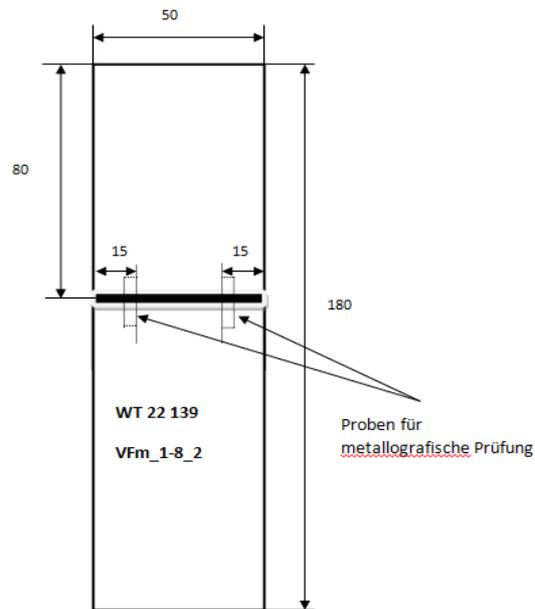


Abbildung 42: Probenform und Schliffentnahme Ermüdungsversuch

Bei allen Schliffen sind die Ermüdungsbrüche immer von der geometrischen Kerbe der Schweißnahtwurzel ausgegangen und durch das Schweißgut verlaufen. Weiters konnten bei vielen Schliffen die Risse an der Nahtflanke am unteren Blech beobachtet werden, siehe Abbildung 43 und 44.

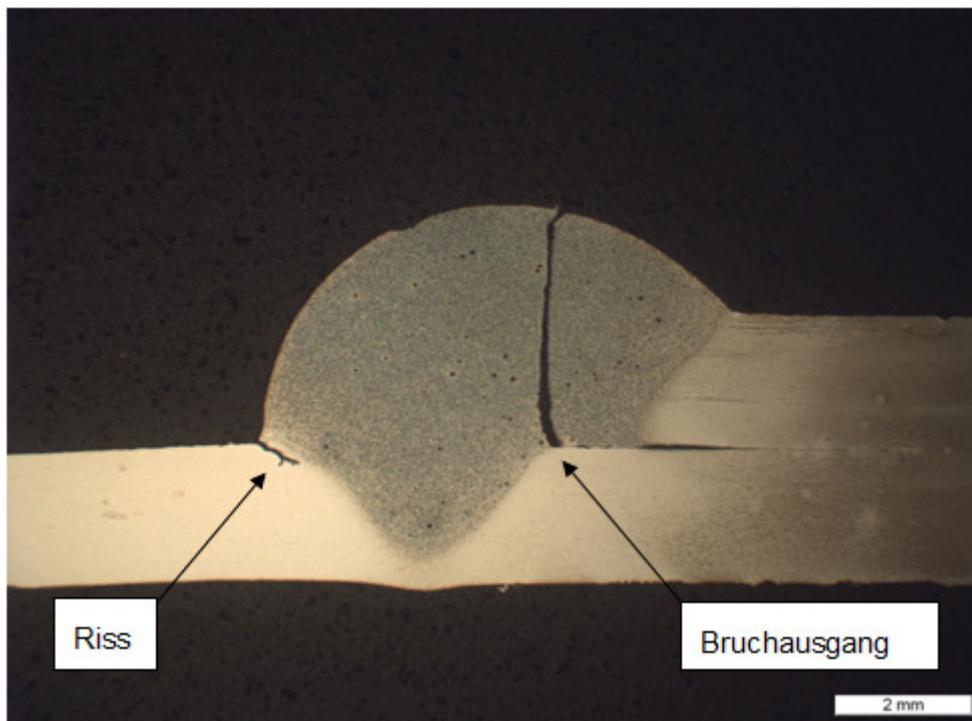


Abbildung 43: Schliff - Probe C.d.10.2

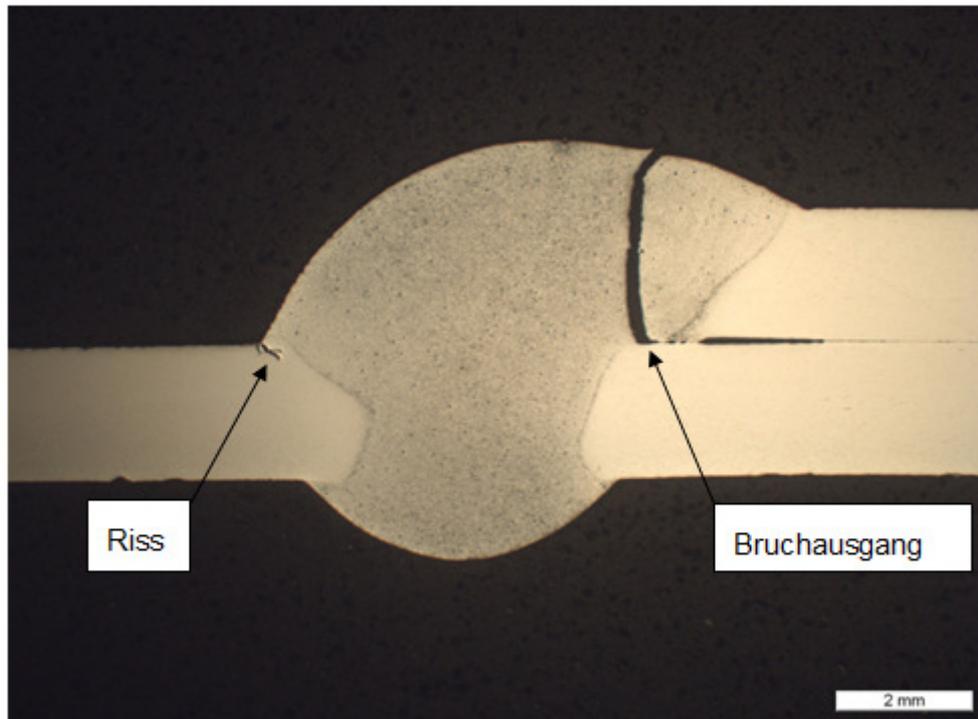


Abbildung 44: Schliff - Probe C.d.5.3

4.1.1.3 Härtemessung

In den Abbildung 45 ist der Querschliff einer Mg-Mg Verbindung (Probe 35, Schliff 1) mit der Lage der Härtemesslinie dargestellt. Abbildung 46 zeigt den Härteverlauf nach Vickers HV0,5. Es sind keine größeren Schwankungen in der Härte zu beobachten. Das Schweißgut AM50A ist mit ca. 50 HV0,5 etwas weicher als der unbeeinflusste Grundwerkstoff AZ31 (etwas unterhalb 60 HV0,5).

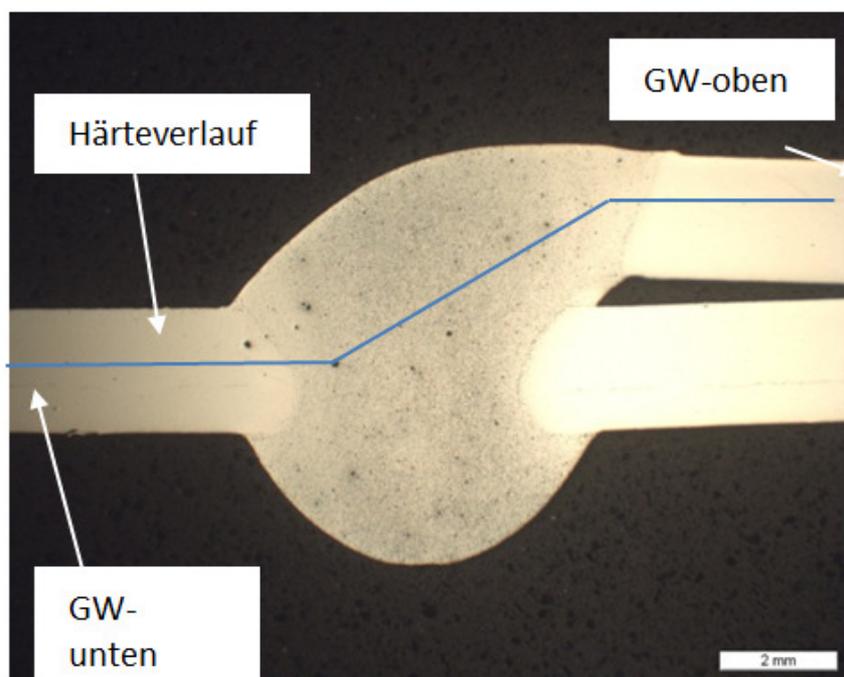


Abbildung 45: Querschliff - Probe 35 - Schliff 1

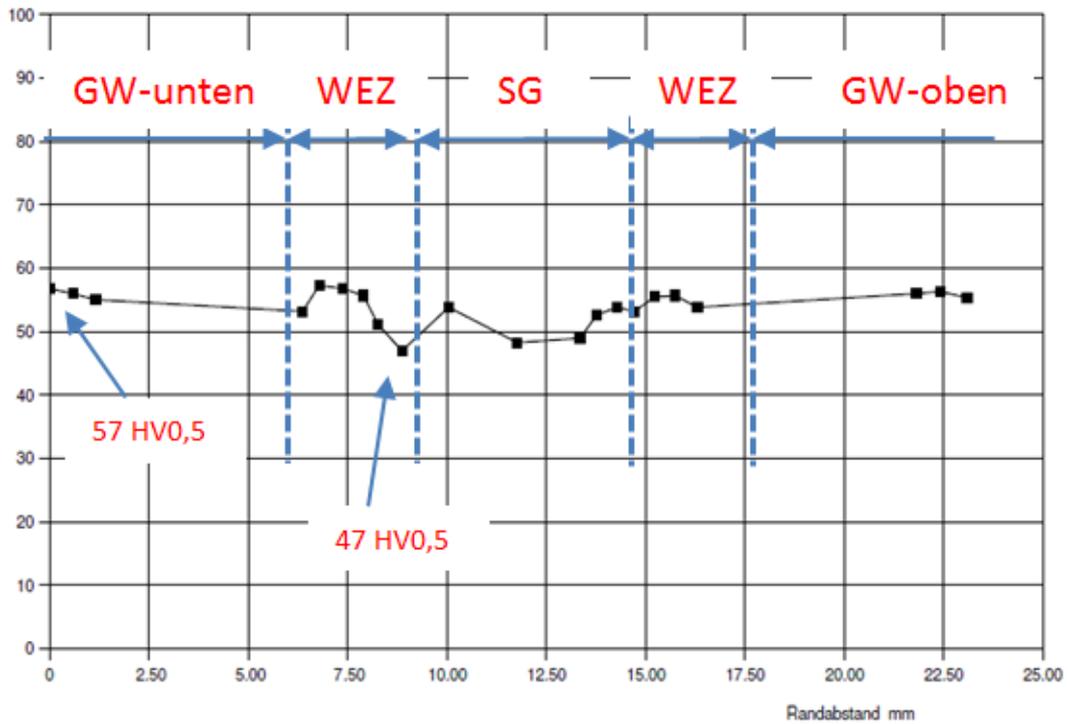


Abbildung 46: Härteverlauf - Probe 35 - Schliff 1 (Schweißzusatz AM50A)

4.1.1.4 Nahtgeometrie im Querschliff

Die Querschliffe unterschiedlicher Proben wurden vermessen, siehe Abbildung 47. Dabei wurde die Schweißnahtüberhöhung „a“ sowie die Flankenwinkel α und β bestimmt.

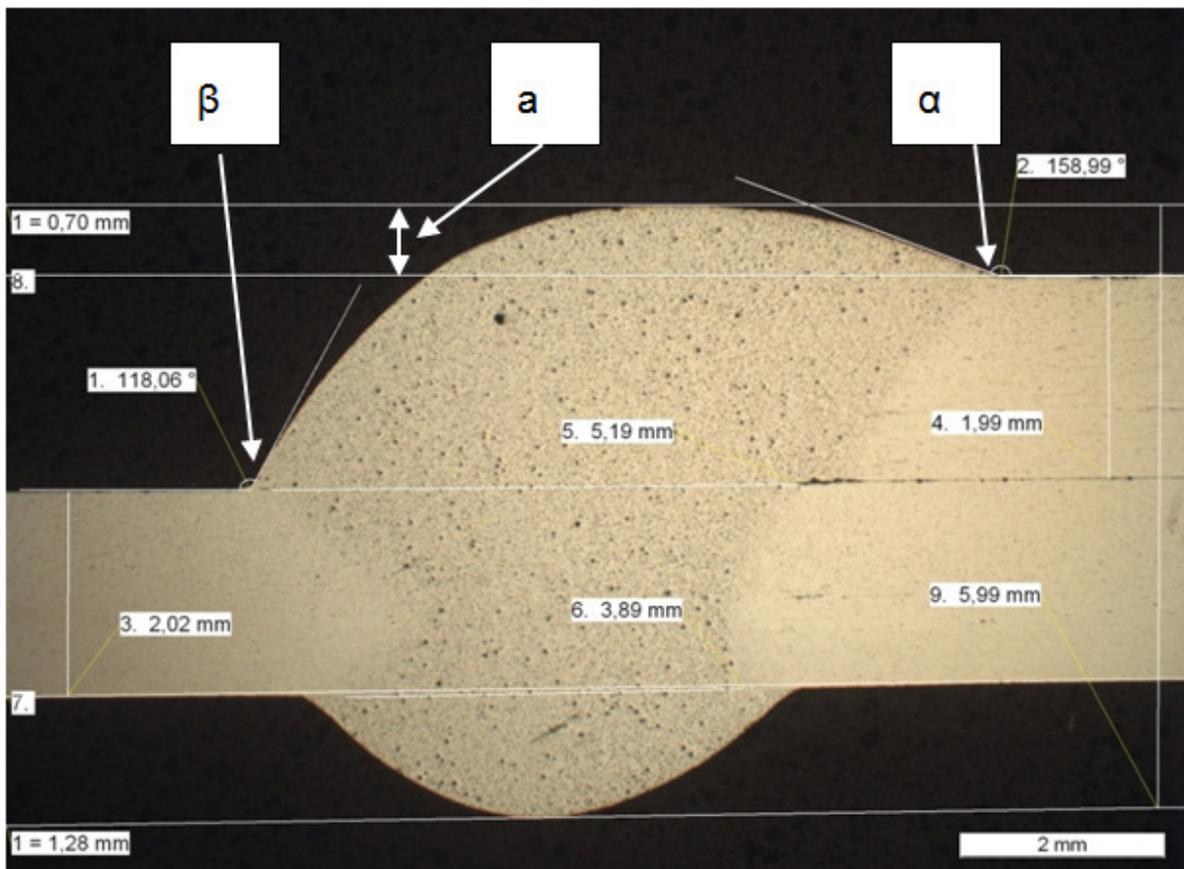


Abbildung 47: Querschliff - Probe 29 (Schweißzusatz AM50A)

Diagramm 3 und Diagramm 4 zeigen die Ergebnisse der Vermessung der Nahtüberhöhung (a), sowie der Flankenwinkel (α und β) in Abhängigkeit vom verwendeten Schweißzusatz und dem Schutzgas. Der Flankenwinkel α liegt bei allen Proben bei ca. 140° und der Flankenwinkel β bei ca. 100° . Bei Schweißzusatz AZ31X konnte eine um ca. 0,4mm größere Nahtüberhöhung festgestellt werden. Demnach hat weder die Schutzgaszusammensetzung (Ar 4.6 bzw. 50%He-50%Ar) noch der Schweißzusatz (AZ31X bzw. AM50A) einen signifikanten Einfluss auf die Nahtgeometrie.

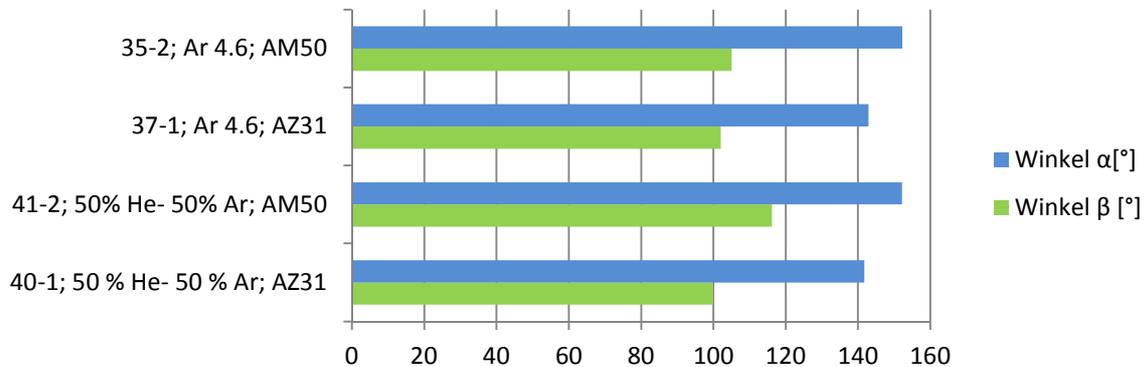


Diagramm 3: Vergleich des Ausfließverhaltens bzw. der Nahtwinkeln von Mg-Schweißnähten

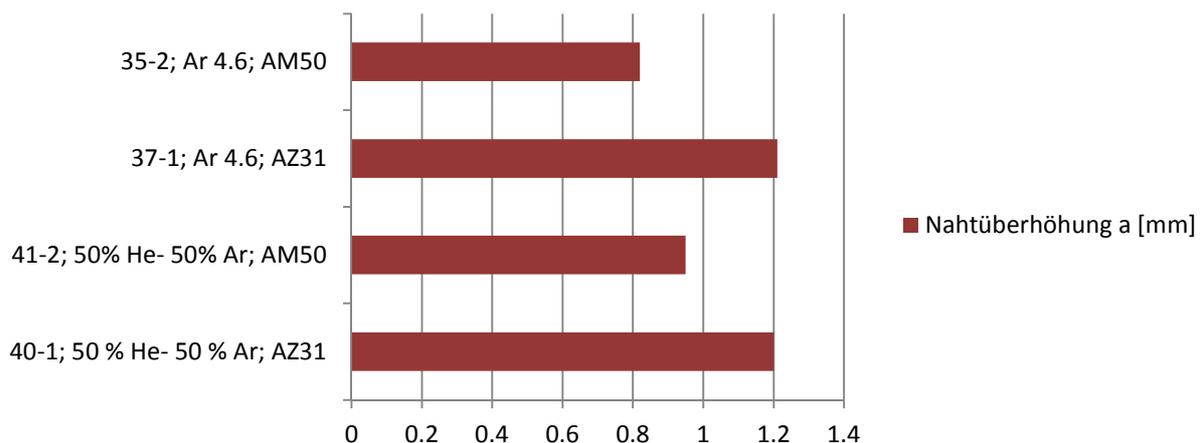


Diagramm 4: Vergleich der Nahtüberhöhungen von Mg-Schweißnähten

In der Abbildung 48 ist der Querschliff einer mit dem Schweißzusatz AZ31X geschweißten Probe (Nr. 40), sowie die Positionen für die Metallographischen Aufnahmen dargestellt. Es wurden 3 Bereiche der Verbindung untersucht: Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Anbindungsbereich zwischen dem Schweißgut und WEZ. Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der Grundwerkstoff ein feinkörniges Gefüge (Korngröße einige μm bis $20\mu\text{m}$) aufweist, Abbildung 50. In der WEZ ist es zu etwas größerem Korn (etwa 15 bis $40\mu\text{m}$), Abbildung 49 (rechts) gekommen. In den Abbildung 49 und Abbildung 50 sind auch die Zwillingsgrenzen zu sehen.

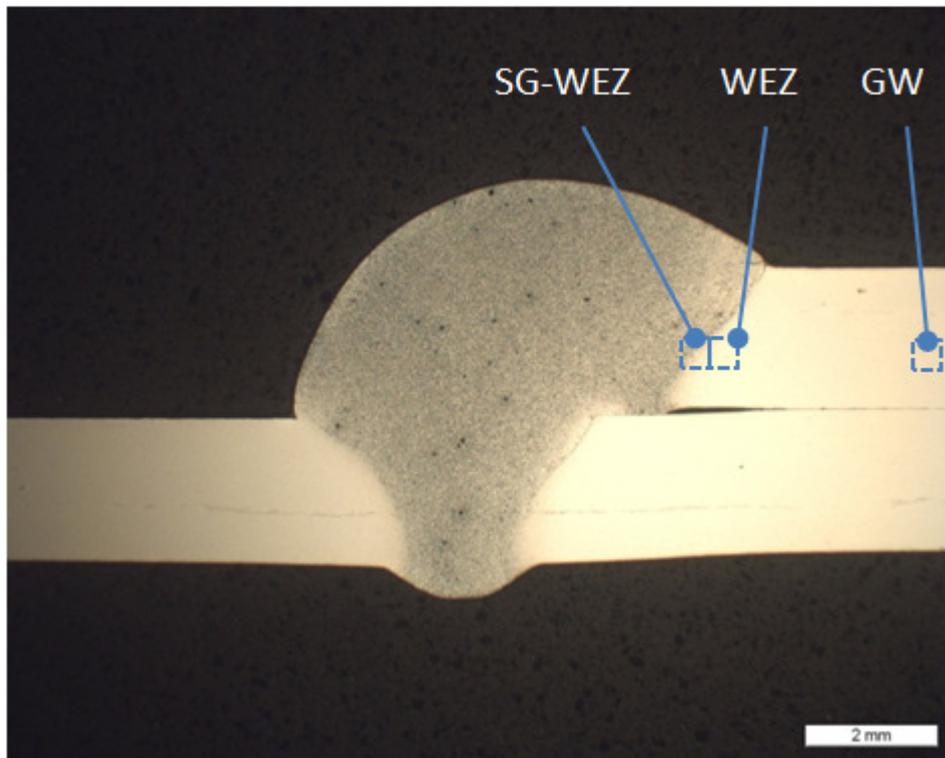


Abbildung 48: Querschliff Probe 40 - Schliff 2

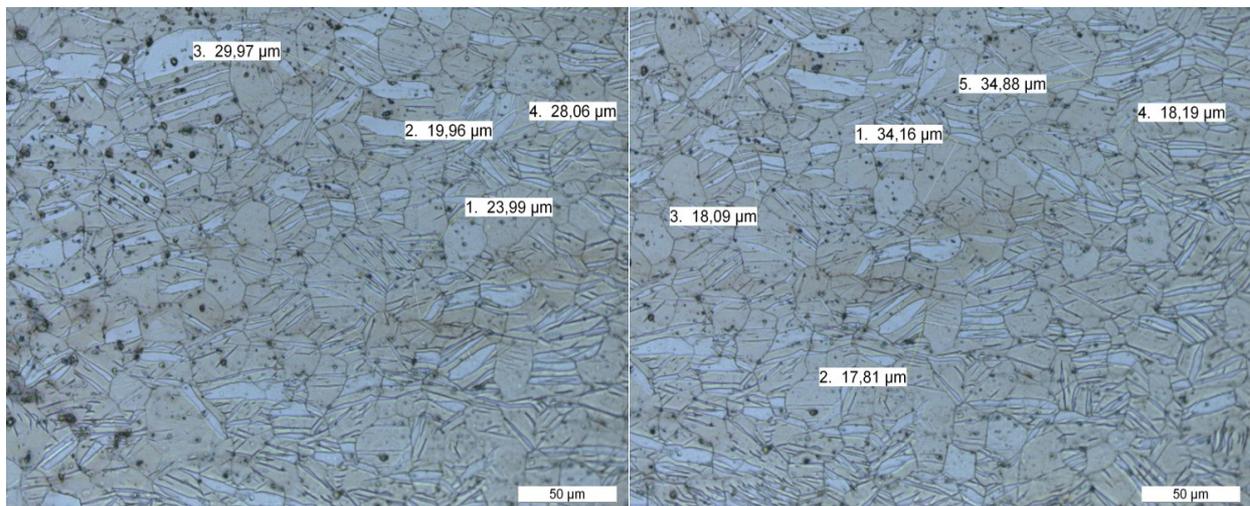


Abbildung 49: Probe 40 - Schliff 2 / Korngrößenvermessung; (links) Fusionslinie WEZ-SG - (rechts) WEZ

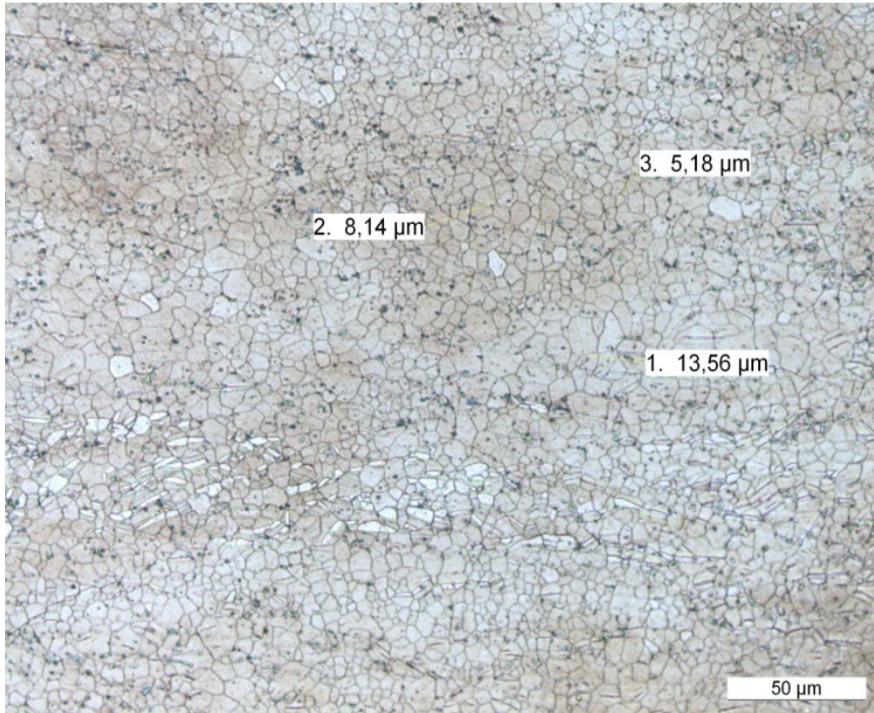


Abbildung 50: Probe 40 - Schliff 2 / Korngrößenvermessung Grundwerkstoff AZ31

4.1.2 FSW-Schweißverfahren

4.1.2.1 Schweißparameter und Probenherstellung

Bei der Probenherstellung wurden folgende Schweißparameter verwendet: Drehzahl 1200min^{-1} , Vorschubgeschwindigkeit 400mm/min . Die Eintauchtiefe des FSW Werkzeuges betrug $2,8\text{mm}$, Abbildung 51.



Abbildung 51: FSW Schweißung - Probe 54

4.1.2.2 Scherzugversuche

Es wurden insgesamt 3 Zugversuche durchgeführt (Probenform, siehe Abbildung 37). Die Bruchkräfte lagen hierbei zwischen ca. $10,2$ und $11,1\text{kN}$, wobei die Bruchlage stets in der Schweißnaht gelegen ist. Die erreichten Kräfte sind vergleichbar (bei gleicher Probenbreite und Blechdicke) mit dem Mg-Mg MIG(CMT) Schweißungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 29 zusammengefasst. Im Diagramm 5 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Bezeichnung	Fmax (kN)	Mittelwert (kN)	Abweichung oberer Wert	Abweichung unterer Wert
Probe FSW 54.1	10,23			
Probe FSW 54.2	10,72	10,69	0,42	0,47
Probe FSW 54.3	11,11			

Tabelle 29: Ergebnisse der Zugversuche am FSW Proben Mg-Mg

Legende	Bezeichnung	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	Fmax kN	Info	ϵ -Fmax mm
■	54.1	2,00	40,00	10,23	Bruch SG	2,21
■	54.2	2,00	40,00	10,72	Bruch SG	2,22
■	54.3	2,00	40,00	11,11	Bruch SG	2,26

Seriengrafik:

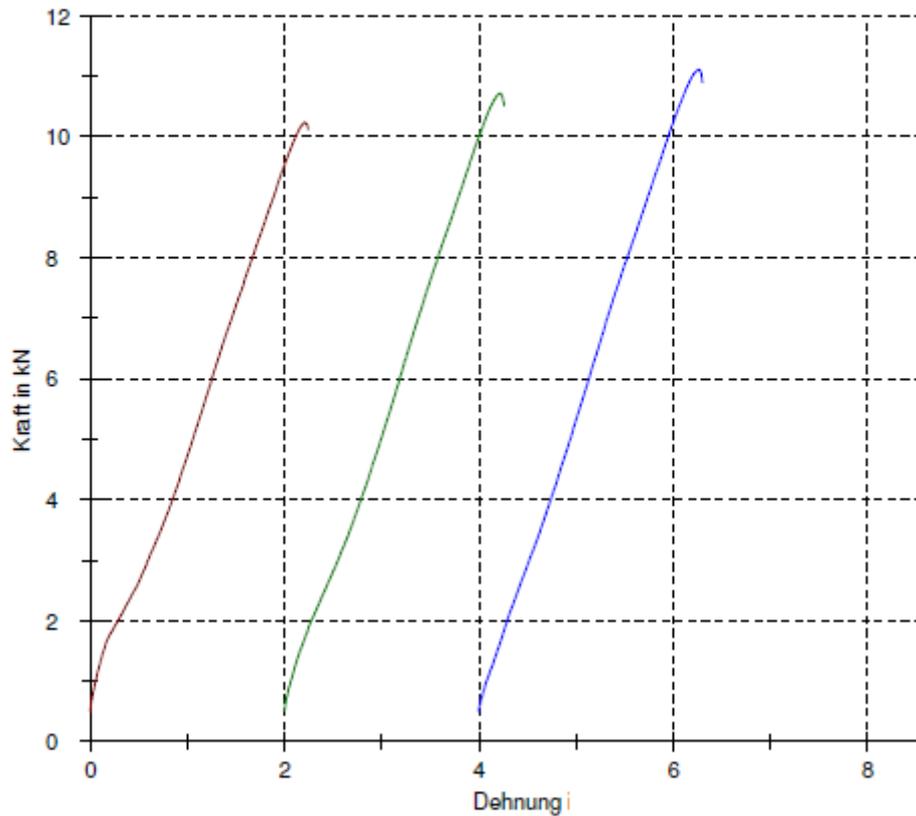


Diagramm 5: Ergebnisse der Scherzugversuche am FSW Proben Mg-Mg

4.1.2.3 Querschliffe und Nahtgeometrie

In Abbildung 52 ist ein ungeätzter Querschliff einer FSW-Schweißung (Probe 52) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es zur Ausbildung einer homogenen Rührzone ohne Porenbildung bei einer Anbindungslänge von ca. 4,4mm gekommen ist.

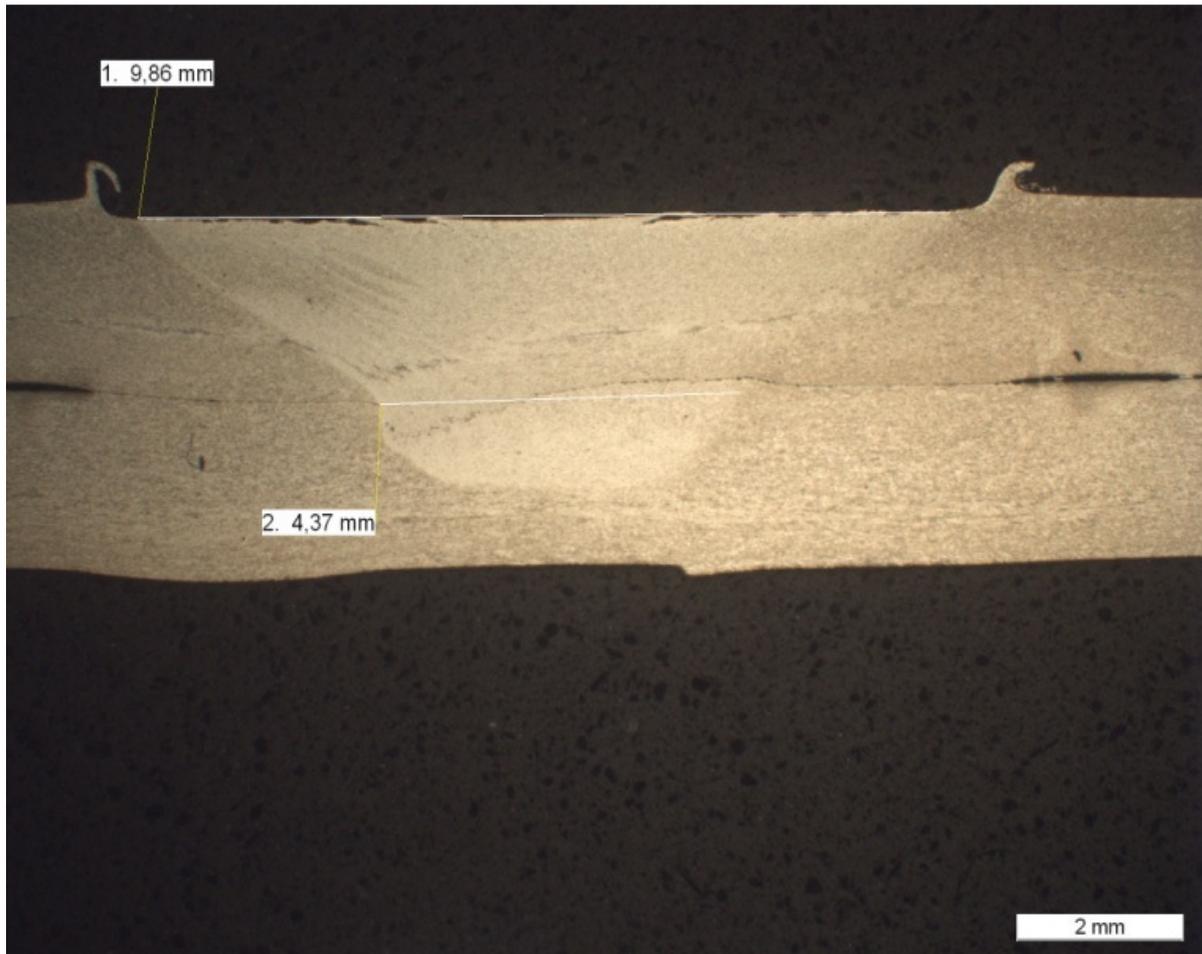


Abbildung 52: Querschliff FSW Mg-Mg (Probe 54)

4.1.3 Halbhohlstanznieten

Mit diesem Fügeverfahren wurden die Proben sowohl mit als auch ohne Klebstoff Betamate 1620 gefügt. Jede Zugprobe wurde durch einen genau in der Mitte positionierten Stanzniet verbunden. Danach wurden die Proben einem Scherzugversuch unterworfen und die Zugkräfte ermittelt. Zuvor wurde eine Vorversuchsserie zur Bestimmung der optimalen Fügeparameter durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Niet-Matrizen Kombinationen getestet. Es wurde festgestellt, dass die Niet-Matrize Kombination Niet C5x6, Matrize SM0900084 die besten metallografischen Ergebnisse im Schliff ergibt (für Details siehe Ergebnisse im Teil „Querschliffe“). Die Verklebung der Proben erfolgte ohne Einstellen der Klebspaltdicke, d.h. undefinierter Klebstoffauftrag, wie im Rohbau üblich. Die Probenform ist in der Abbildung 39 gezeigt.

Insgesamt wurden 6 Scherzugversuche durchgeführt - 3 mit und 3 ohne Klebstoff. In der Tabelle 30 sind die Stanznietparameter (sowie die Aushärteparameter Klebstoff) und die maximalen Zugkräfte angeführt.

Tabelle 30: Ergebnisse der Zugversuche Stanznieten

Niet	Matrize	Druck (bar)	Aushärtete mperatur (°C)	Probenbezeichnung	F_{max} (kN)	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.7	16.69	Mit ausgehärtetem Klebstoff
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.8	15.04	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.9	15.88	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.10	3.53	Ohne Klebstoff
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.11	3.67	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.12	3.68	

Alle Verbindungen weisen ein Versagen durch Ausknöpfen des Stanznietes aus dem unteren (matrizenseitigen) Blech auf, wobei es zuerst zum Kippen des Nietes am oberen (stempelseitigen) Blech und zur Rissbildung unter dem Nietkopf gekommen ist. Anschließend erfolgt das Ausknöpfen des Nietfußes aus dem unteren Blech. Dabei blieb der Stanzniet im oberen Blech sitzen, Abbildung 53. Bei den nicht geklebten Verbindungen ist es zum Versagen bei deutlich kleineren Belastungen gekommen, wobei der Schließkopf durch den Niet „mitgenommen“ wurde, Abbildung 54.

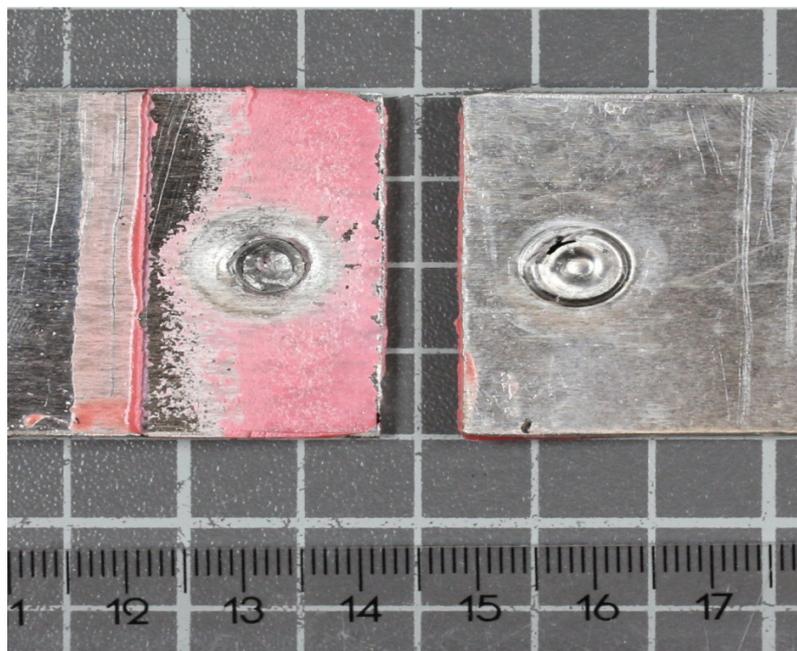


Abbildung 53: Probe N.Z.7 Bruchfläche Halbhohlstanznieten mit Klebstoff

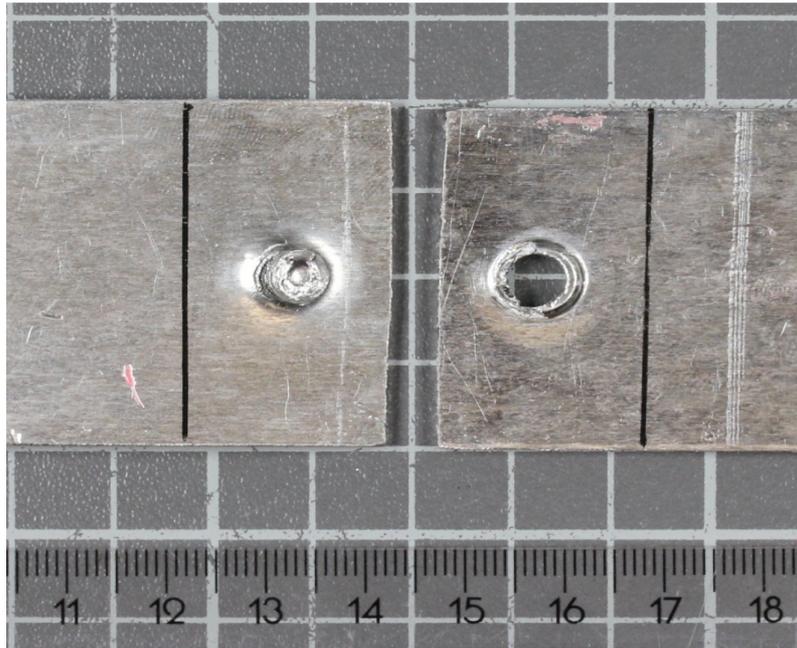


Abbildung 54: Probe N.Z.10 Bruchfläche Halbhohlstanznieten ohne Klebstoff

4.1.3.1 Querschliffe

Die qualitätsbestimmenden Merkmale einer Stanznietverbindung ermittelt man im Schliffbild. Bei der Vorversuchsserie wurden verschiedene Matrizen (DZ0902000 Dornmatrize, FM1002022 Flachmatrize, SM0900084 Standardmatrize) und Nieten (C5x6, P5x6, K5x7) getestet. Bei allen Versuchen versagte das matrizenseitige Mg-Blech im Schließkopfbereich (Risse und Abbröckelungen). Am besten hat sich die Kombination C5x6, SM0900084 bei 230bar bewährt, wobei hier auch die Risse am Schließkopf zu sehen waren. Die Querschliffe einer solchen Stanznietverbindung sind in der Abbildung 55 zu sehen. In Abbildung 56 sind Risse im Schließkopf einer Verbindung mit Matrize FM1002022, Niet P5x6 und Druck 230 bar zu sehen.

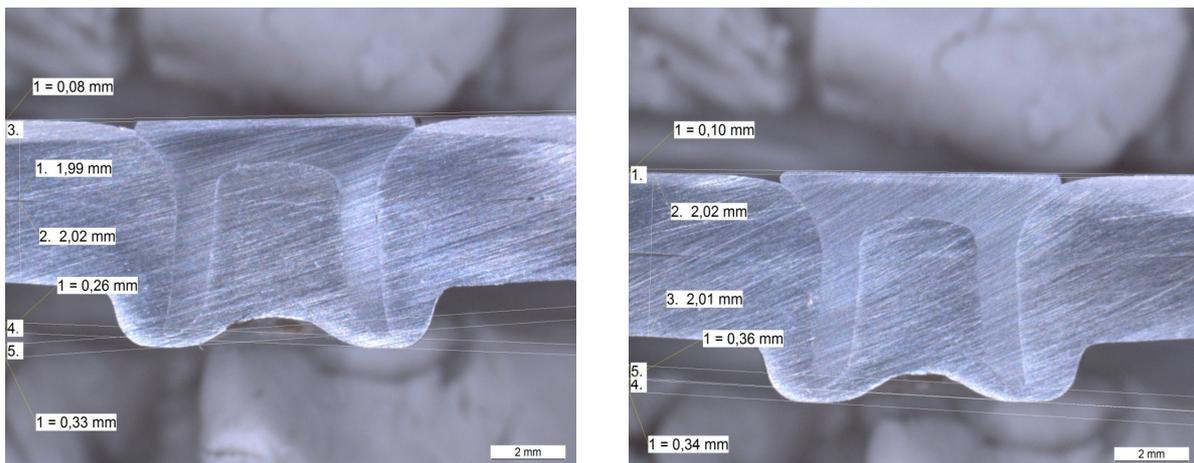


Abbildung 55: Stanznieten_SM0900084_C5x6_230bar

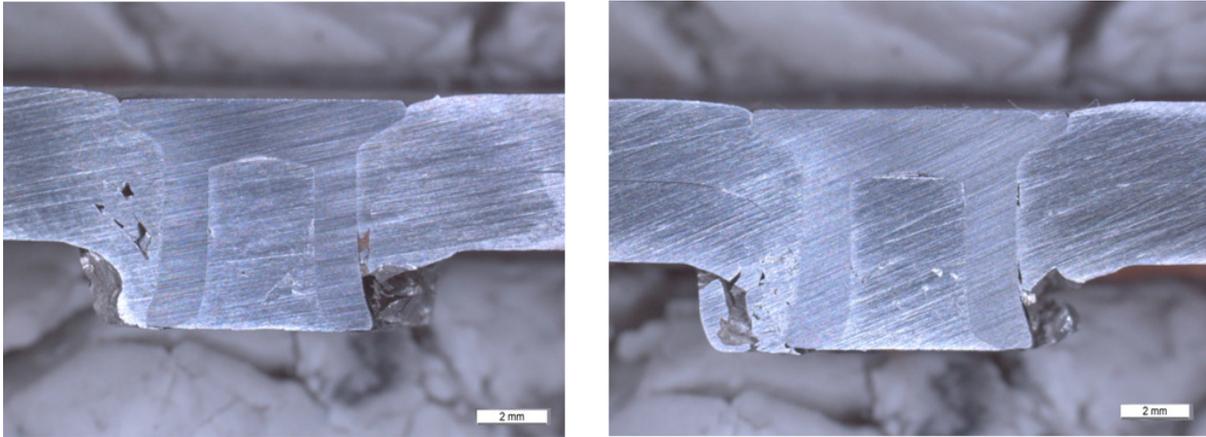


Abbildung 56: Stanznieten_FM1002022_P5x6_230bar

4.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse - Fügen Mg-Mg

4.2.1 Zugversuche

Von den hier untersuchten Fügeverfahren für Mg-Mg erreicht das Halbhohlstanznieten mit Kleben die höchste max. Zugkraft (ca. 16kN). Das bedeutet, dass der Klebstoff Betamate 1620 die Bruchkraft um ca. 12kN erhöht. Hochgerechnet auf die Festigkeit ergibt das 15MPa, das entspricht 51% der angegebenen Klebstoffstofffestigkeit. Die CMT-Schweißungen (Überlappnaht) liegen im Bereich von ca. 11kN, wobei mit Ar 4.6 Schutzgas im Vergleich zu Ar-He (50/50%) etwas höhere Festigkeiten erreicht werden. Die FSW-Proben erreichen eine max. Zugkraft von ca. 11kN, d.h. diese liegen im Bereich der MIG(CMT) geschweißten Proben. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Diagramm 6 und Tabelle 31 ersichtlich.

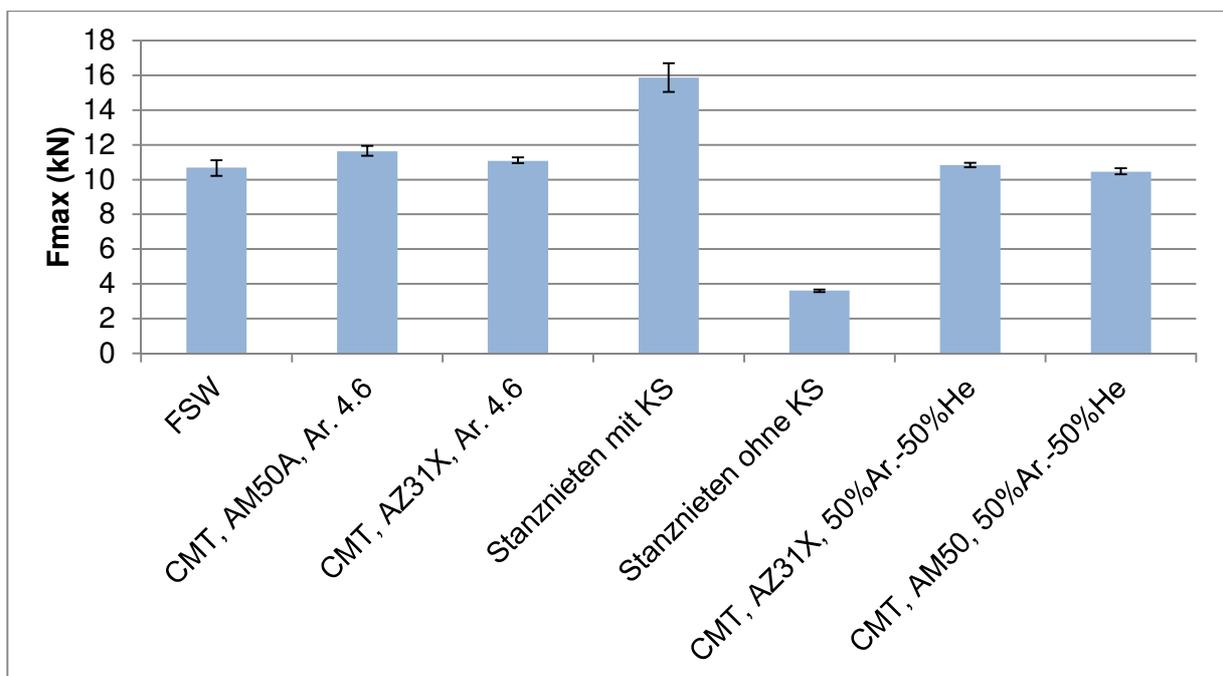


Diagramm 6: Ergebnisse Zugscherversuche (Mittelwert aus 3 Messungen und max./min. Wert).

Tabelle 31: Ergebnisse der Zugscherversuche der untersuchten Fügeverfahren Mg-Mg

Fügeverfahren	Probenbezeichnung	F _{max} (kN)	Klebstoff	Mittelwert (kN)	Abweichung max Wert	Abweichung min. Wert
Stanznieten mit KS	N.Z.7	16,69	mit			
	N.Z.8	15,04	mit	15,87	0,82	0,83
	N.Z.9	15,88	mit			
Stanznieten ohne KS	N.Z.10	3,53	ohne			
	N.Z.11	3,67	ohne	3,63	0,05	0,10
	N.Z.12	3,68	ohne			
FSW	Probe 54.1	10,23				
	Probe 54.2	10,72	ohne	10,7	0,42	0,47
	Probe 54.3	11,11				
CMT, AM50, Ar 4.6	Probe 34.1	11,94	ohne			
	Probe 34.2	11,37	ohne	11,62	0,32	0,25
	Probe 34.3	11,56	ohne			
CMT, AZ31, Ar 4.6	Probe 36.1	11,64	ohne			
	Probe 36.2	11,67	ohne	11,57	0,10	0,16
	Probe 36.3	11,41	ohne			
CMT, AZ31, 50% Ar-50% He	Probe 40.1		ohne			
	Probe 40.2	10,96	ohne	10,83	0,13	0,13
	Probe 40.3	10,7	ohne			
CMT, AM50, 50% Ar-50% He	Probe 41.1	10,38	ohne			
	Probe 41.2	10,31	ohne	10,45	0,21	0,14
	Probe 41.3	10,66	ohne			

4.2.2 Dauerschwingversuche CMT Mg-Mg im Vergleich zu Al-Al

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Ermüdungsversuche an Mg-Mg MIG(CMT)-Schweißungen sind in Diagramm 7 jenen der Al-Al MIG(CMT)-Schweißungen aus der Diplomarbeit Vujić [27] gegenübergestellt. In beiden Fällen verwendete man die gleiche Probenform (s. Abbildung 37), wobei die Mg-Mg Schweißungen an AZ31 Blechen mit zwei Schweißzusatzwerkstoffen (AZ31X und AM50A) durchgeführt wurden. Im Falle der Al-Al Schweißungen (+DBL 4951.60 Legierung) wurde der Schweißzusatz AlSi5 (ϕ 1mm) verwendet, wobei jedoch der Spalt zwischen den Blechen variierte (Mg-Mg Schweißungen wurden ohne Spalt ausgeführt). Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit der Al-Al Schweißungen besser ist als jene der Mg-Mg Schweißungen.

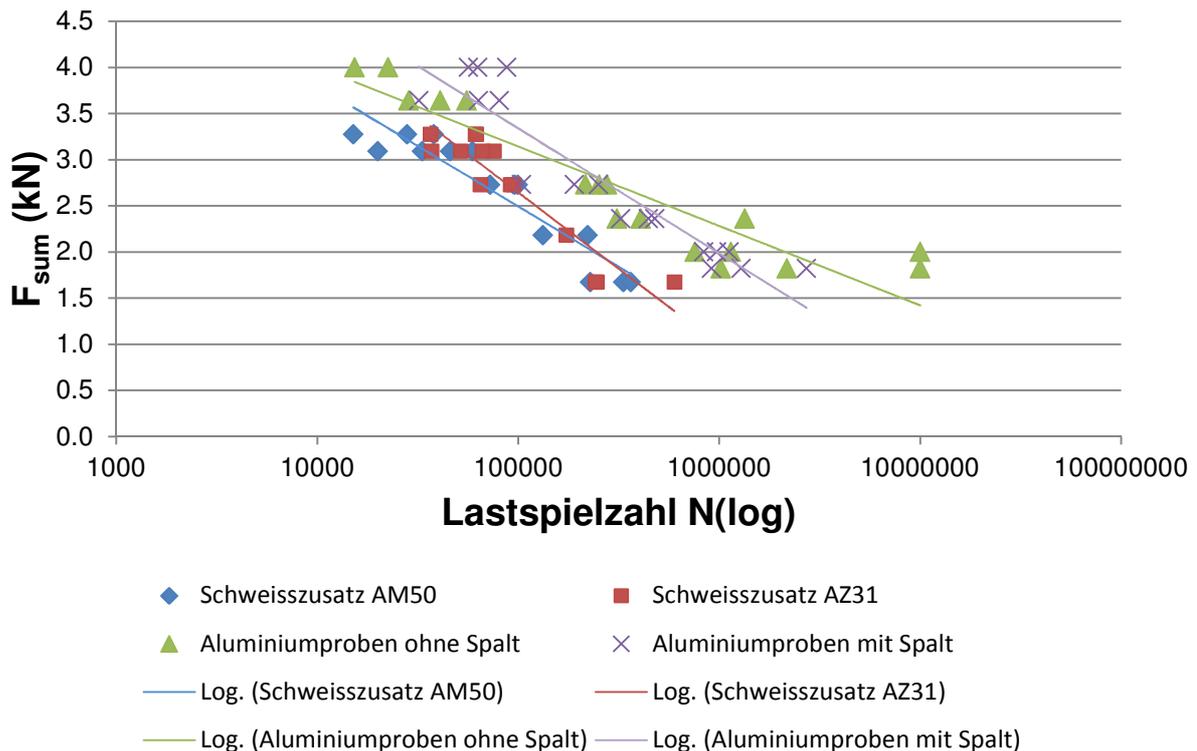


Diagramm 7: Dauerschwingversuche Magnesium- und Aluminiumschweißproben

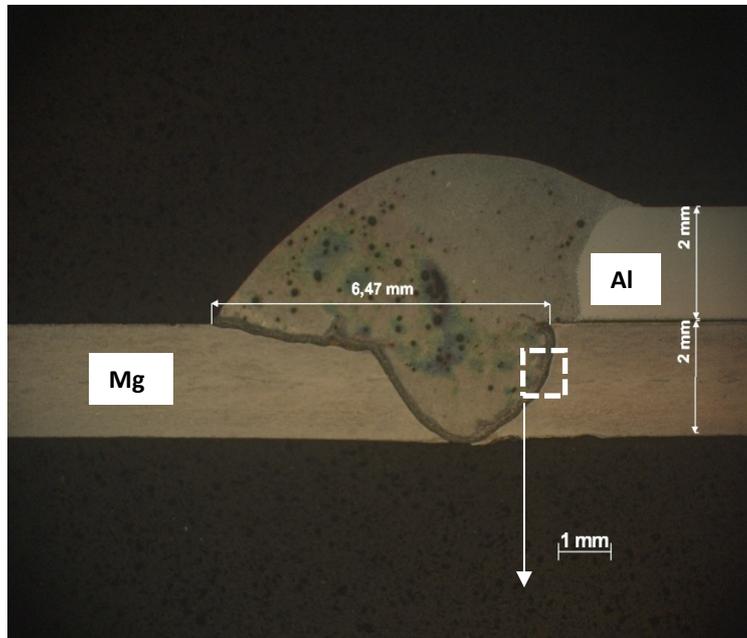
4.3 Artfremdes Fügen (Mg-Al)

4.3.1 MIG (CMT) – Schweißverfahren

Die ersten Versuche wurden manuell unter Anwendung der vorliegenden drei Schweißzusätze (AlSi5, AZ31X und AM50A) durchgeführt. Die Proben wurden sowohl mit der Anordnung „Al-Blech oben/Mg-Blech unten“ als auch „Al-Blech unten/Mg-Blech oben“ geschweißt. Die Blechdicken betragen hierbei immer jeweils 2mm. Während die ersten Versuche mit AlSi5 eine optisch in Ordnung bewertbare Schweißung zeigten, konnten mit den Mg-Schweißzusätzen keine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Blechen erzeugt werden (das Schweißgut „springt“ von der Aluminiumoberfläche). Aus diesem Grund untersuchte man die Schweißverbindung Al-Mg mit Schweißzusatz AlSi5 genauer in den Mikroschliffen, mittels EDX und Mikrosonde.

4.3.1.1 Querschliffe und EDX-Analyse

Die mikroskopische Untersuchung mehrerer Al-Mg Schweißschliffe (Schweißzusatz AlSi5) zeigte, dass auch diese Schweißungen keine stoffschlüssige Verbindung der Bleche ermöglichen. Etwa 100-200µm von der Fusionslinie des Al-Schweißgutes zu Mg-Grundwerkstoff im Al-Schweißgut erstreckt sich (fast parallel zur Fusionslinie) durchgehend ein Riss mit stellenweise kurzen Querrissen, Abbildung 57.



CMT konventionell
Kennlinie für AlSi5
Zusatz: AlSi5; Ø1,0mm
Schutzgas: Argon 4.6
Strom=73A
Spannung=8,2V
Oberfläche gebürstet
und mit ISO-Propanol
gereinigt

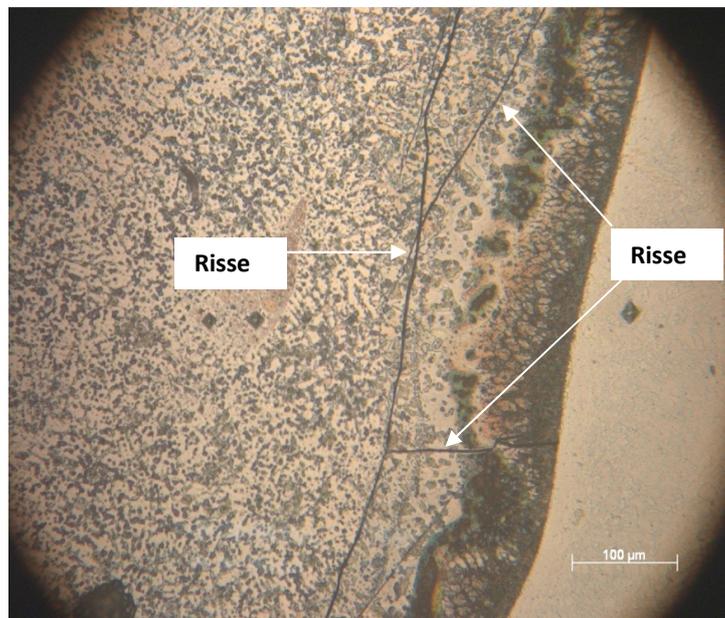


Abbildung 57: Al-Mg Schweißung - Querschliff 5-2

Die EDX-Analyse zeigte, dass der lange „parallel“ zur Fusionslinie verlaufende Riss in einem Gefügebereich mit vergleichbaren Al- und Mg-Anteilen liegt, Abbildung 58. Die genaue Untersuchung dieses Schliffes wurde mittels Mikrosonde durchgeführt.

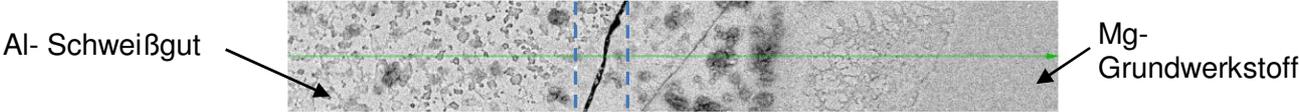
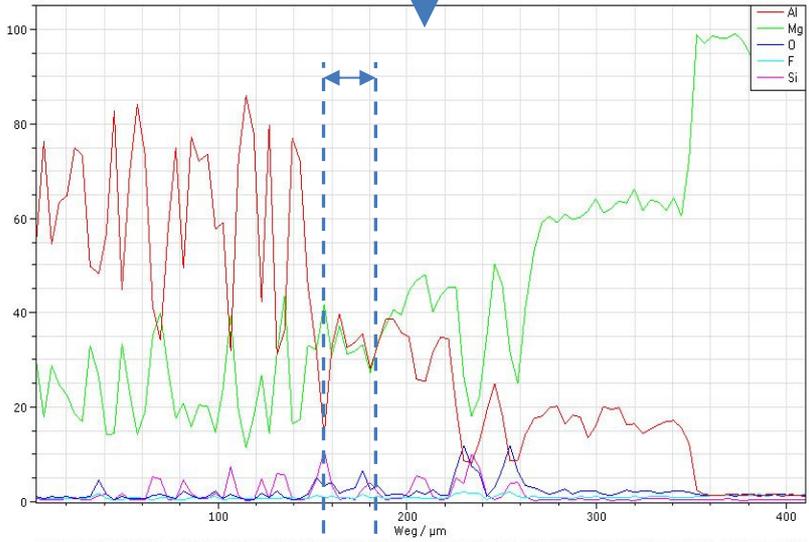
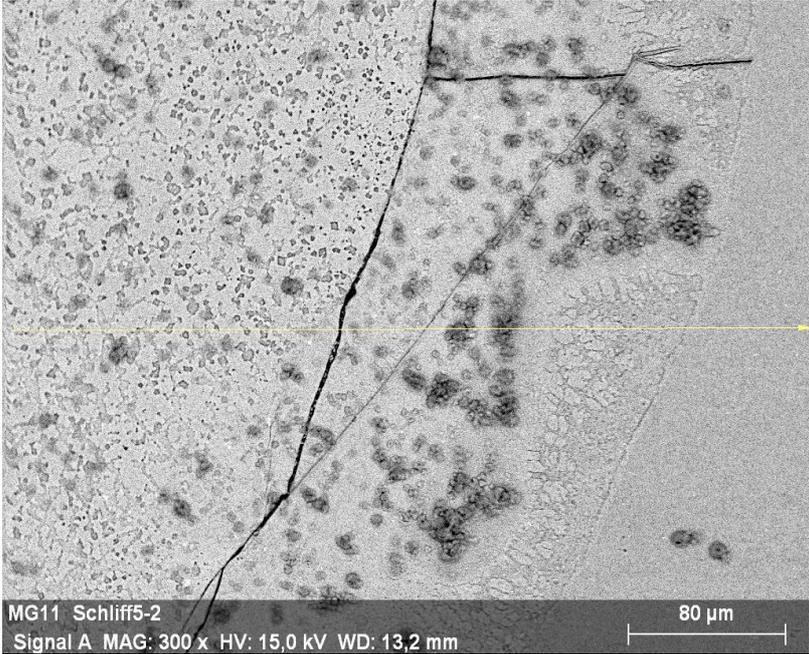


Abbildung 58: EDX-Analyse Mg-Al Schweißung, Schweißzusatz AISi5

4.3.1.2 Mikrosondenanalyse und Härtemessung

Bei der Mikrosondenanalyse (EPMA) des Mg-Al Schliffes 5-2 wurde durch die Messungen der chemischen Zusammensetzung an einigen Punkten festgestellt, dass der durchgehende Riss in einem Gefügebereich verläuft in dem die Zusammensetzung an den beiden Rissufern bei 49-53,3% Al und 45-50,5% Mg (IMP06-IMP10); 59,4-60,7% Al und ca. 37% Mg (IMP11-IMP12) bzw. 85,8-89,6% Al und 8,3-12,1% Mg (IMP18-IMP20) liegt, s. Abbildung 59.

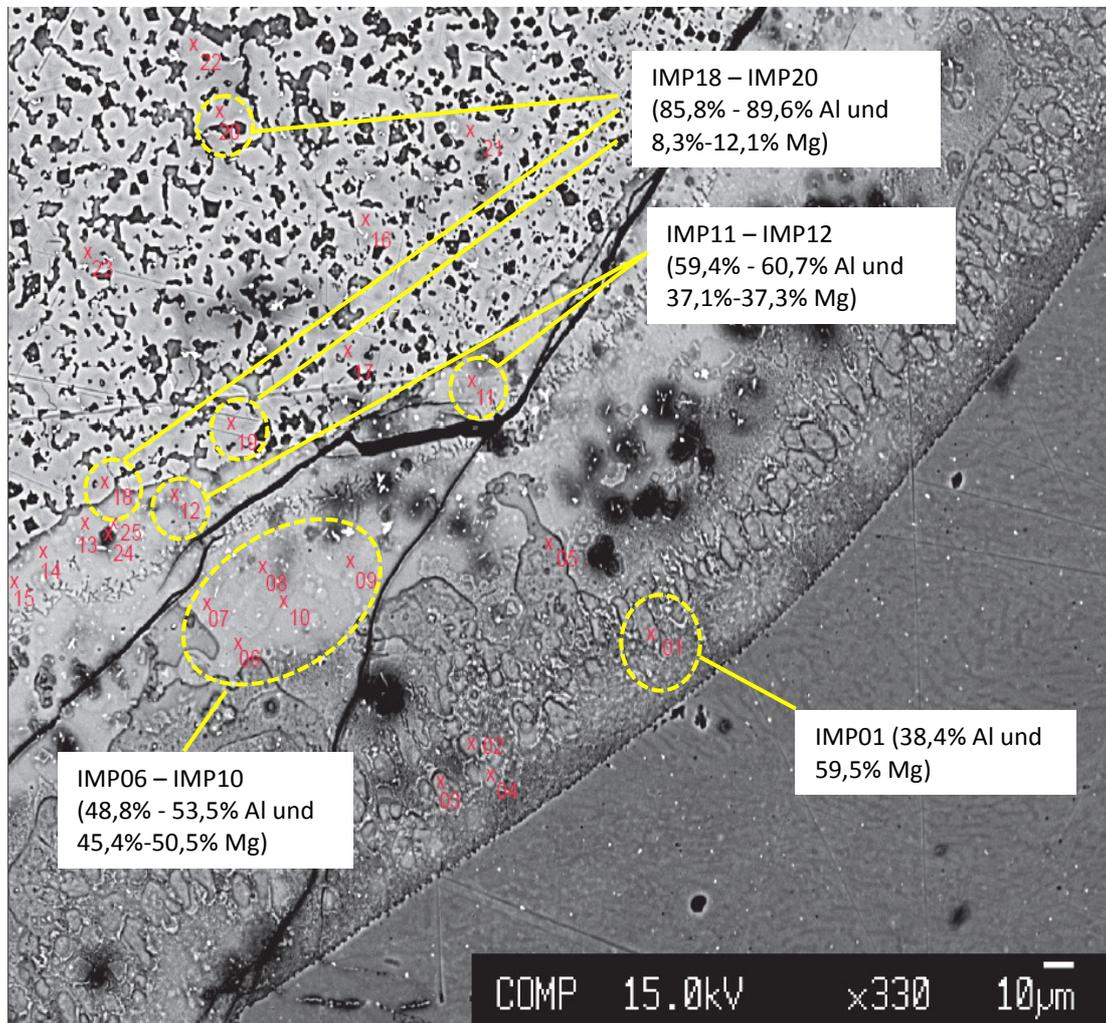


Abbildung 59: Messpunkte - Mikrosondenanalyse EPMA, Schliff 5-2

Die EPMA-Ergebnisse sind in der Tabelle 32 zusammengefasst. Gemeinsam mit den Elementen, deren Anteil nicht angegeben wurde (Cu, Pb, Ni usw.) ergibt sich die Zusammensetzung von 100%.

Tabelle 32: Ergebnisse der Mikrosondenanalyse EPMA

Punkt (vgl. Abbildung 59)	Mass. (%)				
	Al	Mn	Mg	Zn	Si
IMP01	38,36	0,04	59,48	0,50	0,08
IMP06	51,42	-	49,53	0,50	0,11
IMP07	53,05	0,06	48,58	0,53	0,08
IMP08	53,50	0,05	46,72	0,32	0,11
IMP09	50,86	0,13	45,40	0,46	2,49
IMP10	48,77	1,46	50,48	0,55	0,12
IMP11	59,37	0,03	37,28	0,28	0,16
IMP12	60,66	0,04	37,14	0,32	0,12
IMP18	87,60	0,11	10,10	0,05	0,42
IMP19	89,58	0,10	8,29	0,14	0,08
IMP20	85,80	0,05	12,05	0,08	1,40

Die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen (HV0,01) am Übergang Al-Schweißgut zu Mg-Grundwerkstoff (Abbildung 60) sind in der Abbildung 61 zu sehen. Die maximale Härte der intermetallische Phasen in Rissnähe beträgt ca. 317 HV0,01. Vom gleichen Aufhärtungsniveau wurde z.B. in [5] berichtet, Aufhärtung über 300HV0,2 im Al-Schweißgut (knapp neben der Fusionslinie) (Al-Schweißgut: AlSi30; Mg-Grundwerkstoff AZ91).

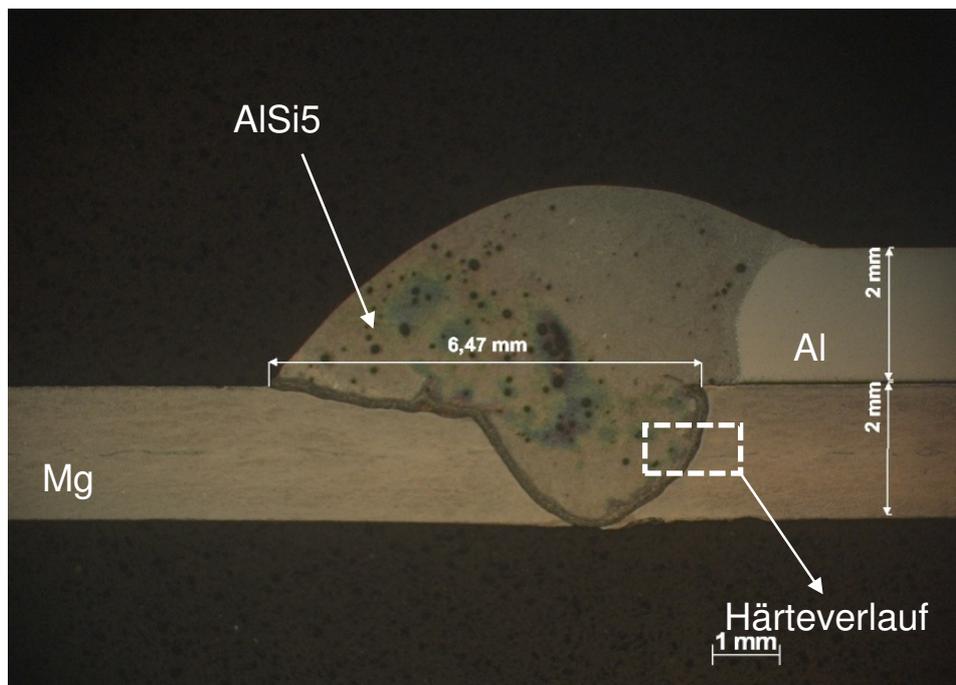


Abbildung 60: Schliff 5-2, Schweißzusatz AlSi5, Schutzgas Ar4.6

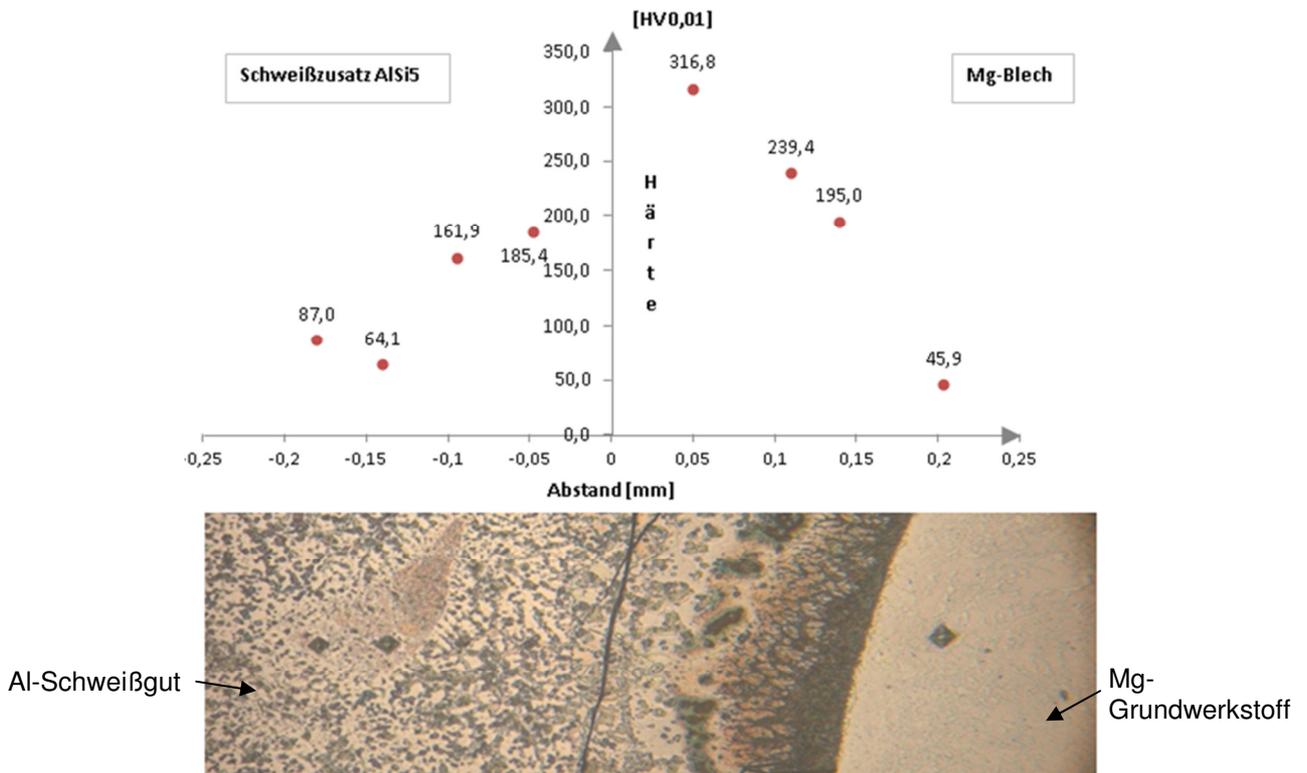


Abbildung 61: Härteverlauf HV0,01 - Schliff 5-2

Die Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die Al- und Mg-Verteilung im Schweißgutbereich bzw. im Bereich der Fusionslinie AlSi5-Schweißgut zu Mg-Blech.

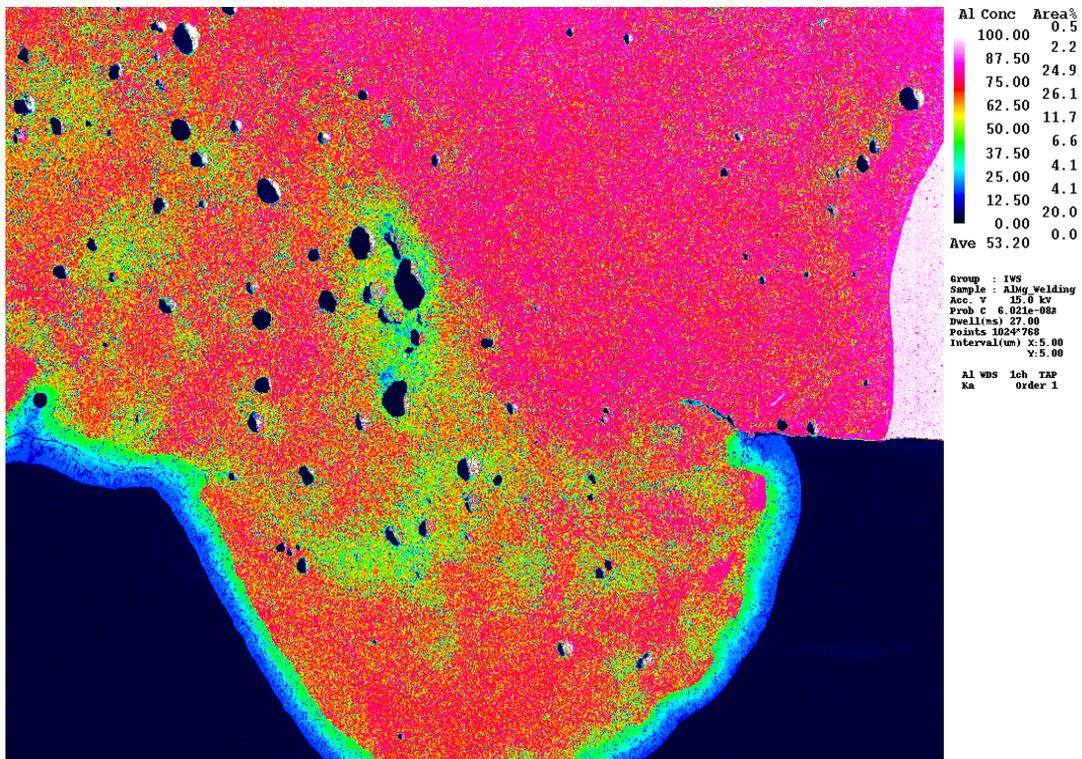


Abbildung 62: Al-Verteilung, Al-Mg Schweißung, Schliff 5-2

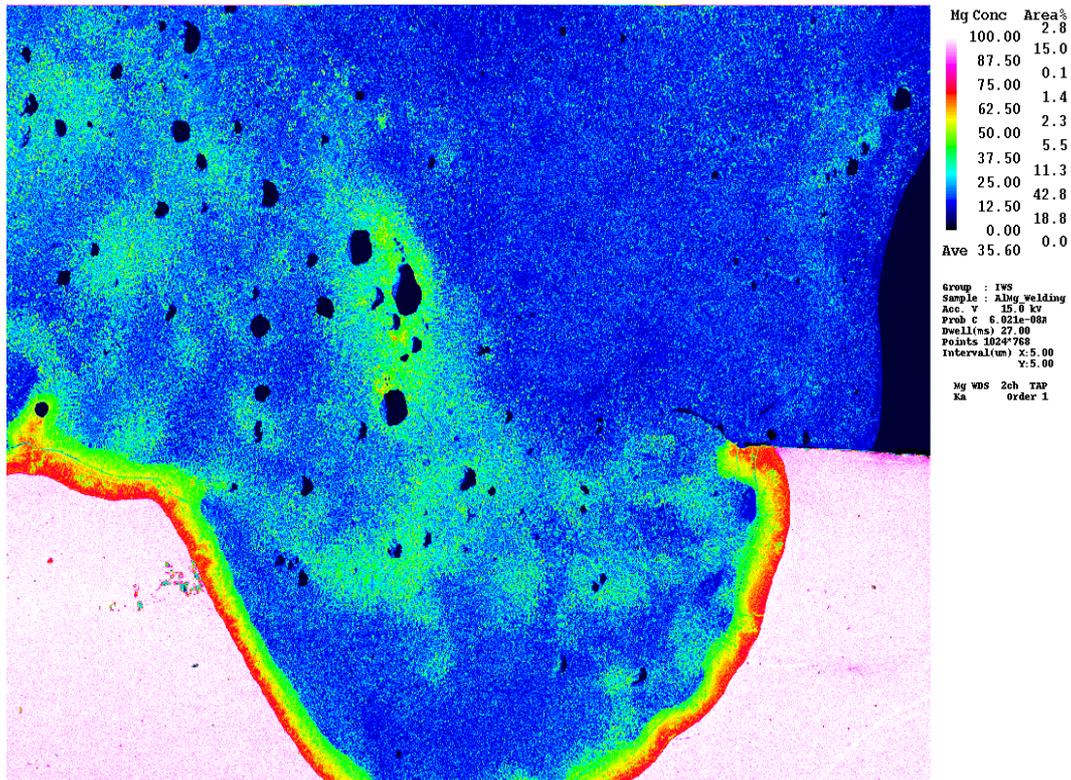


Abbildung 63: Mg-Verteilung, Al-Mg Schweißung, Schliff 5-2

Auch durch eine vereinfachte metallurgische Betrachtung dieser Problemstellung (binäres Al-Mg System, s. Abbildung 64), kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es im Bereich der Risse zur Ausbildung der spröden intermetallischen Phase $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ gekommen sein muss, die zusammen mit den Schweißbeigenspannungen zum Bruch der Verbindung führten. Die negative Auswirkung dieser Phasen auf die Schweißverbindung wurde auch in der Literatur [5] angeführt.

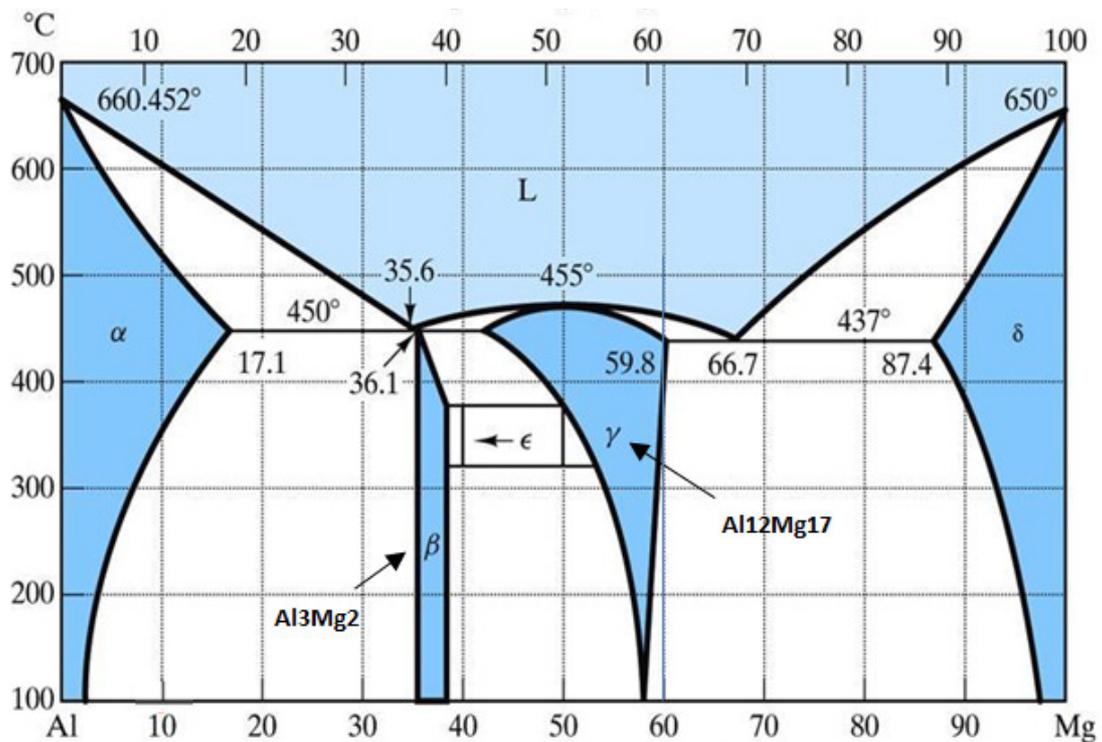


Abbildung 64: Vereinfachtes Zweiphasendiagramm Al-Mg

4.3.2 FSW Schweißverfahren

Alle Versuche wurden ohne Parameteroptimierung durchgeführt. Es wurden sowohl FSW (Liniennähte) als auch FSSW (Punktschweißungen) hergestellt.

Parameter Liniennähte (FSW):

Anordnung: Mg oben / Al unten

Pin Durchmesser: 4,5mm

Pinlänge: 2,8mm

Schulterdurchmesser: 11,0mm (in Schulter ist Spiralnut eingefräst)

Drehzahl: 1200U/min

Vorschubgeschwindigkeit: 400mm/min

Parameter Punktschweißungen (FSSW):

Drehzahl: 1200min⁻¹

Eindringtiefe: 2,8mm

4.3.2.1 Zugversuche

4.3.2.1.1 FSW – Liniennaht

Es wurde eine Schweißung hergestellt (3 Proben wurden geprüft). Die Bleche konnten erfolgreich miteinander verbunden werden, wobei eine starke seitliche Verdrängung von Magnesium zustande kam. Im Zugversuch knöpft am häufigsten Mg aus Al aus. Eine Ausnahme war das Versagen im Anbindungsbereich Mg-WEZ zu Mg-SG. Die ermittelten Zugkräfte liegen im Bereich von ca. 4kN, Tabelle 33. In der Abbildung 65 ist eine Mg-Al Überlappschweißung (Probe 50) zu sehen, wobei das Mg-Blech oben und das Al-Blech unten liegt.

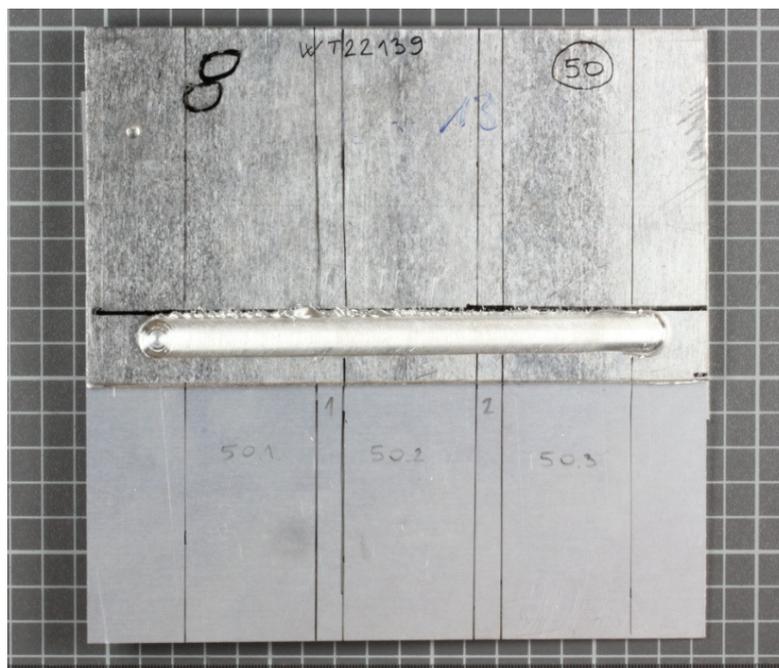


Abbildung 65: FSW Schweißung Mg-Al, Probe 50

Tabelle 33: Ergebnisse der Zugscherversuche FSW - Probe 50

Probenbezeichnung	F _{max} (kN)	Anordnung
Probe 50.1	3,99	Mg-oben/Al-unten
Probe 50.2	4,07	
Probe 50.3	4,13	

4.3.2.2 FSSW - Punktschweißungen

Es wurden insgesamt 12 Zugversuche an FSSW Proben durchgeführt. Dabei wurden 6 Proben (jeweils 3 Al-oben und 3 Mg-oben) mit und 6 ohne Zugabe vom Klebstoff gefügt. Am besten hat sich die Kombination mit Klebstoff und Mg-Blech oben bewährt. Dabei sind die ermittelten Zugkräfte bei ca. 9,5kN gelegen. Die mit Klebstoff gefügten Proben weisen eine viel höhere maximale Zugkraft aus. Zum Vergleich wurde eine Al-Al Probe ohne Klebstoff geschweißt. Diese hielt im Zugversuch viel höhere Kraft aus und erreichte 4,8kN. Aufgrund starker Pinverschmutzung bei der Anordnung „Mg-oben“ soll immer zur Reinigung ein „Blindpunkt“ im Al-Blech gemacht werden.

Tabelle 34: Ergebnisse der Zugversuche FSSW Proben Al-Mg

Zugversuche FSSW Proben Al-Mg			
Probenbezeichnung		F _{max} (kN)	Anordnung
Z.FSW 1	ohne Klebstoff	1.11	Al oben
Z.FSW 2		1.44	
Z.FSW 3		2.51	
Z.FSW 4	mit Klebstoff	8.37	
Z.FSW 5		8.67	
Z.FSW 6		8.52	
Z.FSW 7	ohne Klebstoff	0.91	Mg oben
Z.FSW 8		2.27	
Z.FSW 9		1.66	
Z.FSW 10	mit Klebstoff	10.92	
Z.FSW 11		9.07	
Z.FSW 12		9.65	

4.3.2.3 Querschliffe, REM, EDX und Härtemessungen

In Abbildung 66 sind zwei Schliffe von Probe 53 dargestellt (Schliff 53-1 und 53-5). In beiden Bildern ist sichtbar, dass bei der Probenherstellung nur eine formschlüssige Verbindung entsteht.

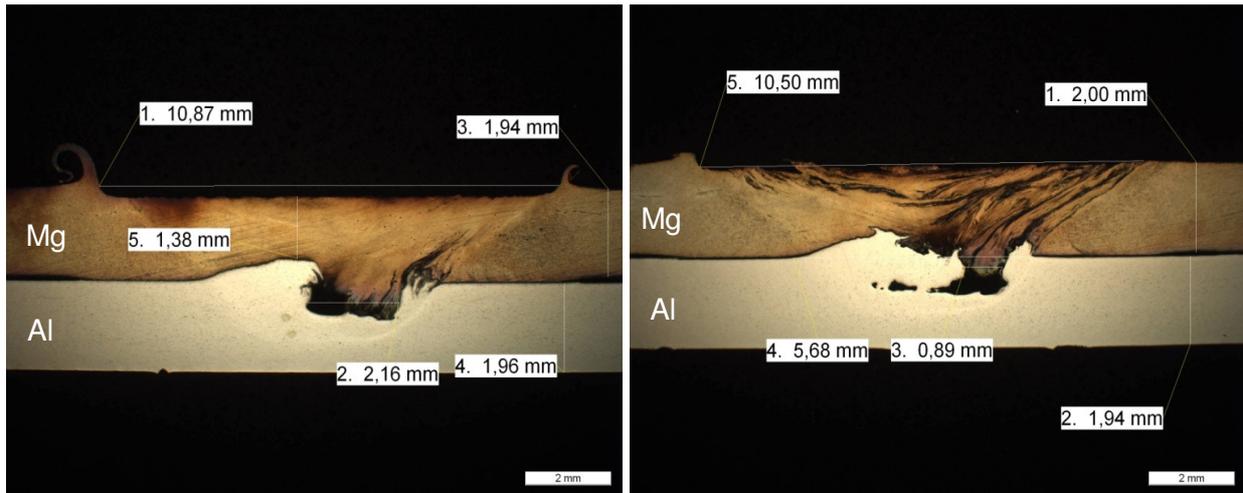


Abbildung 66: Schliff FSW Al-Mg, (links) Schliff 53-1, (rechts) Schliff 53-3

In Abbildung 67 links (Schliff 53-2) sieht man die „Aluminium Streifen“ (weiche Bereiche). Aus dem rechten Bild ist ersichtlich, dass Mg-Schweißgut ein feinkörniges Gefüge hat (einige μm Korngröße), wobei der Mg-Grundwerkstoff ein etwas grobkörnigeres Gefüge aufweist (ca. $20\mu\text{m}$).

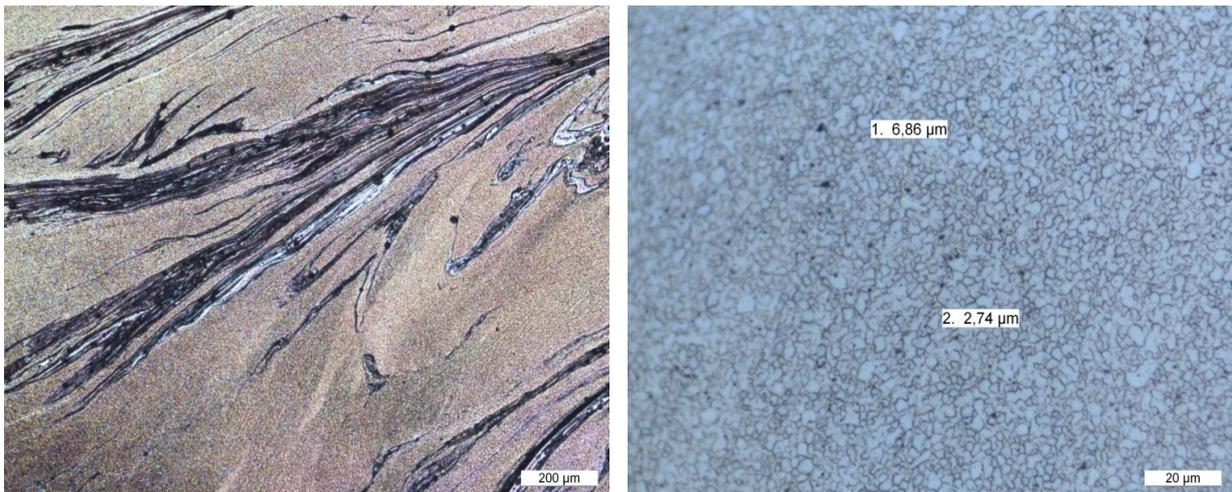


Abbildung 67: FSW Al-Mg, Schliff 53-2

Die Tatsache, dass es zu keiner stoffschlüssigen Verbindung zwischen Al- und Mg-Werkstoffen kommt ist in der Abbildung 68 noch deutlicher dargestellt. Im linken Bild kann man auch die kleinen Hohlräume beobachten. Das rechte Bild zeigt Spuren von Sauerstoff, der aus dem Al-Oxid stammt.

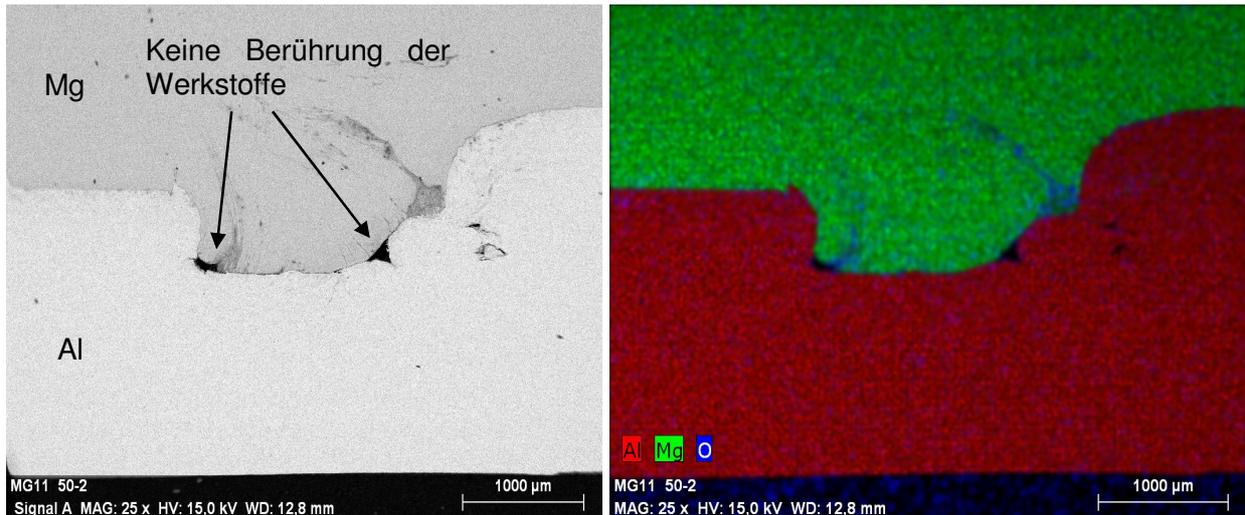


Abbildung 68: REM & EDX FSW Al-Mg, Schliff 50-2

Bei hohen Vergrößerungen (500 bzw. 1000-fach) konnte ein am Übergang (Al-Mg) befindlicher Spalt festgestellt werden, Abbildung 69.

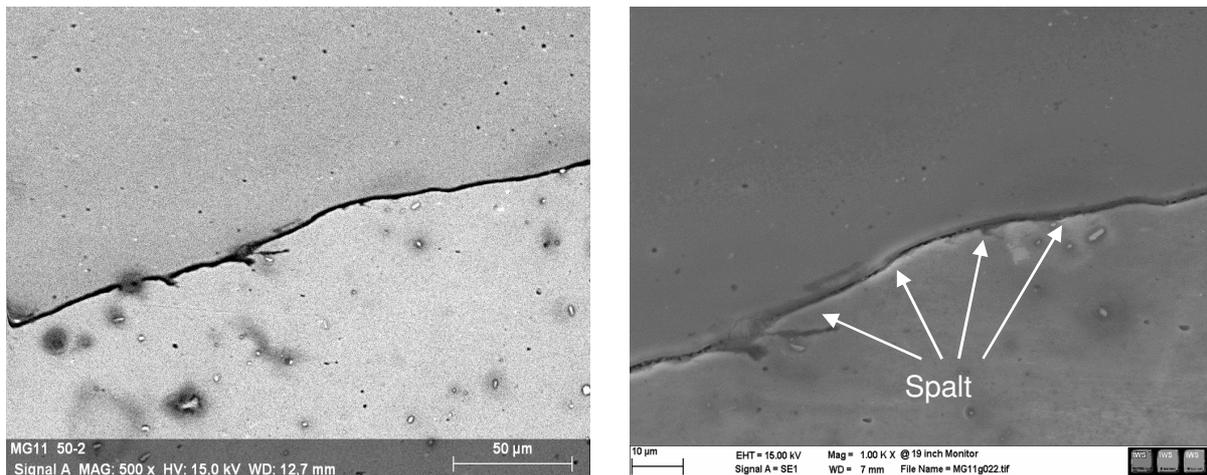


Abbildung 69: REM - FSW Al-Mg, Schliff 50-2 / 500x, 1000x Vergrößerung

In Abbildung 73 ist ein Schliff der FSSW Al-Mg Schweißungen dargestellt, wobei Mg oben und Al unten angeordnet wurden. Durch die Verdrängung von Al entsteht die „Durchmischung“ (Verhakung) von beiden Materialien. Teilweise konnten auch Risse gefunden werden. Bei der Anordnung Al-oben/Mg-unten kommt es zu keiner „Durchmischung“. Es ist nur ein leichter Formschluss sichtbar, Abbildung 71.

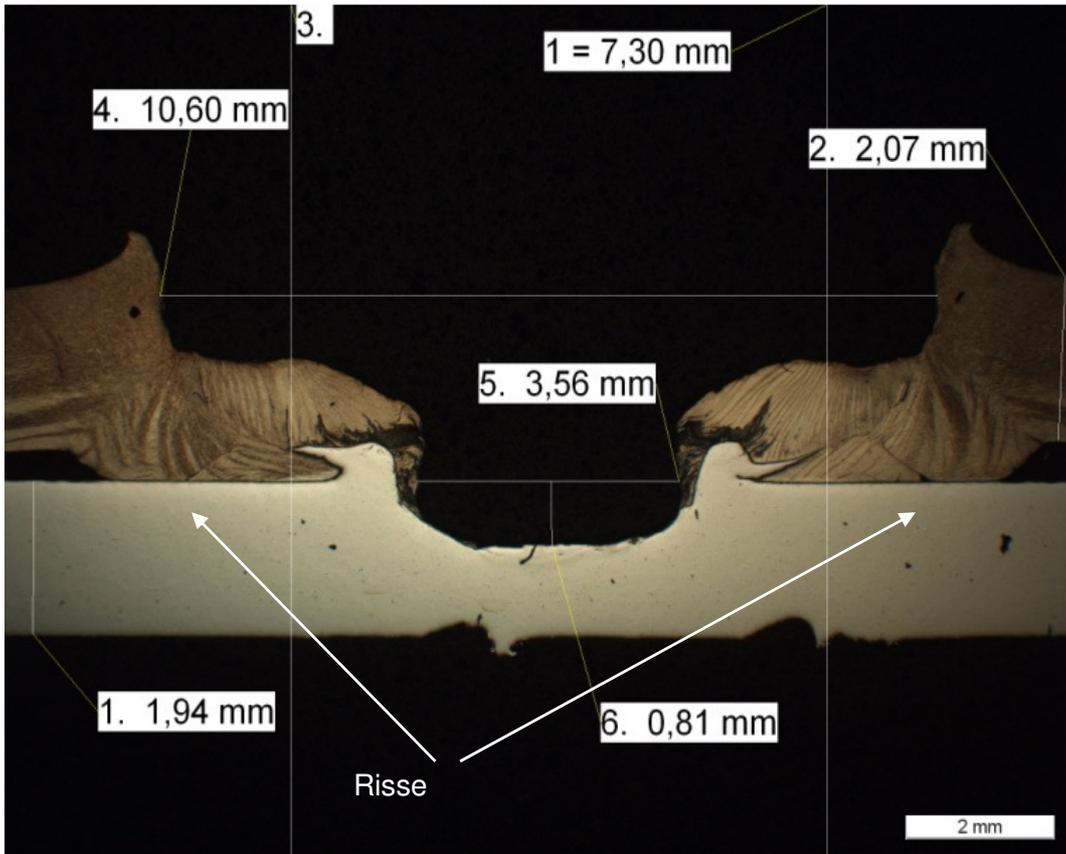


Abbildung 70: FSSW Al-Mg, Mg-oben/Al-unten

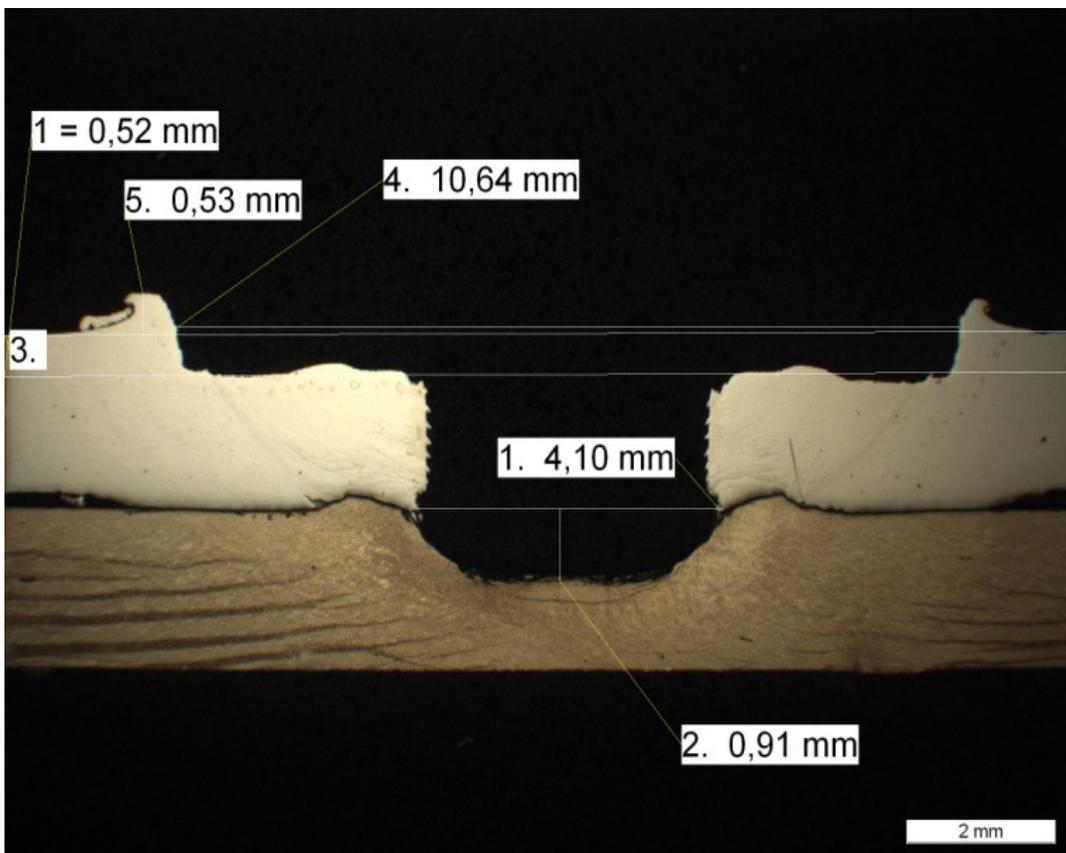


Abbildung 71: FSSW Al-Mg, Mg-unten/Al-oben

Das Diagramm 8 gibt den Verlauf einer Mg-Al FSW Schweißung wieder. Den höchsten Härtewert weist der Al-Grundwerkstoff (82,6 HV0,5) auf. Bei den Messungen wurde ein fast linearer Abfall des Härtewertes im Übergangsbereich festgestellt. Beim Mg-Grundwerkstoff hat man einen Härtewert von ca. 60 HV0,5 gemessen.

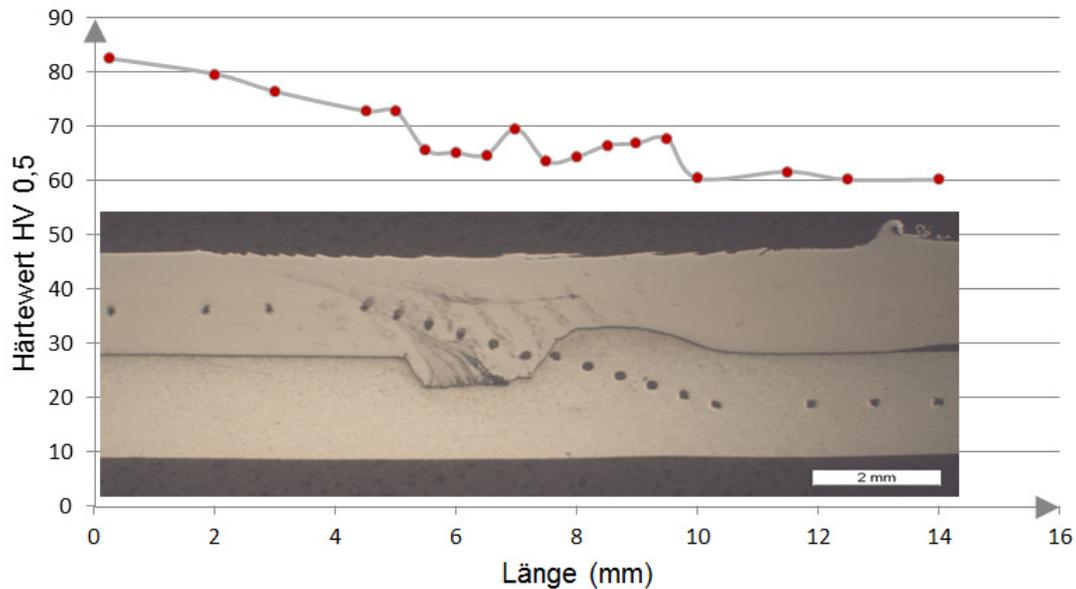


Diagramm 8: Härtemessungen HV 0,5 - Schliiff 51-1

4.3.3 Halbhohlstanznieten

4.3.3.1 Zugversuch

Insgesamt wurden 6 Zugversuche (Probenform - siehe Abbildung 39) durchgeführt, davon 3 mit und 3 ohne Klebstoff. Dabei wurde das Al-Blech matrizenseitig und das Mg-Blech stempelseitig angeordnet (Erklärung der Anordnung, siehe Querschliffe Abbildung 75). Da bei den metallografischen Untersuchungen die Kombination Matriz SM0900084, Niet C5x6 und Druck 230bar die besten Ergebnisse lieferte, wurden die Proben N.Z.1 – N.Z.6 damit hergestellt und anschließend einer Zugprüfung unterworfen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 35 angegeben.

Tabelle 35: Ergebnisse der Zugversuche Halbhohlstanznieten Proben Al-Mg

Niet	Matrize	Druck (bar)	Aushärtetemperatur (°C)	Probenbezeichnung	F_{\max} (kN)	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.1	14.5	Mit ausgehärtetem Klebstoff
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.2	13.48	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.3	14.11	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.4	4.92	Ohne Klebstoff
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.5	4.87	
C5x6	SM0900084	230	180	N.Z.6	4.74	

Bei allen Stanznietproben wurde das Mg-Blech spempelseitig positioniert. Bei den Proben mit Klebstoff ist es zum Versagen gekommen, da der Niet im matrizenseitigen Al-Blech geblieben ist und das Mg-Blech durchgerissen hat, Abbildung 72.

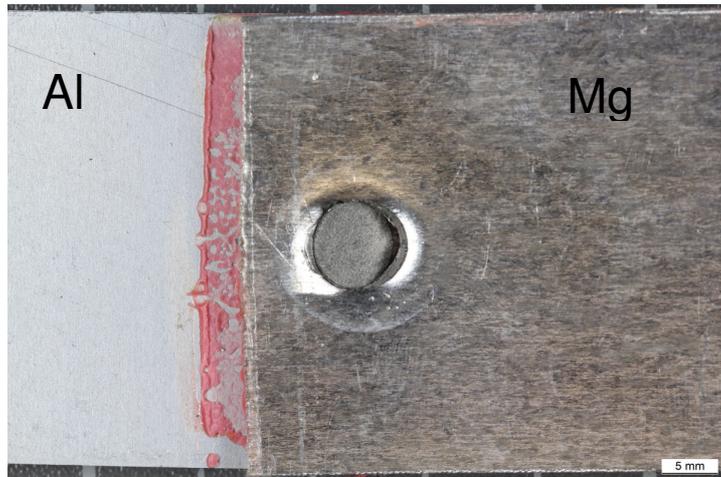


Abbildung 72: Probe N.Z.2 Bruchfläche Halbhohlstanznieten mit Klebstoff

Bei einigen Proben ohne Klebstoff wurde ein Teil des Mg-Blechs abgeschert. Dies ist in der Abbildung 73 deutlich zu sehen. Bei den übrigen Proben ohne Klebstoff ist es zuerst zum Kippen des Mg-Blechs gekommen und anschließend verlief der Riss um den Nietkopf herum, Abbildung 74.

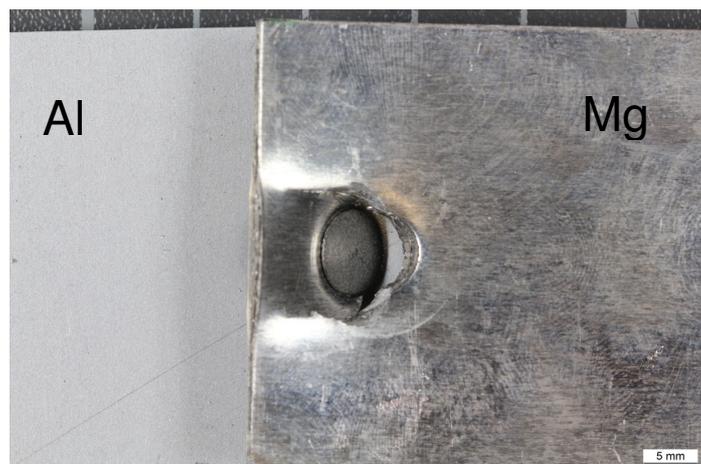


Abbildung 73: Probe N.Z.4 Bruchfläche Halbhohlstanznieten ohne Klebstoff



Abbildung 74: Probe N.Z.6 Bruchfläche Halbhohlstanznieten ohne Klebstoff

4.3.3.2 Querschliffe

In den folgenden Abbildungen sind die Querschliffe der Halbhohlstanzniete ohne Zugabe vom Klebstoff dargestellt. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die matrizenseitige Anordnung des Mg-Blechs (Mg-unten) zur starken Rissbildung führt. Dies war insbesondere bei verwendeten Flachmatrize (FM1002022) ausgeprägt, Abbildung 75 (rechts). Dabei wurde der Werkstoff teilweise „zerbröseln“.

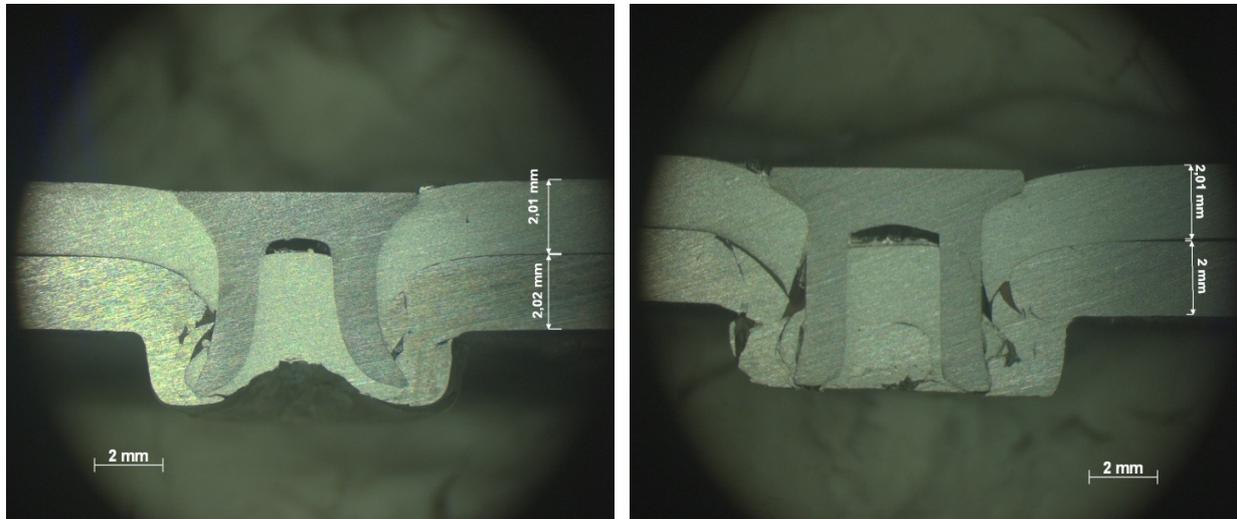


Abbildung 75: Halbhohlstanznieten Al-oben/Mg-unten, Schliffe, (links) DZ0902000 C5x6 230bar, (rechts) FM1002022 P5x6 230bar

Obwohl die Verwendung der Standardmatrize (SM0900084) die besten Ergebnisse lieferte, wurde bei einigen Verbindungen das Mg-Blech „durchgerissen“, Abbildung 76.

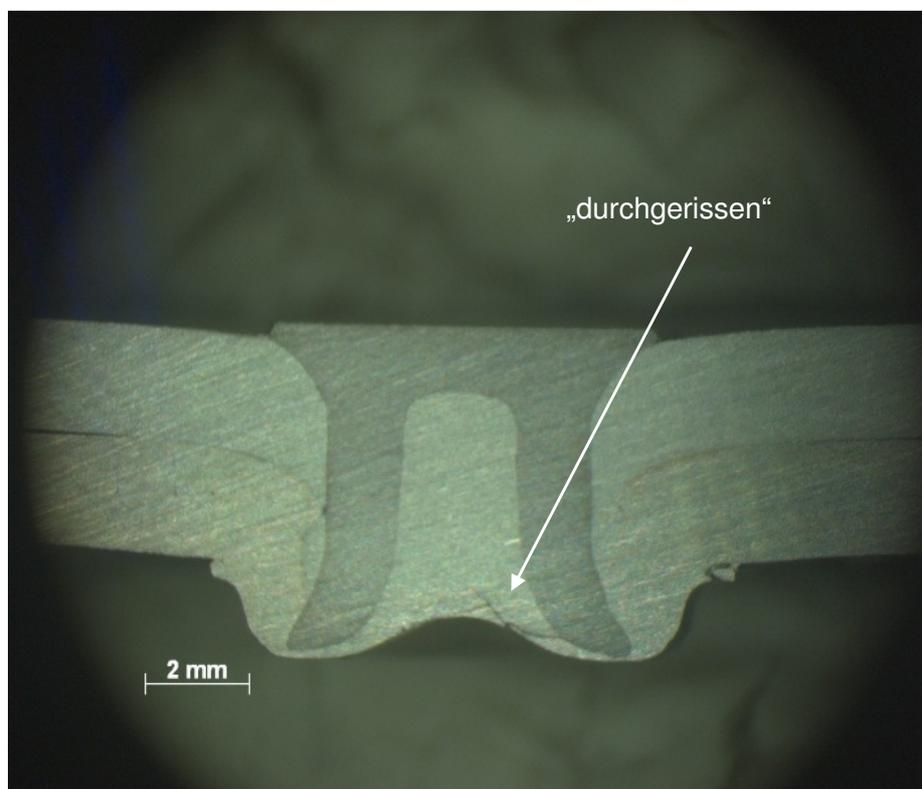


Abbildung 76: Halbhohlstanznieten Al-oben/Mg-unten, Matrize SM0900084, Niet C5x6, Druck 230 bar

Bei der Anordnung Mg-oben/Al-unten wurden ein rissfreier Schließkopf beobachtet. Es konnte auch festgestellt werden, dass in den Bereichen der größeren Umformung das Mg-Blech reißt, (siehe Pfeile) Abbildung 77.

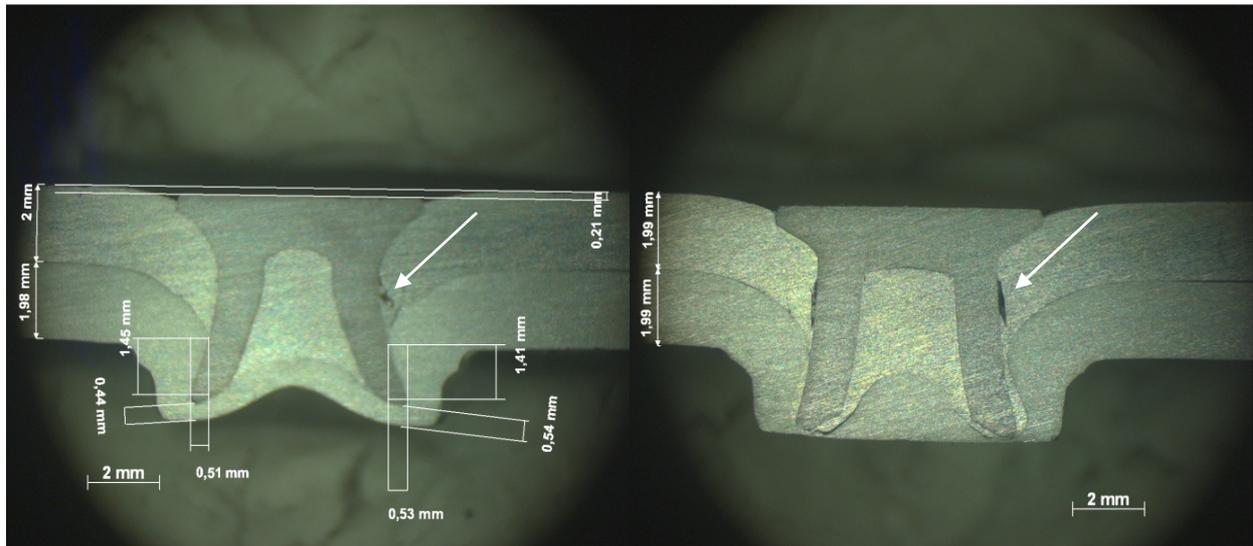


Abbildung 77: Halbhohlstanznieten Mg-oben/Al-unten, (links) DZ0902000 C5x6 230bar, (rechts) FM1002022 P5x6 230bar

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Mg-Bleche AZ31 artgleich sowie artfremd mit der Al-Legierung DBL 4951.60 in der Überlappverbindung mittels MIG(CMT)-Schweißen, FSW (Rührreibschweißen), FSSW (Rührreibpunktschweißen), Halbhohlstanznieten sowie Hybridfügen (+ Kleben) gefügt.

Zur Charakterisierung der Verbindungen wurden metallographische Untersuchungen (Lichtmikroskopie an Querschliffen), eine Mikrosondenuntersuchung, REM & EDX, mechanische Prüfungen (Zugscher- und Dauerschwingversuche) sowie Härtemessungen durchgeführt.

Als Schweißzusätze für das MIG(CMT)-Schweißen wurden die Mg-Drähte AZ31X, AM50A und der Al-Draht AISi5 verwendet. Als inerte Schutzgase wurden 100%Ar (Ar 4.6) sowie 50%Ar-50%He eingesetzt. Die verschiedenen Schweißzusätze und Schutzgase wirken sich nur wenig auf das Schweißergebnis (Nahtgeometrie und Scherzugfestigkeit) aus.

Die max. Zugkräfte der artgleichen Mg-Mg Überlappschweißnähte liegen im Bereich von 11 - 12kN und sind somit vergleichbar mit jenen der Al-Al (TAF beschichteten) Bleche mit Spalt aus der Diplomarbeit Vujić [27].

Um den Einfluss der Wärmebehandlung auf die statische Festigkeit der MIG(CMT) Schweißungen zu ermitteln, wurden die Proben bei den Temperaturen 180°C und 210°C (Simulation des KTL-Prozesses) und Haltezeiten (20 bzw. 60min) in einem Ofen wärmebehandelt. Es konnte kein Einfluss der Wärmebehandlung beobachtet werden. Das MIG(CMT) Schweißen der artfremden Verbindung (Mg-Al) konnte nicht erfolgreich durchgeführt werden, da sich eine massive intermetallische, spröde Phase bildet.

Die MIG(CMT) Schweißungen wurden auch im Dauerschwingversuch bei einem Spannungsverhältnis $R = 0,1$ (Zugschwellbereich) getestet. Die Risseinleitung erfolgte dabei stets bei der geometrischen Kerbe der Schweißnahtwurzel. Der Rissverlauf bzw. der anschließende Bruch verlief bei allen Proben durch die Schweißnaht. Für die artgleichen Mg-Mg-Schweißverbindungen wurden für die Schweißzusätze AM50A und AZ31X je eine Wöhlerlinie erstellt (jeweils 15 Proben, bei unterschiedlichen Lastniveaus). Die Gegenüberstellung der erstellten Wöhlerlinien mit jenen der Al-Al MIG(CMT)-Schweißungen aus der Diplomarbeit Vujić [27] zeigte niedrigere Ermüdungsfestigkeit der Mg-Mg Schweißverbindungen auf dem gleichen Belastungsniveau.

Bei FSW wurde ein Standard Werkzeug verwendet (H11 Stahl). Mittels FSW-Schweißen konnten Mg-Bleche miteinander erfolgreich verbunden werden. Die statische Festigkeit liegt bei ca. 11kN und ist somit vergleichbar mit den Festigkeiten von Mg-Mg MIG(CMT)-Schweißverbindungen. Bei den artfremden (Al-Mg) FSW-Schweißverbindungen wurden die Bleche nur formschlüssig verbunden. Dabei wurde eine statische Festigkeit von 32%-36% von jener der artgleichen Mg-Mg MIG(CMT) Überlappverbindungen erreicht (ca. 4kN gegenüber 11-12kN). Da das FSW Untersuchungsprogramm nur geringen Umfang hatte, wird angenommen, dass noch deutliches Verbesserungspotenzial besteht. Beim artfremden Rührreibpunktschweißen (Mittels FSSW) wurden die Al- und Mg-Bleche nur formschlüssig verbunden. Die erreichte statische Festigkeit liegt daher nur bei ca. 9%-25% der statischen Festigkeit von Mg-Mg MIG(CMT) Schweißverbindungen (ca. 1,1-2,8kN gegenüber 11-12kN).

Beim Halbhohlstanznieten wurden 3 verschiedene Matrizenformen (SM0900084, FM1002022, DZ0902000) sowie auch 3 verschiedene Stanzniettypen (C5x6, P5x6, K5x7) verwendet. Es zeigte sich, dass die Standardmatrize (SM0900084) mit dem Niet C5x6 für die artgleiche (Mg-Mg), wie auch für die artfremde Verbindung (Mg-Al) die besten Ergebnisse lieferten. Der Druck betrug 230bar. Mittels Halbhohlstanznieten konnten Mg-Bleche mit den Al-Blechen erfolgreich gefügt werden. Voraussetzung für die erfolgreiche Verbindung ist die stempelseitige Anordnung des Mg-Blechtes; anderenfalls entsteht starke Rissigkeit und Abbröckelungen. Die statische Festigkeit der nicht geklebter, genieteten Verbindungen liegt bei ca. 39-44% von der statischen Festigkeit von Mg-Mg MIG (CMT)- Überlappverbindungen (ca. 4,7-4,9kN gegenüber 11-12kN), bei gleicher Probenbreite und Überlappung (ein Niet ohne Klebstoff, Mg-Blech stempelseitig). Die statische Festigkeit der geklebter und genieteter Verbindungen liegt bei ca. 112-132% der statischen Festigkeit von Mg-Mg MIG(CMT) Überlappverbindungen (ca.13,5-14,5kN gegenüber ca. 11-12kN). Als Klebstoff wurde der Rohbauklebstoff Betamate 1620 aufgetragen und ausgehärtet. Dieser wurde manuell appliziert und dabei war der Klebstoffauftrag nicht definiert.

6 Literaturverzeichnis

- [1] L.-D. Anwenderforum, *SUPER-LEICHT-CAR the Multi-Material Car Body*, Bamberg, 2008.
- [2] K. KAINER, *Magnesium-Eigenschaften, Anwendungen, Potenziale*, Wiley-VCH Verlag, 2000.
- [3] C. KAMMER, *Magnesium Taschenbuch*, Düsseldorf: Aluminium Verlag, 2000.
- [4] C. VOGELI, *Elektronenstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen*, Aachen: Shaker Verlag, 2001.
- [5] U. KUTSCHERA, *Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlbeschichten von Magnesiumlegierungen sowie zum artungleichen Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Festkörperlaser und pulverförmigen Zusatzwerkstoffen*, Clausthal, 2003.
- [6] Datenbank, *ASM International*.
- [7] B. ENGL, *Eine neue Herstellungsmethode und Anwendungspotenziale für Magnesiumblech*, Freiberg/Sachsen: Tyssenkrupp Techforum, 2002.
- [8] „<http://tu-freiberg.de/ze/magnesium/gießwalzen.html>,“ [Online]. [Zugriff am 16 04 2013].
- [9] A. FRITZ und G. SCHULZE, *Fertigungstechnik*, Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [10] L. MORDIKE und P. WIESNER, *Fügen von Magnesiumwerkstoffen*, Düsseldorf: DVS Verlag, 2005.
- [11] H. EIBISCH und E. WENDLER-KALSCHE, „Neue Entwicklungen beim Thixotropgießen von Magnesiumlegierungen,“ in *s Zukunftsorientierter Einsatz von Magnesium im Verkehrswesen*, Expert Verlag, 2005, pp. 74-86.
- [12] B. MORDIKE und K. KAINER, *Magnesium alloys and their applications*, Wiley-VCH Verlag, 2000.
- [13] *Chemische und elektrochemische Methoden zum Polieren von Magnesiumlegierungen*, 2012.
- [14] „http://www.ach-surface.com/pdf-downloads/Verfahren%deuts/MAG-KEPLA-2012_dt_ansicht.pdf,“ ACH - Oberflächentechnik. [Online]. [Zugriff am 29 02 2012].
- [15] M. e. a. FERNANDUS, *Optimising diffusion bonding parameters to maximize the strength of A6061 aluminium and AZ31B magnesium alloy joints*, 2011.
- [16] Fronius, *CMT - ein neuer Prozess in der Fügechnik*, 2005.

- [17] U. DILTNEY, Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1., Aachen: Springer Verlag, 2005.
- [18] „http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-D3000F83-01420577/fronius_international/hs.xsl/79_15575_DEU_HTML.htm,“ Fronius. [Online]. [Zugriff am 08 05 2013].
- [19] M. RETHMEIER, MIG Schweißen von Magnesiumlegierungen, Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- [20] Sonderschweißverfahren Skriptum, TU Graz.
- [21] „<http://www.twi.co.uk/services/technical-information/published-papers/german/industrieller-einsatz-des-reibruhschweissverfahrens-im-verkehrswesen>,“ [Online]. [Zugriff am 13 02 2012].
- [22] A. e. a. KOSTKA, „Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy,“ in s *Scripta Materialia* 60, 2009, pp. 953-956.
- [23] E. DOEGE und B. B.-A., Handbuch Umformtechnik, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [24] Mercedes-Benz, „Technische Norm, Version 1MBN 10 361,“ Mercedes Benz, 2006.
- [25] „BMW Group Standard“.
- [26] „Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei“.
- [27] S. VUJIĆ, *Wurzelkerbenausbildung beim MIG und CMT Schweißen von Aluminium*, Graz, 2012.
- [28] „<http://thyssenkrupp-mgf.com/de/produkt/produktion.jsp>,“ [Online]. [Zugriff am 20 02 2012].
- [29] M. POURBAIX, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Cebelcor Verlag, 1974.
- [30] R. LAGGER, Untersuchung von Stahl-, Aluminium- und Magnesium-Legierungen und deren artgleicher Schweißverbindungen hinsichtlich ihrer Korrosionseigenschaften bei der NNS-Prüfung mit 5-% NaCl-Lösung, Graz: Bachelor-Arbeit, 2012.
- [31] „<http://www.seilnacht.com/Lexikon/waermel.html>,“ [Online]. [Zugriff am 13 04 2013].
- [32] H. FRICKE und M. ISRAEL, in s *Simulation von Hybridfügeprozessen in Adhäsion*, 2011, pp. 24-25.
- [33] Elisenthal, „http://elisenthal.de/pdf_de/Schweisszusaeetze_Magnesium_Einlage.pdf,“ [Online]. [Zugriff am 06 02 2012].
- [34] B. SCHULZE, Werkstoffkunde, Berlin: Springer Verlag, 2005.

[35] „<http://www.dowautomotive.com/>“, [Online]. Available: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_049c/0901b8038049c84e.pdf?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-51323.pdf&fromPage=GetDoc. [Zugriff am 08 05 2013].

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung von Fahrzeuggewichten [1]	1
Abbildung 2: Gewichts- und Materialverteilung [1]	1
Abbildung 3: Vereinfachtes Fließbild der Magnesiumherstellung durch Schmelzflusselektrolyse [3]	2
Abbildung 4: Binäres Phasenzustandsdiagramm Al-Mg [6].....	6
Abbildung 5: Einsatzbeispiele - Mg-Druckgußteile [2]	7
Abbildung 6: Pressteil aus MgF DDQ(Deep-Draw Quality) [7]	8
Abbildung 7: Türinnenverstärkung aus MgF DDQ, Blechdicke 3mm [7].....	8
Abbildung 8: Rissbildung beim Kaltwalzen von AZ31 ohne Vorwärmung [3].....	9
Abbildung 9: Endabmessungsnahes Gießwalzen [7]	10
Abbildung 10: Vergleich konventionelles Walzen und Gießwalzen von Mg-Blechen [7].....	10
Abbildung 11: Gießwalzanlage (schematisch) [8]	11
Abbildung 12: Vergleich Gießwalztechnologie mit konventioneller Bandherstellung [8]	12
Abbildung 13: Warmkammer - Druckgussmaschine [9]	13
Abbildung 14: Waagrechte Kaltkammer - Druckgussmaschine [9].....	14
Abbildung 15: Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium und Magnesium [4].....	15
Abbildung 16: Schematischer Aufbau einer Thixospritzgießanlage (Thixomoulding) [11]	16
Abbildung 17: Zustandsdiagramm des Systems Mg-Al [11]	17
Abbildung 18: Standardpotenziale in (V) einiger reiner Metalle [5].....	17
Abbildung 19: Pourbaix-Diagramm Magnesium (Korrosions-, Immunitäts- und Passivitätsbereich) [13]	18
Abbildung 20: Aufbau der Magoxid-Coat-Schicht [14].....	20
Abbildung 21: Verfahrensprinzip MIG-Schweißen [9].....	21
Abbildung 22: Wassergekühlte MIG-/MAG-Schweißanlage [9]	22
Abbildung 23: Vergleich der verschiedenen Schweißverfahren [16]	23
Abbildung 24: Prinzip des CMT-Prozesses mit oszillierender Drahtvorschubbewegung [17]	23
Abbildung 25: Werkstoffübergang bei inerten Schutzgasen - Verdampfung beim Schweißen [9]	25

Abbildung 26: Vergleich der Dampfdruckkurven von Magnesium und Aluminium [19].....	26
Abbildung 27: Prinzip des Rührreibschweißens [21].....	26
Abbildung 28: Halbhohlstanznietmerkmale [25].....	28
Abbildung 29: Prozessschritte beim Halbhohlstanznieten [23].....	29
Abbildung 30: Matrizentypen für das Halbhohlstanznieten [24].....	29
Abbildung 31: Unterschiedliche Ausführungen der Stanzniete [24].....	30
Abbildung 32: a) Überlappklebeverbindung unbelastete; b) Schubspannungsverteilung in belasteter biegesteifer Verbindung; c) Normalspannungsverteilung in belasteter biegearmer Verbindung [10].....	31
Abbildung 33: Verfahrensvarianten beim Hybridfügen [26].....	32
Abbildung 34: FSW-Anlage MTS ISTIR BR4 - Schweißkopf mit Werkzeug und Spannvorrichtung.....	36
Abbildung 35: FSW Werkzeug W300.....	37
Abbildung 36: Zugprüfmaschine (MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik).....	39
Abbildung 37: Probenentnahme für statische Scherzugversuche.....	40
Abbildung 38: Probenentnahme für Dauerschwingversuch.....	40
Abbildung 39: Probenform Halbhohlstanznieten für statische Zugscherversuche.....	42
Abbildung 40: Blechbezeichnungen in der Überlappschweißverbindung.....	44
Abbildung 41: Einspannung der Proben bei den durchgeführten Dauerschwingversuchen ..	51
Abbildung 42: Probenform und Schliffentnahme Ermüdungsversuch.....	53
Abbildung 43: Schliff - Probe C.d.10.2.....	53
Abbildung 44: Schliff - Probe C.d.5.3.....	54
Abbildung 45: Querschliff - Probe 35 - Schliff 1.....	54
Abbildung 46: Härteverlauf - Probe 35 - Schliff 1 (Schweißzusatz AM50A).....	55
Abbildung 47: Querschliff - Probe 29 (Schweißzusatz AM50A).....	55
Abbildung 48: Querschliff Probe 40 - Schliff 2.....	57
Abbildung 49: Probe 40 - Schliff 2 / Korngrößenvermessung; (links) Fusionslinie WEZ-SG - (rechts) WEZ.....	57
Abbildung 50: Probe 40 - Schliff 2 / Korngrößenvermessung Grundwerkstoff AZ31.....	58
Abbildung 51: FSW Schweißung - Probe 54.....	59
Abbildung 52: Querschliff FSW Mg-Mg (Probe 54).....	61
Abbildung 53: Probe N.Z.7 Bruchfläche Halbhohlstanznieten mit Klebstoff.....	62
Abbildung 54: Probe N.Z.10 Bruchfläche Halbhohlstanznieten ohne Klebstoff.....	63
Abbildung 55: Stanznieten_SM0900084_C5x6_230bar.....	63
Abbildung 56: Stanznieten_FM1002022_P5x6_230bar.....	64
Abbildung 57: Al-Mg Schweißung - Querschliff 5-2.....	67
Abbildung 58: EDX-Analyse Mg-Al Schweißung, Schweißzusatz AlSi5.....	68
Abbildung 59: Messpunkte - Mikrosondenanalyse EPMA, Schliff 5-2.....	69
Abbildung 60: Schliff 5-2, Schweißzusatz AlSi5, Schutzgas Ar4.6.....	70

Abbildung 61: Härteverlauf HV0,01 - Schliff 5-2.....	71
Abbildung 62: Al-Verteilung, Al-Mg Schweißung, Schliff 5-2.....	71
Abbildung 63: Mg-Verteilung, Al-Mg Schweißung, Schliff 5-2.....	72
Abbildung 64: Vereinfachtes Zweiphasendiagramm Al-Mg.....	72
Abbildung 65: FSW Schweißung Mg-Al, Probe 50.....	73
Abbildung 66: Schliff FSW Al-Mg, (links) Schliff 53-1, (rechts) Schliff 53-3.....	75
Abbildung 67: FSW Al-Mg, Schliff 53-2.....	75
Abbildung 68: REM & EDX FSW Al-Mg, Schliff 50-2.....	76
Abbildung 69: REM - FSW Al-Mg, Schliff 50-2 / 500x, 1000x Vergrößerung.....	76
Abbildung 70: FSSW Al-Mg, Mg-oben/Al-unten.....	77
Abbildung 71: FSSW Al-Mg, Mg-unten/Al-oben.....	77
Abbildung 72: Probe N.Z.2 Bruchfläche Halbhohlstanznieten mit Klebstoff.....	79
Abbildung 73: Probe N.Z.4 Bruchfläche Halbhohlstanznieten ohne Klebstoff.....	79
Abbildung 74: Probe N.Z.6 Bruchfläche Halbhohlstanznieten ohne Klebstof.....	79
Abbildung 75: Halbhohlstanznieten Al-oben/Mg-unten, Schliffe, (links) DZ0902000 C5x6 230bar, (rechts) FM1002022 P5x6 230bar.....	80
Abbildung 76: Halbhohlstanznieten Al-oben/Mg-unten, Matrize SM0900084, Niet C5x6, Druck 230 bar.....	80
Abbildung 77: Halbhohlstanznieten Mg-oben/Al-unten, (links) DZ0902000 C5x6 230bar, (rechts) FM1002022 P5x6 230bar.....	81

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von reinem Magnesium [4]	3
Tabelle 2: Eigenschaftsvergleich Mg-Al [5]	3
Tabelle 3: Legierungs- und Zustandsbezeichnungen von Mg-Legierungen [3]	4
Tabelle 4: Legierungselemente zur Verbesserung der Eigenschaften von Mg-Legierungen [6]	4
Tabelle 5: Wirkung der Hauptlegierungselemente in Magnesium [3]	5
Tabelle 6: Dichtebezogene Leichtgewichts-Werte (bezogen auf Stahl) [9].....	7
Tabelle 7: Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die Eigenschaften von MgF DDQ-Blech [9]	12
Tabelle 8: Freies Korrosionspotenzial in 3-6%-iger NaCl-Lösung [7]	19
Tabelle 9: Vergleich Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Verdampfungsenthalpie von Mg und Al [22]	25
Tabelle 10: Vor- und Nachteile des Klebens [10]	30
Tabelle 11: Eigenschaftsvergleich Magnesium / Aluminium.....	33
Tabelle 12: Chemische Zusammensetzungen der Mg-Grundwerkstoffe	33
Tabelle 13: Chemische Zusammensetzung der Al-Grundwerkstoff.....	33
Tabelle 14: Chemische Zusammensetzung Magnesium Massivdrähte AZ31X und AM50A, Ø1,2mm	34
Tabelle 15: Chemische Zusammensetzung Aluminium Massivdraht AlSi5, Ø1mm nach DIN EN ISO 18273	34
Tabelle 16: Eigenschaften der Mg-Schweißzusatzwerkstoffe [29]	35
Tabelle 17: Halbhohlstanznieten - Beispiel Niet-/Matrizenkombination	37
Tabelle 18: Eigenschaften Klebstoffs Betamate 1620 [30]	38
Tabelle 19: Probenbezeichnung Ermüdungsversuch.....	41
Tabelle 20: Versuchsplan – Rührreibschweißen (FSW).....	44
Tabelle 21: Versuchsplan - MIG (CMT) Schweißen	45
Tabelle 22: Versuchsplan - Halbhohlstanznieten	46
Tabelle 23: Versuchsplan - CMT Puls-mix Schweißen	46
Tabelle 24: Ergebnisse der Scherzugversuche CMT Proben.....	47
Tabelle 25: MIG (CMT) Schweißen / Ergebnisse Scherzugversuche - Einfluss der Wärmebehandlung (Schweißzusatz AM50A).....	48
Tabelle 26: MIG (CMT) Schweißen / Ergebnisse Scherzugversuche - Einfluss der Wärmebehandlung (Schweißzusatz AZ31X)	49
Tabelle 27: Ergebnisse der Dauerschwingversuche Schweißzusatz AM50A	51
Tabelle 28: Ergebnisse der Dauerschwingversuche - Schweißzusatz AZ31X.....	52
Tabelle 29: Ergebnisse der Zugversuche am FSW Proben Mg-Mg	59
Tabelle 30: Ergebnisse der Zugversuche Stanznieten.....	62
Tabelle 31: Ergebnisse der Zugscherversuche der untersuchten Fügeverfahren Mg-Mg	65

Tabelle 32: Ergebnisse der Mikrosondenanalyse EPMA	70
Tabelle 33: Ergebnisse der Zugscherversuche FSW - Probe 50.....	74
Tabelle 34: Ergebnisse der Zugversuche FSSW Proben Al-Mg.....	74
Tabelle 35: Ergebnisse der Zugversuche Halbhohlstanznieten Proben Al-Mg	78

7.3 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: MIG (CMT) Schweißungen max. Zugkraft - bei unterschiedlichen Auslagerungszeiten- und -temperaturen.....	50
Diagramm 2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche AZ31 Proben geschweißt mit Schweißzusätzen AM50A und AZ31X.....	52
Diagramm 3: Vergleich des Ausfließverhaltens bzw. der Nahtwinkeln von Mg-Schweißnähten	56
Diagramm 4: Vergleich der Nahtüberhöhungen von Mg-Schweißnähten.....	56
Diagramm 5: Ergebnisse der Scherzugversuche am FSW Proben Mg-Mg.....	60
Diagramm 6: Ergebnisse Zugscherversuche (Mittelwert aus 3 Messungen und max./min. Wert).	64
Diagramm 7: Dauerschwingversuche Magnesium - und Aluminiumschweißproben.....	66
Diagramm 8: Härtemessungen HV 0,5 - Schliff 51-1	78